



SENVISAT

Etude de faisabilité d'un Suivi
ENVironnemental par SATellite dans le
Parc naturel marin du golfe du Lion

Phase 1 : Evaluation de méthodes d'analyse du trait de côte et de l'avant-côte via les données satellites PLEIADES

24 octobre 2019

CEFREM & EID, 2019



UPVD
Université de Perpignan Via Domitia



**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**
Établissement public du ministère de l'Environnement



Référence à utiliser pour toute citation du document

Aleman, N., Robin, N., Raynal, O., Certain, R., Richard, B., Gervais, M., Hebert, B., Meniti, C., Cross, M., Heurtefeux, H., 2019. Evaluation de méthodes d'analyse du trait de côte et de l'avant côte via les données satellites PLEIADES. Rapport phase 1 - SENVISAT.

CONTACTS

Nicolas Aleman
nicolas.aleman@univ-perp.fr
04.68.66.20.57

Nicolas Robin
nicolas.robin@univ-perp.fr
04.30.19.23.00

Mathieu Gervais
mgervais@eid-med.org
04.30.63.67.82

Hugues Heurtefeux
hheurtefeux@eid-med.org
04.67.63.72.99

Laboratoire CEFREM
Université de Perpignan Via
Domitia, Bat U
52, av. Paul Alduy
66860 Perpignan Cedex

EID Méditerranée
Pôle Littoral
165 avenue Paul Rimbaud
34 184 Montpellier Cedex 4

Le laboratoire CEFREM (Centre de Formation et de Recherche sur les environnements Méditerranéens) de l'Université de Perpignan Via Domitia est spécialisé notamment dans l'étude détaillée des données sédimentaires et morphologiques pour la compréhension de la dynamique littorale. Son activité de recherche est focalisée sur le thème des transferts de matière et d'énergie aux interfaces du système côtier.

Le pôle Littoral de l'EID Méditerranée s'investit dans la protection et la restauration des cordons dunaires et des plages. Les connaissances scientifiques et techniques accumulées sur cet espace constituent aujourd'hui un capital mis à disposition des collectivités territoriales et des établissements publics. Ainsi nous concevons et proposons aux collectivités des actions de protection et de réhabilitation des plages et des dunes, ainsi que des modalités de gestion de la fréquentation adaptées à ces sites.

**Evaluation de méthodes d'analyse
du trait de côte et de l'avant-côte
via les données satellites PLEIADES**

PHASE 1 – Contrat de recherche SENVISAT

Nicolas Aleman

Nicolas Robin

Olivier Raynal

Raphaël Certain

Myriam Cross

Mathieu Gervais

Bertil Hebert

Meniti Christophe

Bertrand Richard

TABLE DES MATIERES

PREAMBULE.....	7
1. INTRODUCTION	8
2. SITES D'ETUDE	9
3. METHODOLOGIE.....	11
3.1. Les données Pléiades.....	11
3.2. Les levés du trait de côte	11
3.2.1. Définition du trait de côte	11
3.2.2. Extraction semi-automatisée.....	13
3.2.3. Photo-interprétation	13
3.2.4. Levé de terrain	13
3.3. Les levés de la position des barres d'avant-côte	14
3.3.1. A partir des données Pléiades	14
3.3.2. A partir de levés bathymétriques	14
3.4. Les levés topo-bathymétriques.....	15
3.4.1. Topographie.....	15
3.4.2. Bathymétrie	16
3.4. Organisation des missions	16
4. RESULTATS.....	18
4.1. Comparaison des méthodes de levé du trait de côte	18
4.2. Amélioration apportées à la détection semi-automatique du trait de côte (nouvelle méthode simplifiée)	24
Résultats obtenus avec la nouvelle méthode simplifiée basée sur le NDVI / NDWI	26
Comparatif entre seuillage d'indices et classification (ancienne et nouvelle méthode)	27
4.3. Comparaison des méthodes de levé de la position des barres d'avant-côte	30
4.4. Evolution du budget sédimentaire des plages de poches.....	37
4.4.1. Baie de Paulilles	37
4.4.2. Plage de Banyuls	50

5. CONCLUSION GENERALE.....	61
6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	62

PREAMBULE

Ce rapport constitue la phase 1 du contrat de recherche " Suivi ENVironnemental par SATellite" (SENVISAT) entre le Parc Naturel Marin du Golfe du Lion (PNMGL), l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD), le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et l'Entente Interdépartementale pour la Démoustication (EID- méditerranée). Les recherches UPVD/CNRS ont été réalisées par le groupe Littoral Multi-Scale Analysis (LMUSCA) du Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens (CEFREM UMR5110).

Ces travaux s'inscrivent dans la finalité "gestion géophysique du littoral" du cahier des charges du PNMGL et plus particulièrement la sous-finalité "De la défense contre la mer vers la gestion du trait de côte : un aménagement littoral respectueux de l'environnement marin".



1. INTRODUCTION

Un des objectifs majeurs du cahier des charges du PNMGL est le suivi d’indicateurs permettant d’évaluer l’état et l’évolution des différents environnements couverts par l’extension du parc. Dans ce cadre, l’analyse de la dynamique du trait de côte (interface entre la terre, la mer et l’atmosphère) et de l’avant-côte (zone comprise entre le trait de côte et une dizaine de mètres de profondeur) doit permettre d’évaluer l’état du littoral du parc notamment en termes d’érosion, aléa majeur pour les enjeux côtiers.

De nombreuses méthodes de suivis du trait de côte existent aujourd’hui (Mallet et al., 2012). La méthode la plus avantageuse pour un suivi complet régulier du trait de côte du littoral du PNMGL apparaît être l’imagerie satellite Pléiades (CEREMA, 2018a). En effet, cette imagerie offre une grande couverture avec une résolution de 50 cm tout en ayant un coût relativement faible. Les seuls inconvénients sont la couverture nuageuse et les ombres portées qui peuvent empêcher la détection du trait de côte. Toutefois, la possibilité de planifier les acquisitions d’images permet souvent de les éviter.

Dans ce cadre, le PNMGL a fait l’acquisition d’image Pléiades entre 2017 et 2019 (printemps et automne), l’objectif étant, entre autres, de déterminer la faisabilité de développer une méthode d’extraction semi-automatique du trait de côte (par l’EID) et d’analyser la qualité des résultats par comparaison à des levés de terrain au DGPS RTK (par le CEFREM). Le suivi s’est concentré sur les plages de poche de Banyuls, Forat, Paulilles et Bernardi (levés réalisés par le CEFREM) et les plages ouvertes de Leucate, Barcarès, Toreilles et Canet (levés fournis par l’OBSCAT).

Ce rapport présente les résultats des analyses qualitatives de l’extraction semi-automatique du trait de côte. Il fait également le point sur les évolutions morphosédimentaires des plages de poche de la baie de Paulilles et de Banyuls qui ont fait l’objet d’un suivi topobathymétrique concomitant.

2. SITES D’ETUDE

Les plages étudiées dans ce travail couvrent une grande partie du littoral du Parc Naturel Marin du Golfe du Lion, depuis la côte Vermeille au sud jusqu’au cap Leucate au nord. Neuf secteurs ont été étudiés (Figure 1). Quatre plages de poche de la côte rocheuse ont été suivies par l’équipe LMUSCA du CEFREM : la plage de Banyuls et les plages du Forat, Paulilles et Bernardi dans la baie de Paulilles. Cinq plages sableuses ouvertes faisant partie des levés biennuelles de l’ObsCat ont été étudiées : Canet (secteur Canet Sud, Canet Nord, Têt et Sainte Marie), Torreilles (secteurs Bourdigou, Torreilles et Agly), Barcarès (secteurs Barcarès sud, Barcarès Nord et Lydia), Leucate (secteurs village naturiste et Leucate plage).



Figure 1 : Image Pléiades des neuf plages utilisées pour analyser les techniques de levé du trait de côte.

3. METHODOLOGIE

3.1. Les données Pléiades

Le programme Pléiades a été lancé en décembre 2011 par le CNES (Centre Nationale d’Etudes Spatiales) en partenariat avec *Airbus Defence and Space* et *Thales Alenia Space*. Il est constitué de deux satellites en orbite héliosynchrone à 694 km d’altitude. Ce système permet d’obtenir plus de 500 images par jour en très haute résolution spatiale (70 cm, ré-échantillonnée à 50 cm) et de photographier n’importe quel point de la terre en moins de 24h. Pour les besoins de cette étude, des clichés en stéréo ont été commandés auprès du Service de l’Imagerie Spatiale de l’IGN par le PNMGL au printemps et à l’automne 2017 et 2018.

3.2. Les levés du trait de côte

3.2.1. Définition du trait de côte

Avant d’initier quelques analyses que ce soient, il est indispensable de bien définir quel indicateur du trait de côte (TdC) est utilisé. En effet, les indicateurs du TdC sont multiples en fonction notamment de l’environnement étudié, de l’échelle temporelle et spatiale et de la technique de levé utilisée.

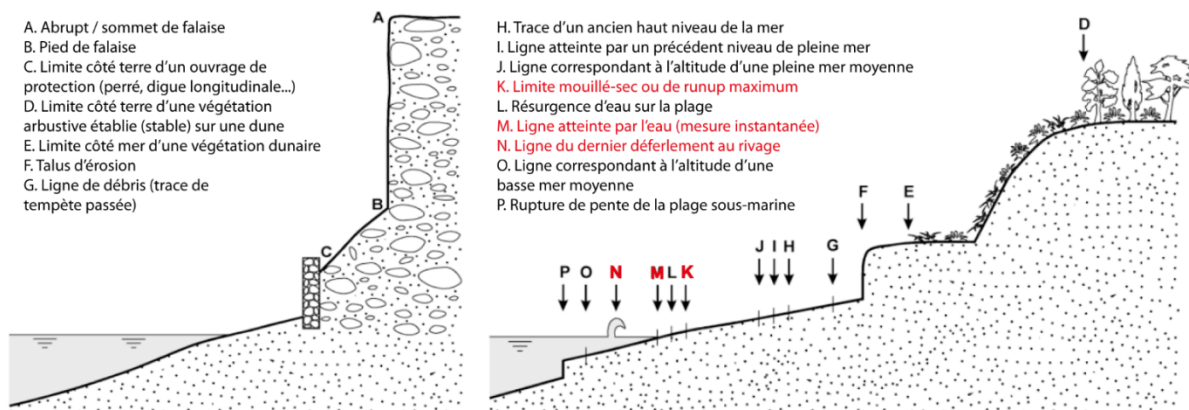


Figure 2 : Différents indicateurs du trait de côte (d’après Boak and Turner, 2005)

La Figure 2 montre un grand nombre des indicateurs du trait de côte régulièrement utilisés. Dans le cadre de cette étude, l’indicateur du trait de côte a été retenu en fonction de la technique utilisée (Figure 3). Sur le terrain, l’indicateur retenu est la ligne d’eau instantanée (point M sur la Figure 2). En photo-interprétation via les images satellites, c’est la limite entre sable mouillé et sable sec qui a été retenue (point K sur la Figure 2) car plus facilement identifiable sur l’ensemble des clichés. Enfin, l’extraction semi-automatique à partir des images satellites permet généralement de lever le déferlement au rivage (point N sur la

Figure 2). Cette différence d'indicateur (Figure 3) sera ultérieurement prise en compte lors de la comparaison des trois méthodes.



Figure 3 : Les trois indicateurs du trait de côte utilisés dans cette étude. En rouge le TdC digitalisé par photo-interprétation en suivant la limite sable sec-mouillé, en bleu le TdC levé sur le terrain en suivant la limite instantanée de l'eau et en jaune le TdC extrait de la donnée satellite par traitement semi-automatique et qui représente en générale le déferlement au rivage.

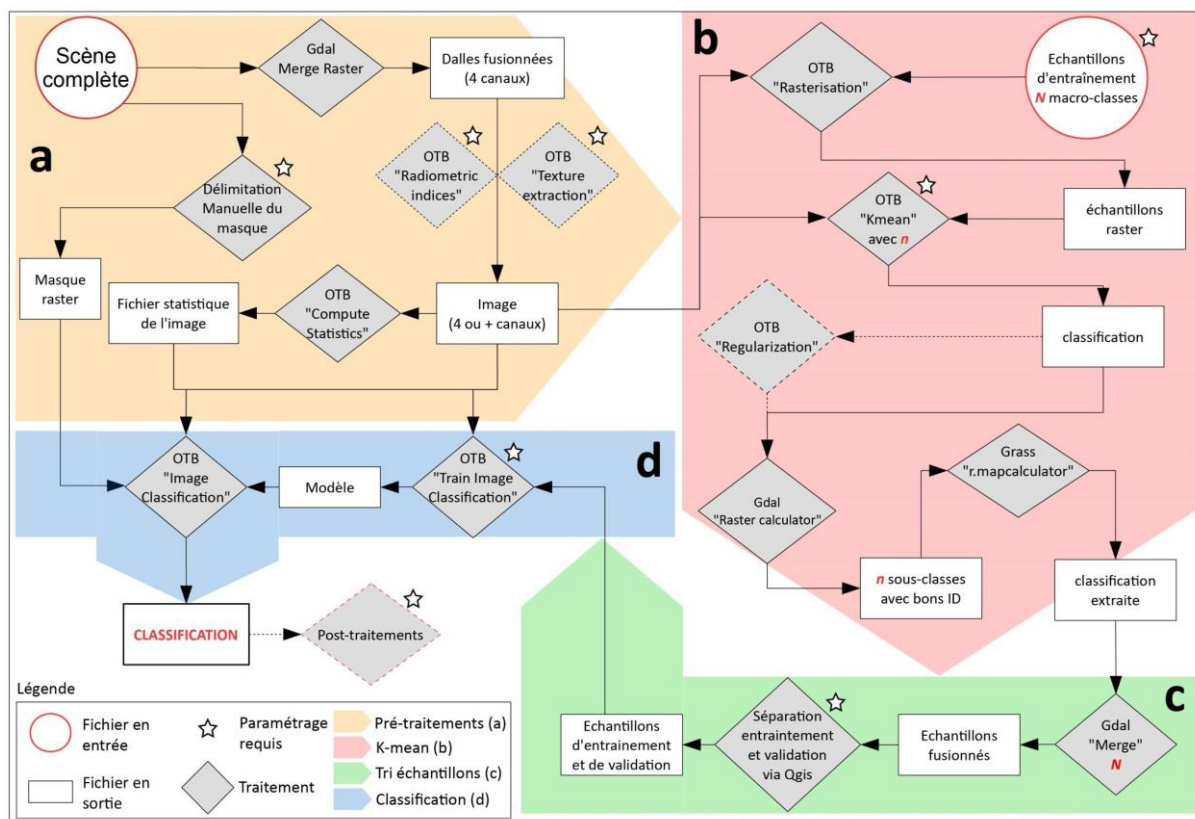


Figure 4 : Représentation schématique complète de la méthodologie de classification supervisée utilisée pour extraire le trait de côte dans cette étude (cf. rapport de phase 2 du projet).

3.2.2. Extraction semi-automatisée

La méthode d’extraction du trait de côte (EID) a été adaptée de celle utilisée pour caractériser la végétation dunaire. La chaîne de traitement (Figure 4) a été développée sous les logiciels OTB et Qgis. L’ensemble des procédures est détaillé dans la phase 2 de cette étude et dans le rapport de stage de Bourachot (2017).

3.2.3. Photo-interprétation

En parallèle de l’extraction semi-automatique du trait de côte, ce dernier a également été digitalisé à la main par un opérateur par photo-interprétation sous un logiciel de SIG (ArcGis©). L’indicateur suivi est la limite sable sec-mouillé (Figure 5). La marge d’erreur a été estimée à ± 4 pixels, soit ± 2 m.

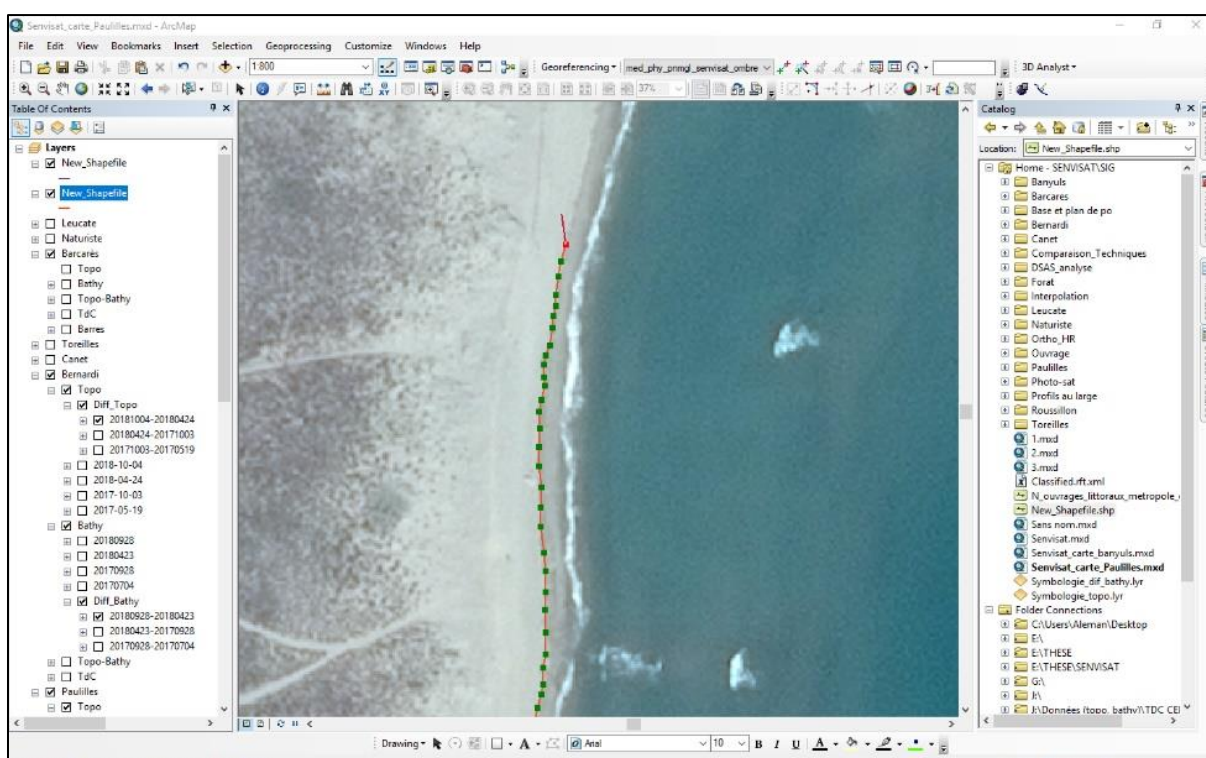


Figure 5 : Exemple de digitalisation du trait de côte par photo-interprétation sous le logiciel ArcGis©.

3.2.4. Levé de terrain

Les levés de terrain (CEFREM - LMUSCA pour la côte rocheuse et OBSCAT - BRGM pour les plages sableuses) ont été réalisés au DGPS RTK (Differential Global Positioning System, Real Time Kinematic) en suivant la ligne d’eau instantanée (Figure 6). Les levés ont été effectués, dans la mesure du possible, au même moment ou à une date proche des prises de vue

satellites. La précision horizontale de la donnée atteint $\pm 0,1$ m (précision DGPS de $\pm 0,02$ m et précision positionnement de la base et prise de mesure de $\pm 0,08$ m).



Figure 6 : Mise en place de la base DGPS et levé du trait de côte sur la plage de Banyuls.

3.3. Les levés de la position des barres d'avant-côte

3.3.1. A partir des données Pléiades

La position de la crête des barres sédimentaires d'avant-côte des plages sableuses (les barres sont absentes sur les plages de poche de la côte rocheuse) a été digitalisée par photo-interprétation sur les images satellites Pléiades grâce à la transparence de l'eau. La crête des barres étant relativement "aplatie", sa visibilité sur les orthophotographies correspond à une bande de couleur claire de 40 pixels en moyenne. La marge d'erreur de sa digitalisation par photo-interprétation peut être alors considérée comme ± 20 m avec des pixels de 50 cm sur les images Pléiades (Figure 7).

3.3.2. A partir de levés bathymétriques

Les MNT réalisés à partir des levés bathymétriques au sondeur mono-faisceau (cf. rapports annuels de l'ObsCat) permettent également de digitaliser la position de la crête des barres sédimentaires d'avant-côte. Cette dernière pourrait théoriquement être extraite par calcul (point haut sur le profil) mais cela demande le développement d'outils automatisés et la complexité morphologique de la barre interne rend le processus très complexe. La crête des barres a donc été digitalisée par interprétation des jeux de couleurs du MNT avec, pour les mêmes raisons que la photo-interprétation, une marge d'erreur de ± 20 m en moyenne (Figure 7).

3.4. Les levés topo-bathymétriques

3.4.1. Topographie

La topographie des plages de poche a été réalisée au DGPS RTK. La base DGPS a été positionnée sur le quai ouest du port pour les levés de la plage de Banyuls (Fig. 6) et au pied du phare du cap Béar pour les levés des plages de la baie de Paulilles.

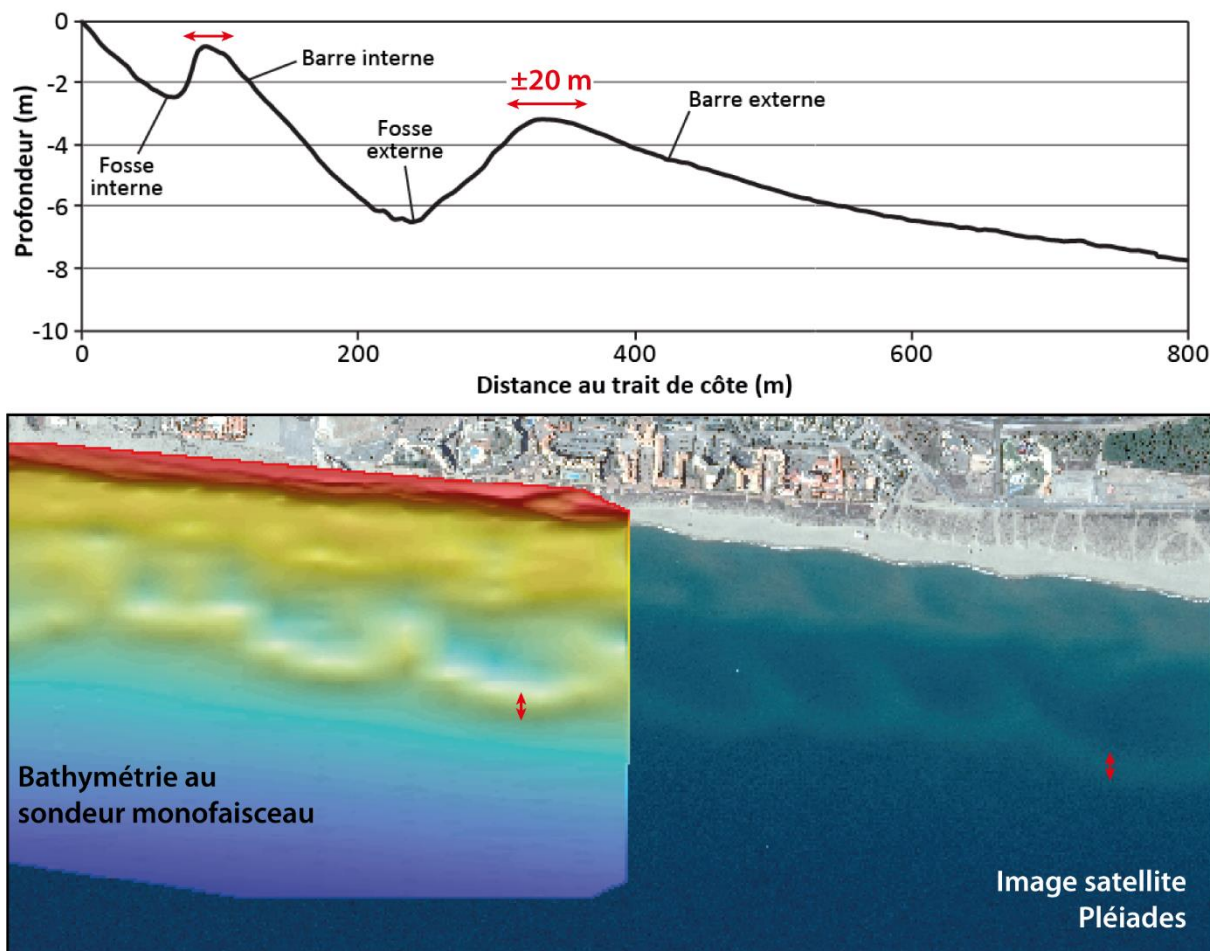


Figure 7 : Profil bathymétrique montrant les barres d'avant-côte et MNT bathymétrique réalisé avec un sondeur monofaisceau superposé à l'imagerie satellite Pléiades. Le repérage de la crête des barres ne peut se faire qu'avec une marge d'erreur de ± 20 m.

Un ensemble de 5 points de contrôle a été mis en place sur chaque site pour affiner au maximum la qualité de la donnée qui atteint une précision de ± 10 cm en xyz (cf. paragraphe 2.3.4). Les levés topographiques des plages sableuses ont également été réalisés à l'aide d'un DGPS RTK, comme décrit dans les rapports annuels de l'ObsCat.

3.4.2. Bathymétrie

Les levés bathymétriques des plages de poche ont été réalisés au sondeur monofaisceau couplé à un DGPS RTK et installé à bord du « Petit Grain » (embarcation LMUSCA). Les levés sont corrigés de la marée et post-traités sous le logiciel Hypack© pour atteindre une précision de ± 10 cm en xyz. Les levés bathymétriques des plages sableuses ont également été réalisés à l’aide d’un sondeur monofaisceau couplé à un DGPS RTK (se reporter aux rapports annuels de l’ObsCat pour plus de précision).

3.4. Organisation des missions

L’ensemble des secteurs a fait l’objet d’un levé de terrain (trait de côte, topographie et bathymétrie) à l’automne et au printemps 2017 et 2018 (Figure 8 et Tableau 1). Les clichés Pléiades couvrent le printemps et automne 2017 et uniquement l’automne en 2018. La comparaison des méthodologies de suivi du trait de côte et des barres sédimentaires d’avant-côte (paragraphe 4.1) est basée sur le printemps et automne 2017. L’analyse de l’évolution morpho-sédimentaire des plages de poche s’étend sur les quatre périodes.



Figure 8 : Plan de positionnement des levés topographiques et bathymétriques d’automne 2018 dans la baie de Paulilles.

SENVISAT – Phase 1 : Evaluation de méthodes d'analyse du trait de côte
et de l'avant côte via les données satellites PLEIADES

Tableau 1 : Dates des levés du trait de côte, topographiques et bathymétriques et des clichés Pléiades pour chaque secteur étudié (NU : Non Utilisé ; X : pas de données).

		2017		2018	
		Printemps	Automne	Printemps	Automne
TOPO - TDC	Leucate	04/04/2017	25/09/2017	NU	NU
	Naturiste	04/04/2017	25/09/2017	NU	NU
	Barcarès	07 et 10/04/2017	07 et 10/04/2017	NU	NU
	Toreilles	10/04/2017	27 et 29/09 2017	NU	NU
	Canet	11/04/2017	27, 28 et 29/09/2017	NU	NU
	Bernardi	19/05/2017	03/10/2017	24/04/2018	04/10/2018 (24/09/2018)
	Paulilles	19/05/2017	03/10/2017	24/04/2018	04/10/2018
	Forat	X	03/10/2017	24/04/2018	04/10/2018
	Banyuls	10/05/2017	04/10/2017	24/04/2018	05/10/2018
BATHY	Leucate	04/04/2017	25/09/2017	NU	NU
	Naturiste	04/04/2017	25/09/2017	NU	NU
	Barcarès	07 et 10/04/2017	07 et 10/04/2017	NU	NU
	Toreilles	29 et 30/03/2017 et 10 et 11/04/2017	27 et 29/09 2017	NU	NU
	Canet	1 et 12/04/2017 et 04/05/2017	27, 28 et 29/09/2017	NU	NU
	Bernardi	04/07/2017	28/09/2017	23/04/2018	28/09/2018
	Paulilles	X	28/09/2017	23/04/2018	28/09/2018
	Forat	X	28/09/2017	23/04/2018	28/09/2018
	Banyuls	04/07/2017	27/09/2017	23/04/2018	28/09/2018
PLEIADES	Leucate	29/04/2017	21/09/2017	X	25/09/2018
	Naturiste	29/04/2017	21/09/2017	X	25/09/2018
	Barcarès	29/04/2017	20 et 21/09/2017	X	25/09 et 23/10/2018
	Toreilles	29/04/2017	20/09/2017	X	23/10/2018
	Canet	29/04/2017	20/09/2017	X	23/10/2018
	Bernardi	07/05/2017	26/09/2017	X	23/10/2018
	Paulilles	07/05/2017	26/09/2017	X	23/10/2018
	Forat	07/05/2017	26/09/2017	X	23/10/2018
	Banyuls	07/05/2017	26/09/2017	X	23/10/2018

4. RESULTATS

4.1. Comparaison des méthodes de levé du trait de côte

Les suivis du trait de côte par extraction semi-automatique et par photo-interprétation via un opérateur ont été comparés entre elles et aux levés de terrain au DGPS RTK pour en déterminer leur qualité et la marge d'erreur associable à chacune des méthodes. La comparaison s'est faite sous ArcGIS© à l'aide de la boîte à outils DSAS (Digital Shoreline Analysis System) avec un pas de mesure de 2 m. 6746 points de comparaison ont été analysés pour le printemps 2017 et 7053 pour l'automne 2017 (pas d'analyse sur les plages de poche au printemps 2017 et sur l'ensemble des plages à l'automne 2018 car l'extraction semi-automatique n'a pas été réalisée).

Les Figure 9 et Figure 10 présentent les écarts entre les différentes méthodes de suivi du trait de côte au printemps et à l'automne 2017 respectivement. On remarque sur quasiment l'ensemble des courbes des plages sableuses une variation rythmique longitudinalement à la côte. Celle-ci s'explique par la présence de croissants de plage (en regard des barres sédimentaires d'avant-côte festonnées) qui s'exprime en raison des différents indicateurs de trait de côte retenus (Fig. 11A). Dans le même registre, les grands écarts observés au niveau des embouchures (Agly, Têt et Bourdigou) s'expliquent par les différentes définitions du trait de côte mais également par des variations morphologiques qui apparaissent à court terme dans ces zones très dynamiques (Fig. 11B).

Des écarts importants peuvent également apparaître au niveau des ouvrages de défense contre la mer qui modifient la position du trait de côte sur de très courte distance. Un écart important est par exemple visible sur le tombolo d'un brise lame au Barcarès (Fig. 11C) que l'on retrouve sur le graphique des écarts (Figure 9). Enfin, certains grands écarts sont générés par des zones de déferlement de grande étendue qui affectent la détection du trait de côte par la chaîne de traitement comme sur la plage de Banyuls en automne 2017 (Figure 10 et 11D).

En dehors de ces spécificités, les écarts observés résultent de la méthodologie employée et de sa marge d'erreur intrinsèque. Sur les plages sableuses, le trait de côte issue de l'extraction semi-automatique est plus proche du levé de terrain que de la photo-interprétation des images satellites (Figure 9 et Figure 10). En effet, l'extraction semi-automatique suit plus ou moins la zone de déferlement au rivage qui s'approche de la ligne d'eau instantanée levée sur le terrain (Fig. 12A). Sur les plages de poche, la quasi-absence

d'agitation du plan d'eau et donc de déferlement fait que l'extraction semi-automatique suit la limite sable sec-mouillée (Fig. 12B) utilisée également pour la photo-interprétation (Figure 10).

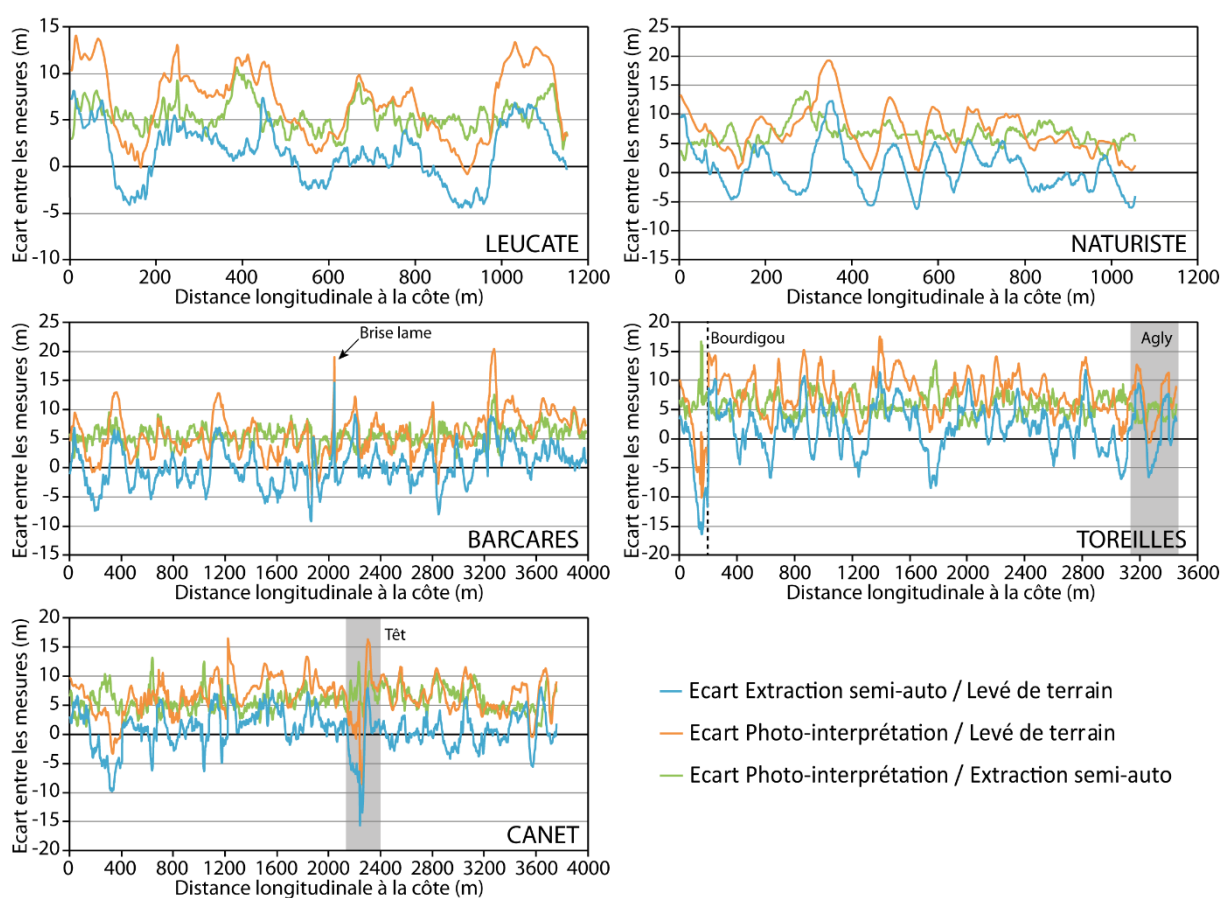


Figure 9 : Graphique de l'évolution des écarts entre les trois techniques de levé du TdC sur les plages sableuses de Leucate, du village naturiste, du Barcarès, de Toreilles et de Canet en printemps 2017.

SENVISAT – Phase 1 : Evaluation de méthodes d'analyse du trait de côte
et de l'avant côte via les données satellites PLEIADES

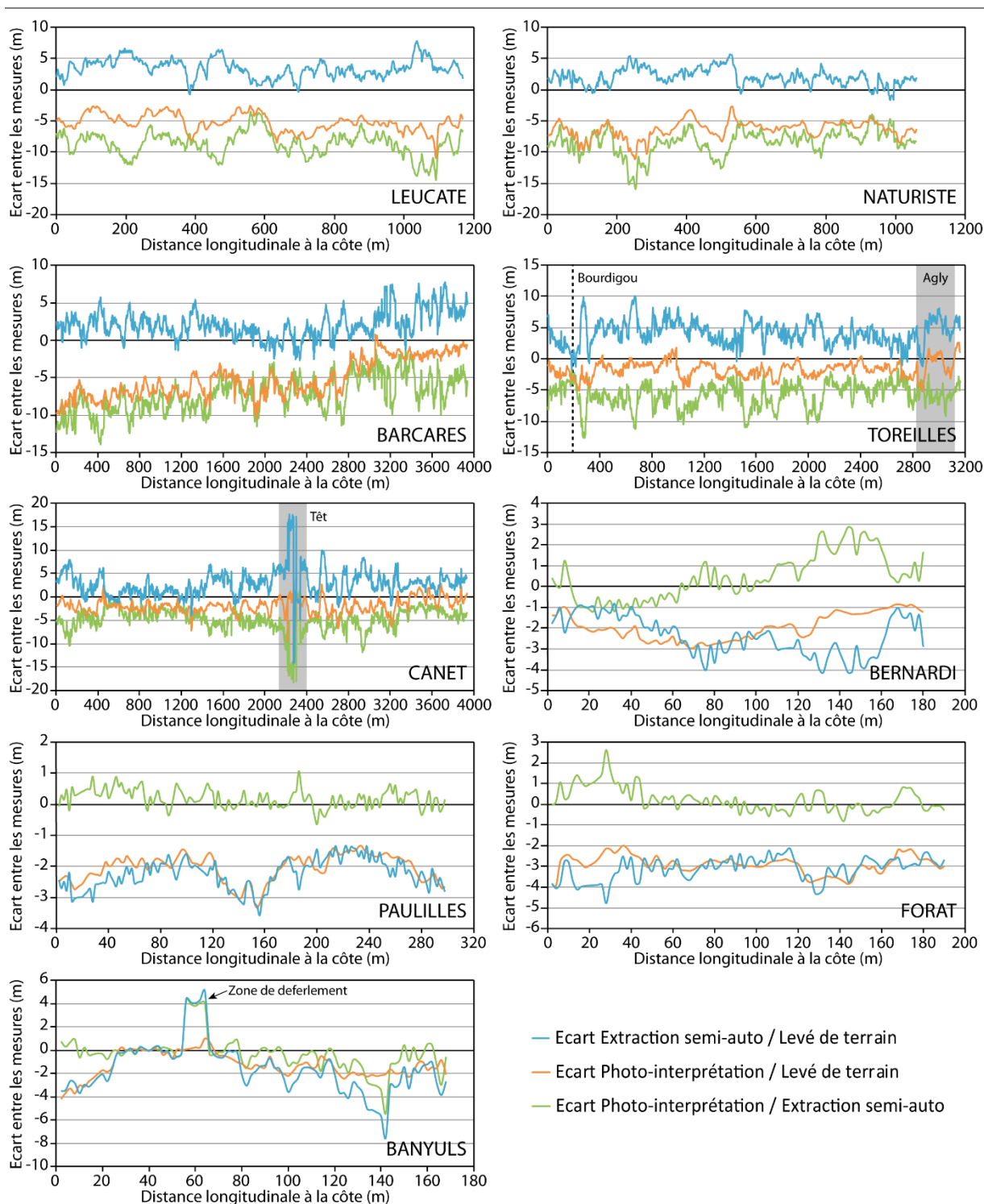


Figure 10 : Graphique de l'évolution des écarts entre les trois techniques de levé du TdC sur les plages sableuses de Leucate, du village naturiste, du Barcarès, de Toreilles, de Canet, de Bernardi, de Paulilles, du Forat et de Banyuls en automne 2017.

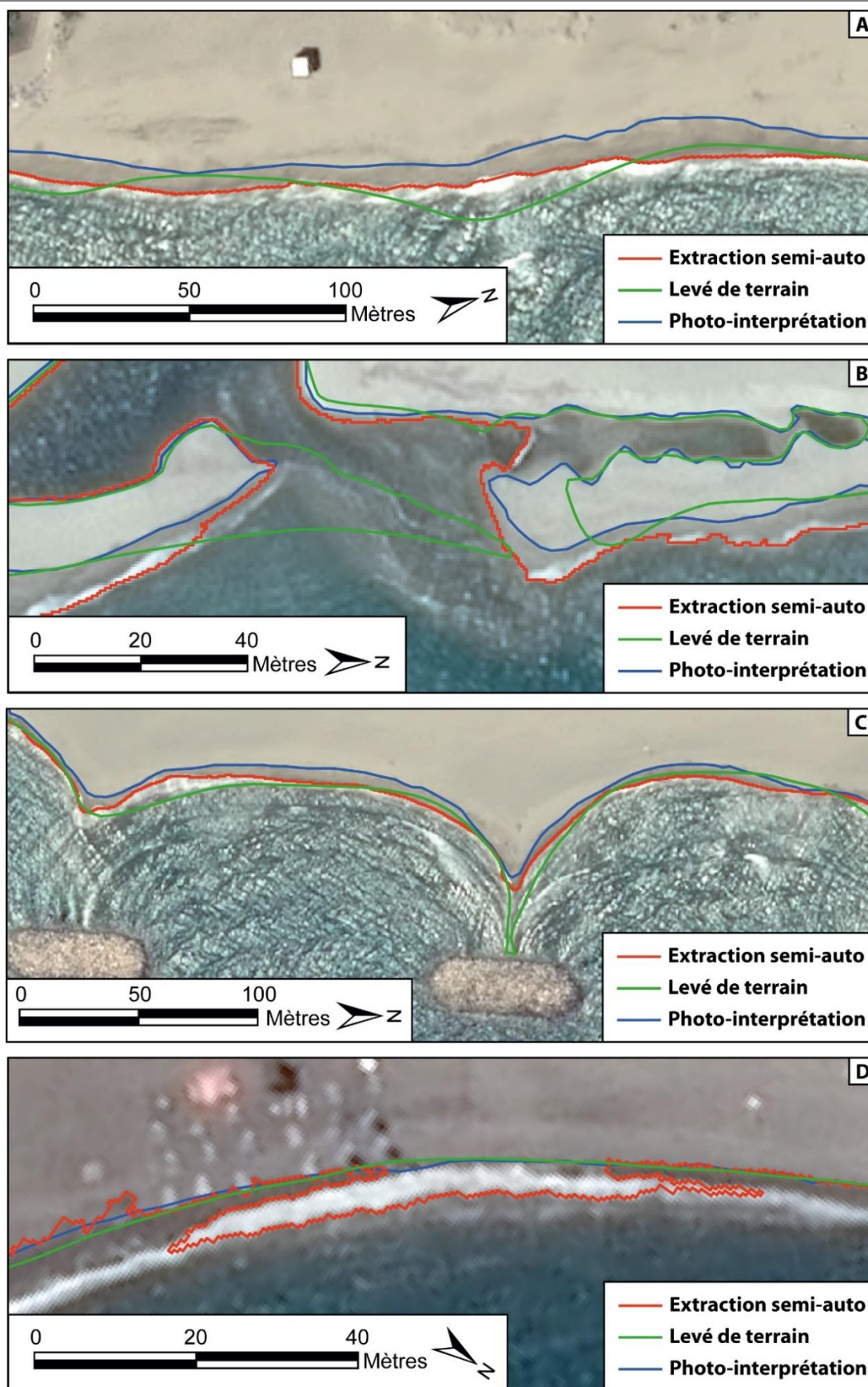


Figure 11 : Photos satellites Pléiades et différents levés du TdC montrant des différences liées à la morphodynamique du littoral ou à des biais méthodologiques. (A) Plage naturiste, (B) embouchure de la Têt, (C) Le Barcarès et (D) plage de Banyuls.

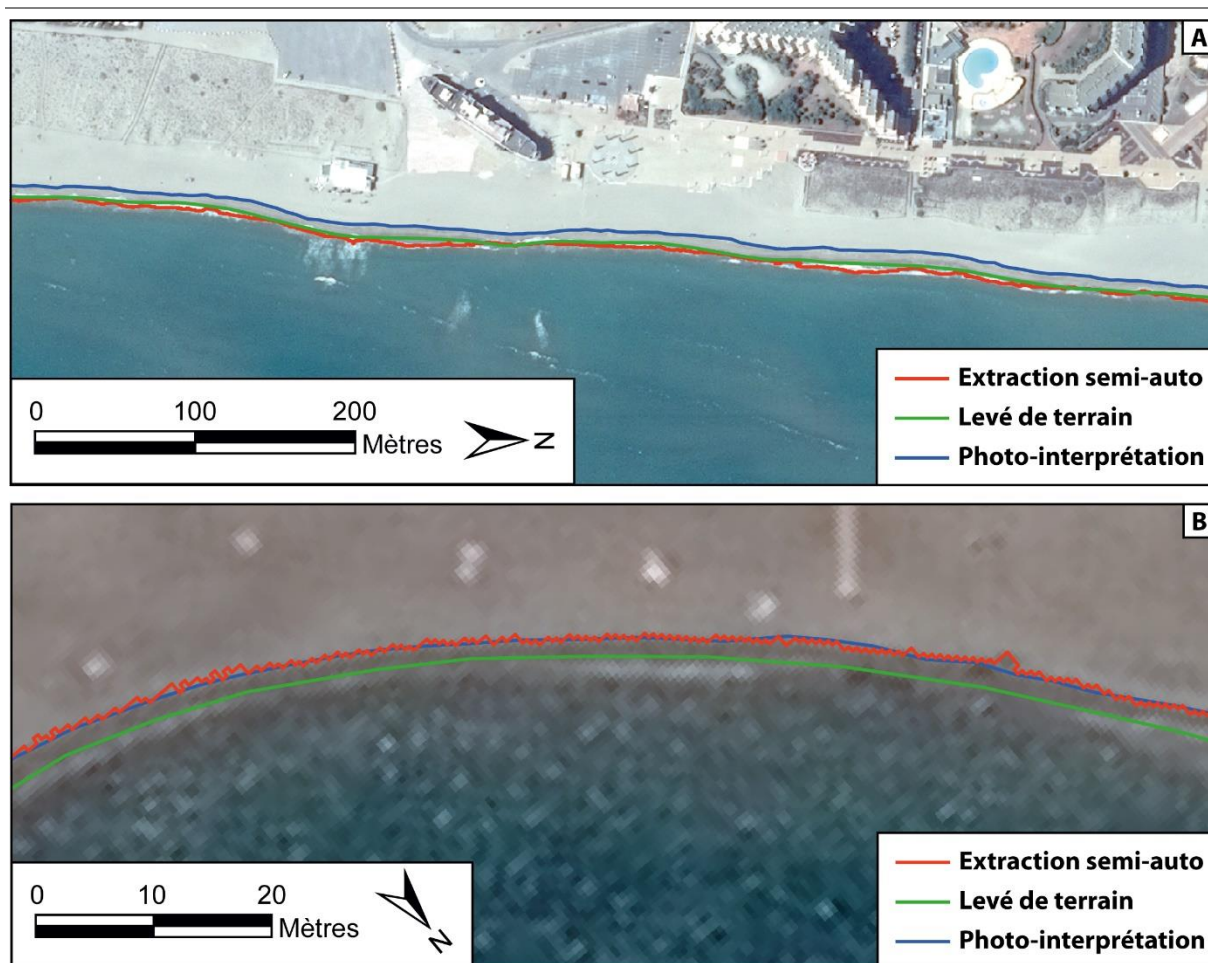


Figure 12 : Photos satellites Pléiades et différents levés du TdC montrant les différents indicateurs levés par l'extraction semi-automatique en fonction de la zone. La zone de déferlement sur les plages sableuses ouvertes et la limite sable sec-mouillé sur les plages de poche. (A) Le Barcarès et (B) plage de Paulilles.

Le

Tableau 2 présente les statistiques de l'ensemble des points de comparaison des deux périodes (printemps et automne 2017). Les zones très morphogène (zone d'embouchure) et celles où les biais ponctuels importants (ouvrage et déferlement étendu) ont été retirées pour ne pas fausser l'interprétation. Le trait de côte extrait par la chaîne de traitement est le plus proche du levé de terrain avec un écart moyen de 1,46 m et un écart type de 2,01 m. Le trait de côte digitalisé par photo-interprétation présente un écart moyen de 4,97 m au levé de terrain et 5,85 m au trait de côte extrait avec un écart type de 3,26 et 2,37 m respectivement. Les écarts maximums entre les différentes techniques atteignent plus de 10 m, et jusqu'à 19,1 m entre la photo-interprétation et les levés de terrain.

Tableau 2: Statistiques des écarts (m) entre les trois méthodes de suivis du trait de côte.

	Extraction / Levé de terrain	Photo-interprétation / Levé de terrain	Extraction / Photo-interprétation
Ecart absolu moyen	1,46	4,97	5,85
moyenne des écarts	2,91	5,04	5,88
mediane	2,54	4,82	5,74
ecart type	2,01	3,26	2,37
Int. Conf. (95%)	3,94	6,38	4,65
maximum	12,26	19,15	15,91
Minimum	-11,80	-4,49	-5,45
Etendue	24,06	23,63	21,36

Ces résultats mettent en avant une relative bonne correspondance entre le trait de côte issu de l’extraction semi-automatique et celui issu des levés de terrain (moyenne des écarts de 2,91 m malgré la différence d’indicateur). La détection du trait de côte semble être affectée par les conditions d’agitation de la mer (détection des zones de déferlement intense ou détection de la limite sable mouillé-sec dans le cas d’une mer calme). Même si les sites d’étude ont un marnage microtidale, l’amplitude de 40 cm en moyenne et une possible surcote peuvent faire varier la position du trait de côte de quelques dizaines de centimètres entre les différentes dates de levé. Malgré tout, intervalle de confiance à 95% est de seulement $\pm 3,94$ m. Si l’on retranche la valeur de l’écart moyen de 1,46 m qui correspond en grande partie à la différence d’indicateur entre les deux méthodes, **il est possible de définir la marge d’erreur du trait de côte extrait semi-automatiquement comme étant $\pm 2,5$ m** (hors biais d’indicateur et de conditions d’agitation). Cette marge d’erreur est du même ordre de grandeur que celles déjà proposées dans la littérature (CEREMA, 2018b)

En comparaison aux autres techniques utilisées, l’extraction semi-automatique du trait de côte offre surtout une rapidité d’exécution une fois les chaines de traitement mises au point (Tableau 3). Toutefois, la marge d’erreur (ligne étendue du tableau) est la plus importante des techniques utilisées dans cette étude et son utilisation demande certaines connaissances notamment en traitement de l’image. Cette marge d’erreur est malgré tout suffisante pour identifier la dynamique du trait de côte à l’échelle annuelle. Les développements actuels en termes d’analyse d’images comme le *deep learning* (e.g. Larsson and Silfversten, 2018) et l’automatisation complète des chaines de traitement devraient dans un futur proche améliorer sensiblement la résolution des données extraites et la vitesse d’exécution.

Tableau 3 : résumé des spécificités des trois méthodes de suivi du trait de côte analysées dans cette étude.

	Levé de terrain	Photo-interprétation	Extraction semi-automatique
Frequence de suivi	Journalière	Annuelle	Annuelle
Précision	±0,1 m	±2,0 m	±2,5 m
Coût	Fort (à l'achat)	Faible à moyen (achat images satelittes)	Faible à moyen (achat images satelittes)
Nombre d'opérateur	2 à 3	1	1
Temps de mise en œuvre (échelle du GdL)	Semaines	Jours	Journée
Difficulté	Spécialiste	Moyenne	Spécialiste

4.2. Amélioration apportées à la détection semi-automatique du trait de côte (nouvelle méthode simplifiée)

A partir des résultats issus de la mise en œuvre de cette première méthode développée durant le stage de Bourachot (2017), un travail d'approfondissement a été mené en 2019 avec la volonté de rendre la détection automatique plus opérationnelle et d'améliorer la précision des résultats du trait de côte détecté.

Quatre pistes d'améliorations ont été identifiées :

- **Simplifier la méthode.** La classification étant un processus assez complexe à mettre en œuvre surtout pour quelqu'un n'ayant pas de connaissances poussées en traitement d'image, il est nécessaire de simplifier la méthode afin de gagner en rapidité humaine et machine en évitant au maximum les étapes intermédiaires manuelles sur SIG ainsi que les traitements sur OTB.
- **Produire des résultats plus homogènes.** L'approche par classification nécessite également de multiples paramétrages à adapter en fonction de l'image. Les résultats sont donc très dépendants de l'image et de l'opérateur qui choisit ces paramètres.
- **Améliorer la précision des résultats.** Eviter les erreurs d'interprétation de l'algorithme notamment avec des confusions fréquentes lié au jet-de-rive, et des ombres portées des falaises pour la côte rocheuse.
- **Rendre la méthode plus adaptative grâce à un paramétrage simple.** Chacun n'ayant pas la même définition du trait de côte, il est nécessaire que la détection soit plus facilement contrôlable, afin de faire correspondre le trait de côte détecté au plus près du résultat attendu.

Cette nouvelle méthode se base sur la très grande différence qu'il existe entre les signatures spectrales de l'eau et des autres éléments de l'image. En effet, la réflectance de l'eau dans le Proche Infra-Rouge (IR) ou le Moyen Infra-Rouge (MIR) comparée aux autres signatures spectrales tel que le sol et la végétation est très faible (Figure 13). Ceci permettrait uniquement via des calculs sur l'image de séparer l'eau de la partie terrestre grâce aux indices radiométriques évitant ainsi la complexité de l'utilisation d'un algorithme de classification.

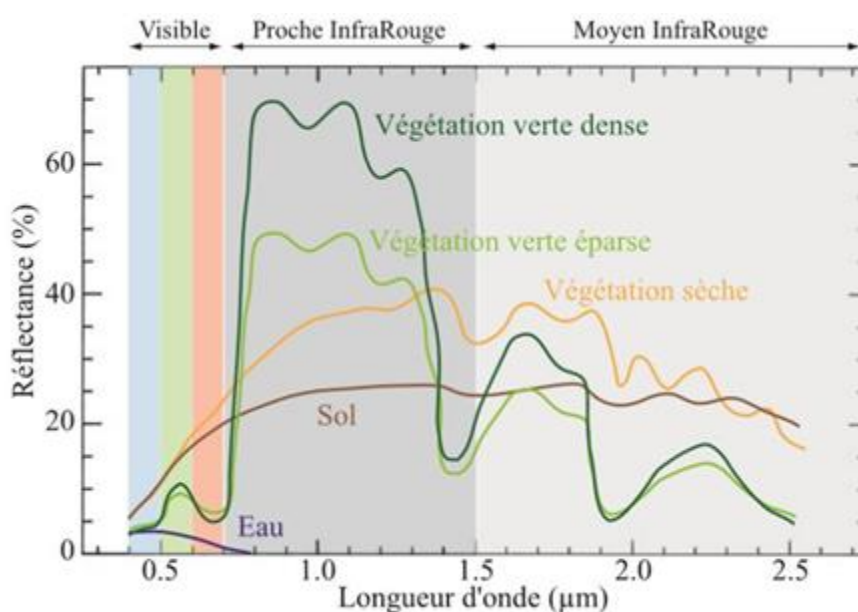


Figure 13 : Signatures spectrales des principaux éléments d'une plage

Premièrement, on calcule un indice qui va permettre d'obtenir un rapport entre 2 bandes spectrales. Ensuite, on détermine un seuil de manière empirique en regardant en moyenne à quelle valeur de l'indice va correspondre la limite au-delà de laquelle on considère de manière binaire si on a affaire à de l'eau ou un élément de la partie terrestre (sol, végétation, bâti, etc...) (Voir notice en Annexe 1, séparée de ce document, sur l'extraction du trait de côte) Plusieurs indices pertinents dans la détection de l'eau ont été identifiés (Rachdi et al, 2011).

Tableau 4 : différents indices utilisés en télédétection pour détecter l'eau et la limite mouillée et sèche

NDVI (Indice normalisée de différenciation de végétation)	$(PIR - R) / (PIR + R)$	Tucker, 1979 et Townshend, 1986
NDWI2 (Indice normalisée de	$(V - PIR) / (V + PIR)$	McFeeters, 1996

SENVISAT – Phase 1 : Evaluation de méthodes d'analyse du trait de côte
et de l'avant côte via les données satellites PLEIADES

différenciation de l'eau 2)		
NDWI (Indice normalisée de différenciation de l'eau)	$(PIR - MIR) / (PIR + MIR)$	Gao, 1996 et Hardisky et al, 1983
MNDWI (Indice modifiée normalisée de différenciation de l'eau)	$(V - MIR) / (V + MIR)$	Xu, 2006
NDPI (Indice normalisé d'humidité)	$(MIR - V) / (MIR + V)$	Clandillon et al, 1995 et Lacaux et al, 2007

La bande MIR étant absente sur Pléiades, et plus généralement des satellites très haute résolution spatiale, nous ne pourrons effectuer les calculs d'indices se basant sur l'IR uniquement pour le NDVI et le NDWI2. La réflectance de l'eau dans la bande MIR étant encore plus faible que dans l'IR, ceci permettrait théoriquement une meilleure différenciation de l'eau avec les autres éléments de l'image. Ces indices pourraient être testés à l'avenir si de nouveaux satellites très haute résolution spatiale comprennent cette longueur d'onde.

Le seuil a été déterminé de manière empirique par lecture des valeurs de pixels de l'image issue du calcul d'indice (plug-in *Value Tool* sur Qgis) pour le NDVI (-1 à 1). Une valeur de -0,1 est le meilleur compromis qui ait été trouvé. Ainsi, ce qui sera inférieur à -0,1 sera de l'eau. Pour le NDWI2 (-1 à 1), nous avons choisi une valeur de 0 qui correspond à la limite théorique pour lequel l'indice est calibré. Ici, ce qui sera inférieur à 0 sera de l'eau.

Résultats obtenus avec la nouvelle méthode simplifiée basée sur le NDVI / NDWI

A première vue, l'identification de trait de côte sur les zones sableuses fonctionne que ce soit avec le NDVI ou le NDWI2. On remarque toutefois une confusion élevée de l'eau avec les nuages et leurs ombres avec le NDWI2. En revanche, le NDVI apporte beaucoup moins de confusions et permet d'obtenir un trait de cote réaliste malgré la présence de nuages (Figure 14). Attention, cette bonne identification ne fonctionne qu'avec des nuages relativement peu denses. Dans le cas d'un nuage très épais, la signature spectrale des éléments sous-jacents ne pourrait pas être visible par transparence comme c'est le cas ici.



Figure 14 : comparaison des résultats des 2 nouvelles méthodes de détection automatique par seuillage des indices de NDVI et NDWI2

Le NDVI s'avérant plus performant que le NDWI2, l'évaluation de la méthode du seuillage d'indice comparé à la classification a été réalisé uniquement avec cet indice.

Comparatif entre seuillage d'indices et classification (ancienne et nouvelle méthode)

La comparaison du trait de côte obtenue par classification avec celui obtenu par la méthode des seuillages d'indice montre que les deux méthodes produisent des résultats plutôt proches. Néanmoins, la méthode du seuillage du NDVI est beaucoup moins sensible au jet de rive sur la côte sableuse (Figure 15).

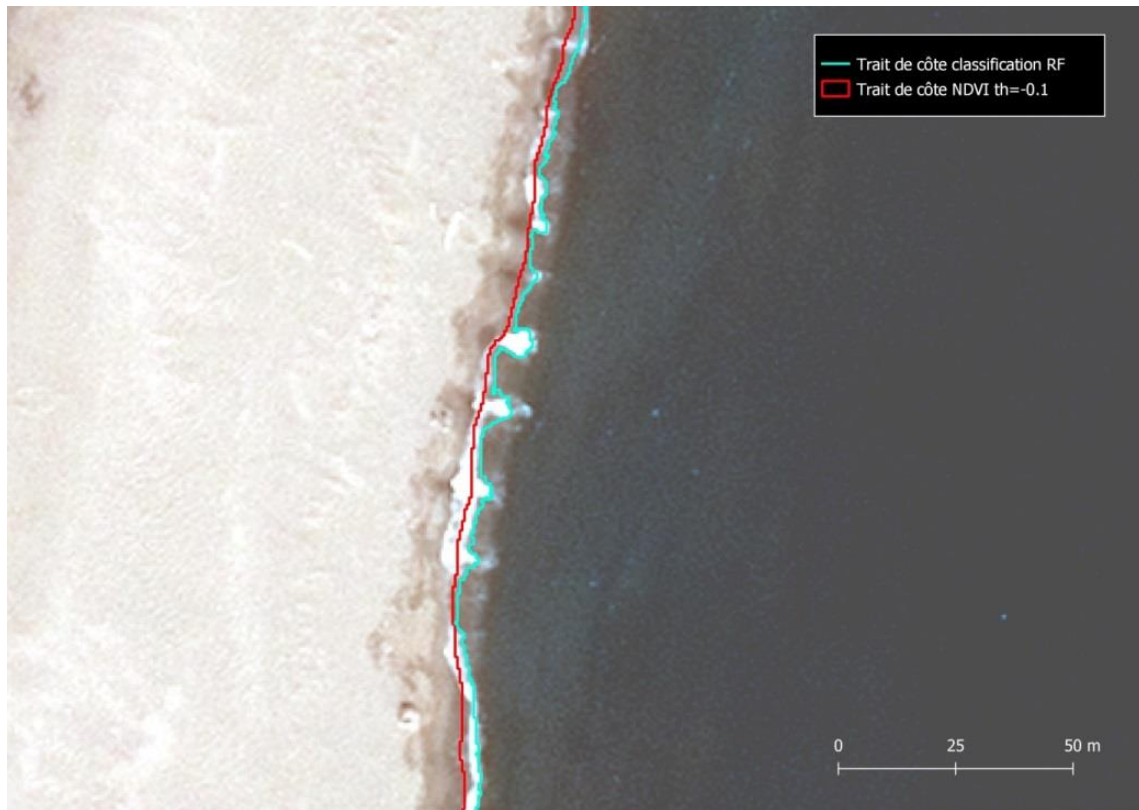


Figure 15 : Comparaison du seuillage de NDVI (nouvelle méthode choisie) et de la classification (ancienne méthode) sur une zone avec un fort jet de rive

Sur la côte rocheuse, nous avons voulu tester la méthode sur des portions de littoral composées exclusivement de rochers au contact de l’eau. Dans ce cas, on remarque une identification très aléatoire du trait de côte avec les 2 méthodes. Dans le cas de falaises élevées, comme par exemple à Leucate (Figure 16), le trait de côte présente une erreur très importante. Cette erreur est liée à l’ombre portée des falaises, qui entraîne une forte confusion entre l’ombre et l’eau en raison de la proximité de leurs signatures spectrales (réflectance très faibles dans quasiment toutes les longueurs d’ondes). Cet effet est impossible à éviter sur cette zone géographique car l’apparition des ombres et leur orientation est liée à l’heure de passage du satellite. Les satellites de Pléiades étant placés sur une orbite héliosynchrone, ils passeront toujours à la même heure solaire et l’apparition de ces ombres est inévitable.

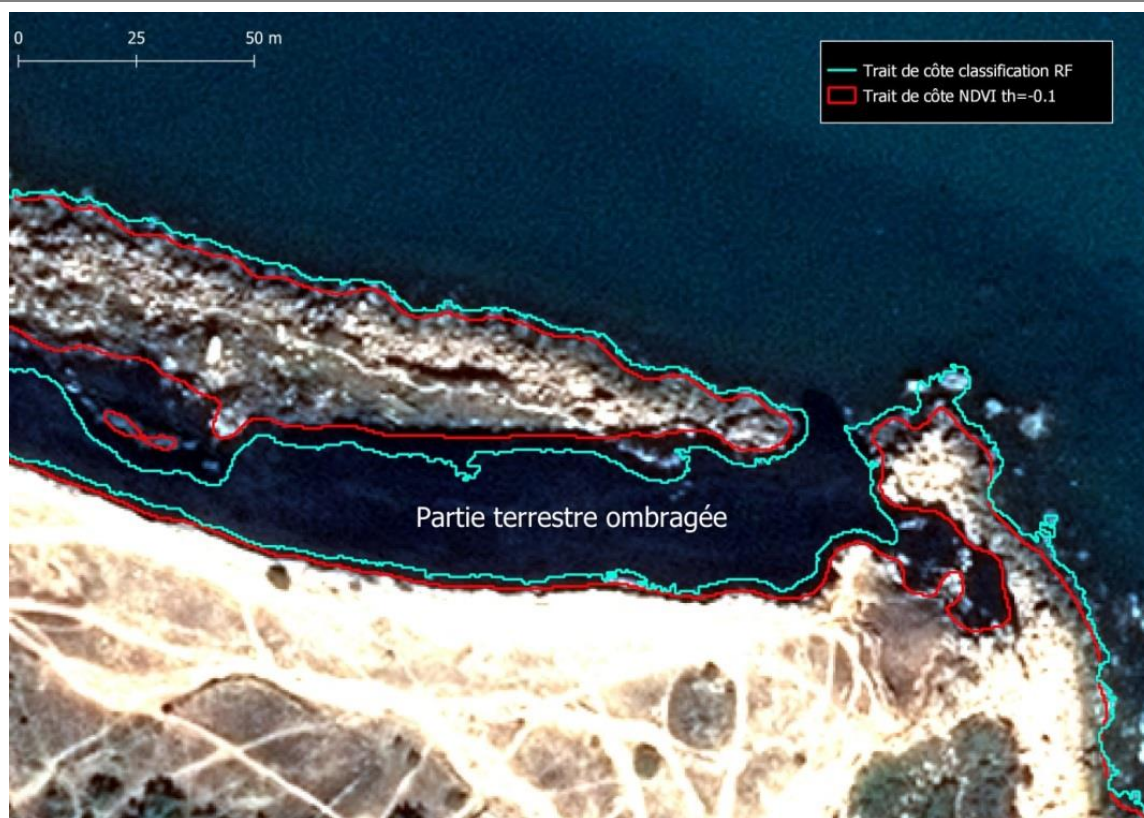


Figure 16 : Comparaison du seuillage de NDVI et de la classification sur une zone rocheuse où interfèrent les ombres portées du relief (partie nord de la falaise de Leucate).

Nous avons donc dans cette partie déterminé quel est le meilleur indice à partir duquel effectuer un seuillage. **Il s'avère que le NDVI est l'indice qui semble donner les meilleurs résultats.** Ensuite la comparaison de la méthode de seuillage retenue a été comparée à la méthode de détection par classification. Il en ressort que la méthode de seuillage fournit des résultats bien plus juste car elle est moins sensible aux panaches blancs créés par le jet de rives.

En plus de fournir des résultats plus précis cette méthode à l'avantage d'être bien plus facilement paramétrable et ajustable, car il n'y a qu'un seul paramètre, le seuil, facilement déterminable grâce à une simple lecture de l'image. Comme il s'agit d'un seuillage, on peut faire varier ce paramètre afin d'ajuster la position trait de côte et ceci sans être obligé de refaire l'étape du calcul d'indice.

On remarque que quelque que soit la méthode automatique utilisée, il existera toujours des erreurs de détection automatique principalement liées aux nuages épais et aux ombres. Ces erreurs doivent être corrigées par photo-interprétation dans un logiciel de SIG pour obtenir un résultat exploitable. De plus à partir des données calculées au format raster, il est toujours nécessaire de transformer la donnée au format vecteur ce qui rajoute quelques étapes SIG supplémentaires (voir notice). Comparé au temps qu'il faudrait pour obtenir un trait de côte complet par photo-interprétation, la méthode de détection par classification, longue et complexe à mettre en place, apporte toutefois un gain de temps par rapport à la photo-interprétation (Tableau 3) mais nécessite un opérateur qualifié. En revanche, le

seuillage d'indice comprend seulement 2 étapes de traitements raster et ne nécessite pas de créer de bases d'entraînement et de validation. Ainsi, cette méthode apparaît comme plus pertinente en termes de simplicité de mise en œuvre ainsi qu'en termes de qualité des résultats obtenus.

4.3. Comparaison des méthodes de levé de la position des barres d'avant-côte

La position des barres d'avant-côte a été estimée à partir d'une photo-interprétation des images Pléiades grâce à la transparence de l'eau et par interprétation des MNT bathymétriques (Figure 17) interpolés sur la base de profils bathymétriques transversaux à la côte. Les positions digitalisées sous le logiciel ArcGIS© ont été comparées l'une à l'autre (Figure 20 à Figure 24) pour évaluer les différences entre les deux méthodes. La boîte à outils DSAS a permis de calculer l'écart entre les deux méthodes selon un pas de 5 m longitudinalement à la côte. L'ensemble des statistiques des écarts entre les deux méthodes est présenté dans le Tableau 5.

L'écart moyen total atteint 18,17 m entre les deux méthodes avec une médiane de 11,06 m et un écart type de 23,24 m (Tableau 5). Les écarts maximum et minimum dépassent les 120 m, soit bien plus que la marge d'erreur associée à chacune des méthodes (± 40 m). Toutefois, ces écarts importants semblent être spécifiques aux cornes des barres (Figure 20 à Figure 24). En effet, les MNT bathymétriques ne parviennent pas à représenter avec précision cette zone de faible profondeur d'eau qui se convertit en un vaste plateau sableux (Figure 17). Ce manque de précision a pour origine l'espacement des profils bathymétriques trop grand (100 m ; Figure 19) pour pouvoir représenter avec fidélité ces changements morphologiques qui se produisent sur de courtes distances longitudinales.

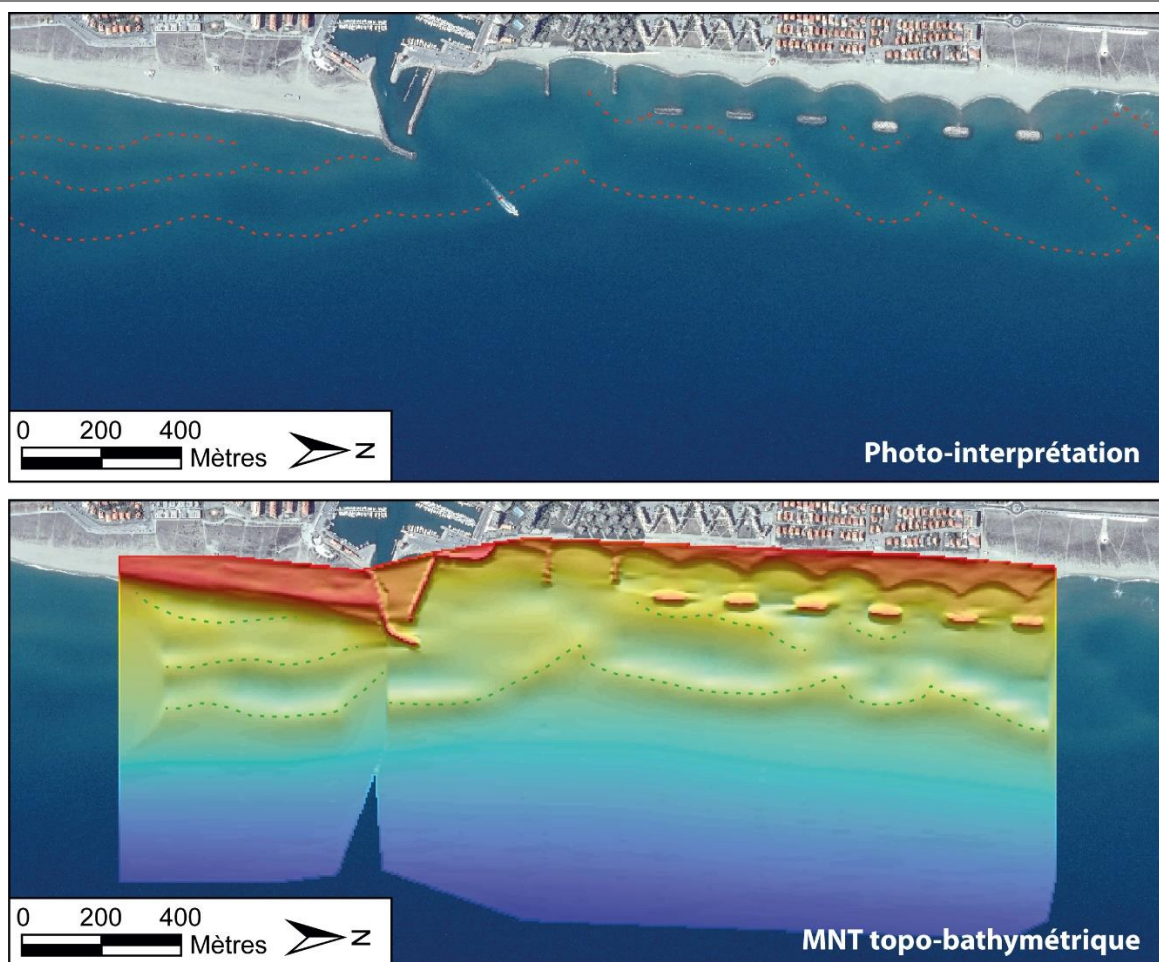


Figure 17 : En haut, digitalisation du système de barres sédimentaires d’avant-côte par photo-interprétation d’une image Pléiades ; En bas, digitalisation du système de barres sédimentaires d’avant-côte à partir d’un modèle numérique de terrain topo-bathymétrique

La photo-interprétation permet une analyse plus fidèle de la morphologie des systèmes de barres sédimentaires d’avant-côte malgré une marge d’erreur estimée à ± 20 m. Seule la barre externe peut parfois être difficilement détectable en fonction de sa profondeur (Figure 20). La barre interne est très bien identifiable, notamment les barres très proches du rivage qui peuvent présenter des morphologies emboîtées assez complexes (Aleman et al., 2015). Le MNT permet une restitution partielle des morphologies fines mais possède bien évidemment l’avantage de données bathymétriques qui permettent, entre autre, d’analyser les volumes sédimentaires déplacés.

Tableau 5 : Statistiques des écarts entre les deux méthodes de suivis de la position des barres sédimentaires d'avant-côte (photo-interprétation et digitalisation à partie de MNT).

	Barre interne		Barre externe		Total
	Printemps	Automne	Printemps	Automne	
Ecart absolu moyen	0,34	7,76	-0,19	-1,37	1,30
moyenne des écarts	26,17	21,77	12,91	14,27	18,17
mediane	14,46	13,62	9,48	10,03	11,06
ecart type	32,56	25,89	15,15	15,07	23,24
Int. Conf. (95%)	63,82	50,75	29,70	29,54	45,55
maximum	162	154	117	131	162
Minimum	-161	-121	-122	-73	-161
Etendue	323	275	239	203	323

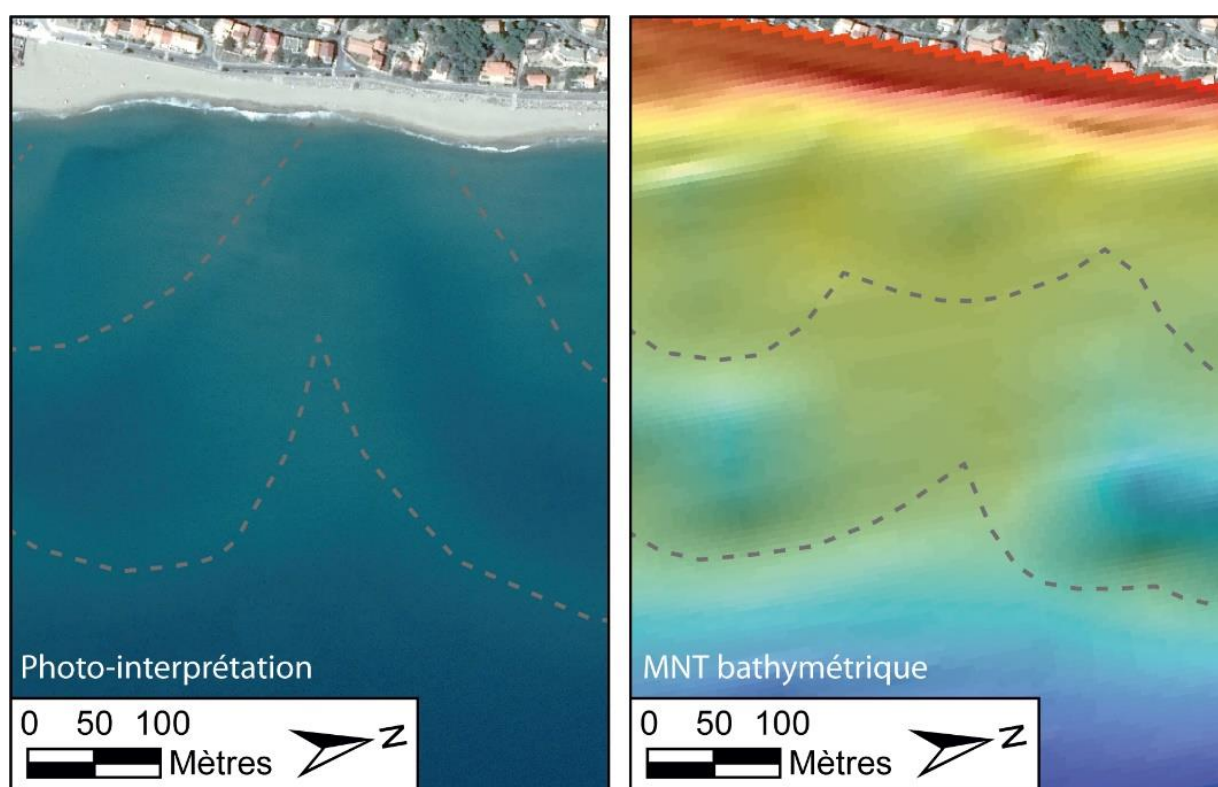


Figure 18 : Comparaison de la position de la corne d'une barre d'avant-côte devant Leucate par photo-interprétation et sur MNT topo-bathymétrique. La corne de la barre externe forme un plateau sableux connecté à la barre interne sur le MNT en raison de l'interpolation des profils espacés de 100 m.

SENVISAT – Phase 1 : Evaluation de méthodes d’analyse du trait de côte
et de l’avant côte via les données satellites PLEIADES

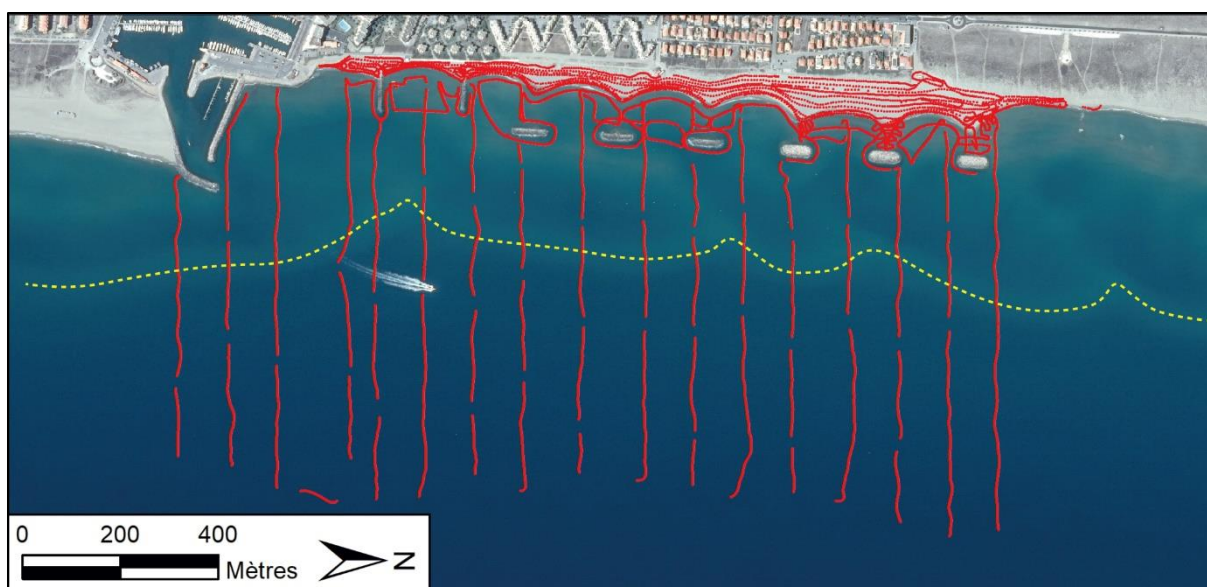


Figure 19 : Plan de position des mesures bathymétriques et topographiques au Barcarès réalisé par le BRGM dans le cadre de l’ObsCat et utilisés pour la réalisation des MNT (en pointillé jaune, la position de la crête de la barre externe).

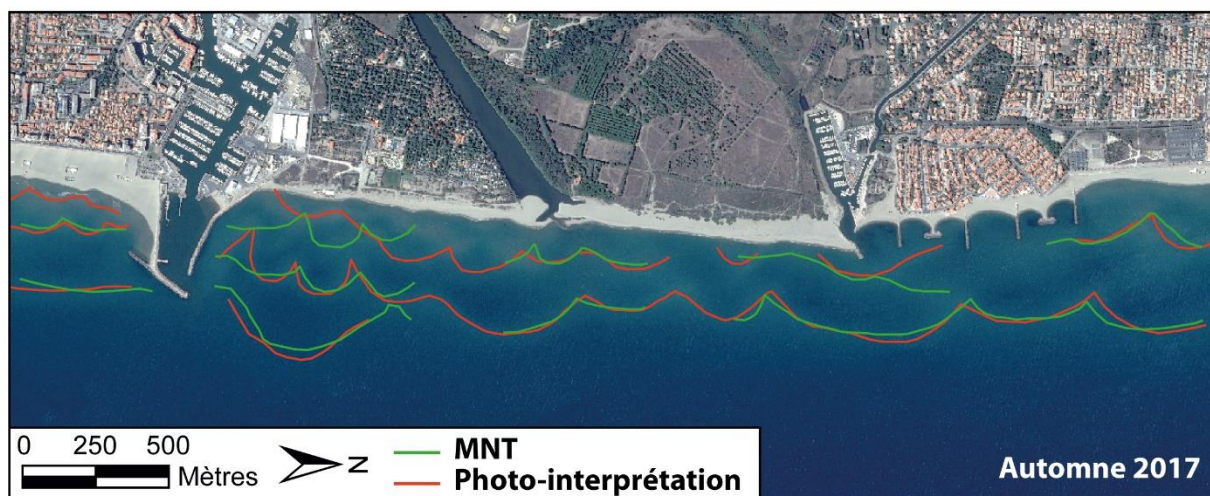
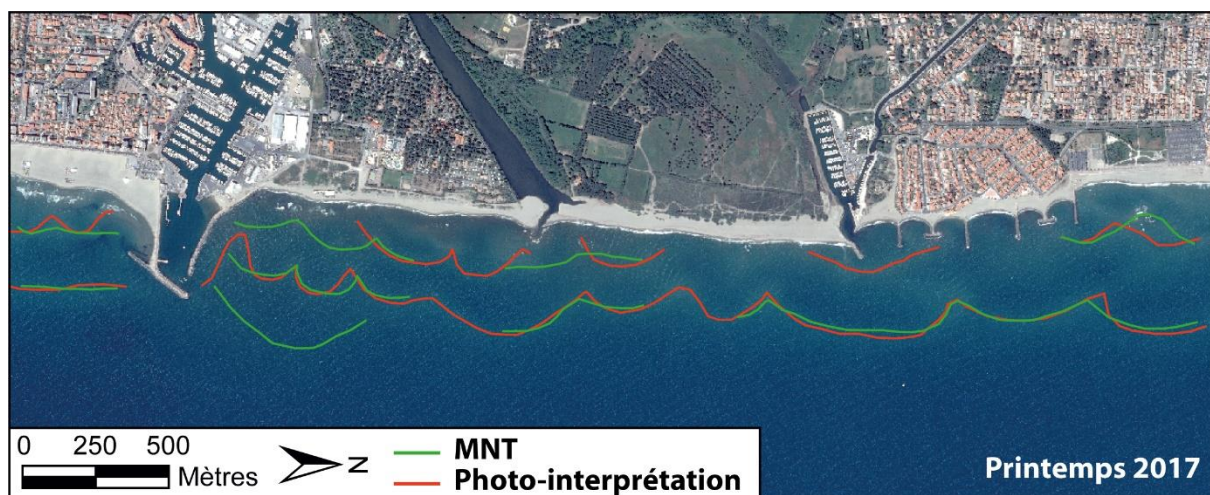


Figure 20 : Comparaison de la position des barres sédimentaires d’avant-côte de la zone de Canet digitalisée par photo-interprétation d’image pléiades et sur MNT topo-bathymétrique pour le printemps et l’automne 2017.

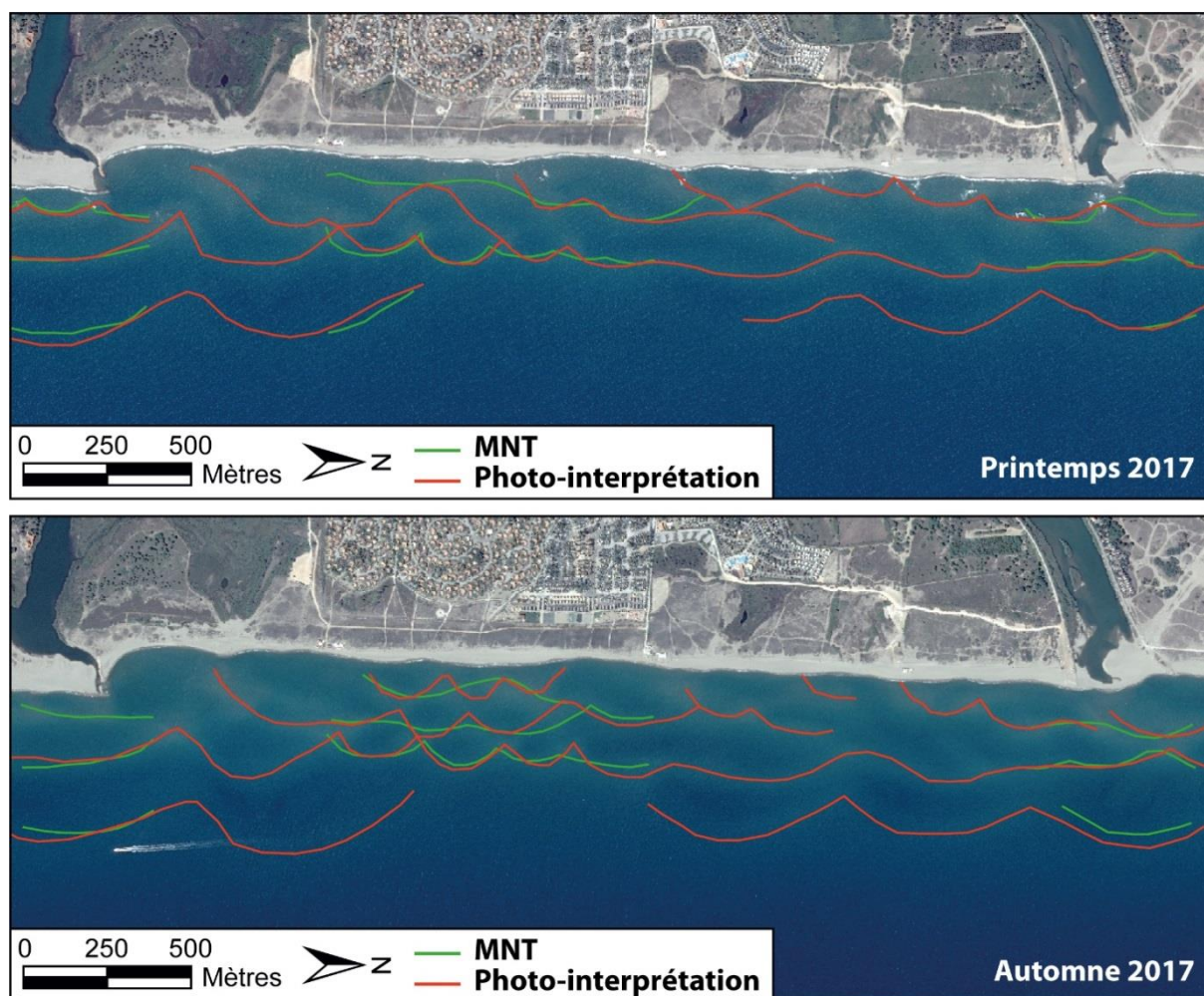


Figure 21 : Comparaison de la position des barres sédimentaires d'avant-côte de la zone de Torrelles digitalisée par photo-interprétation d'image pléiades et sur MNT topo-bathymétrique pour le printemps et l'automne 2017.

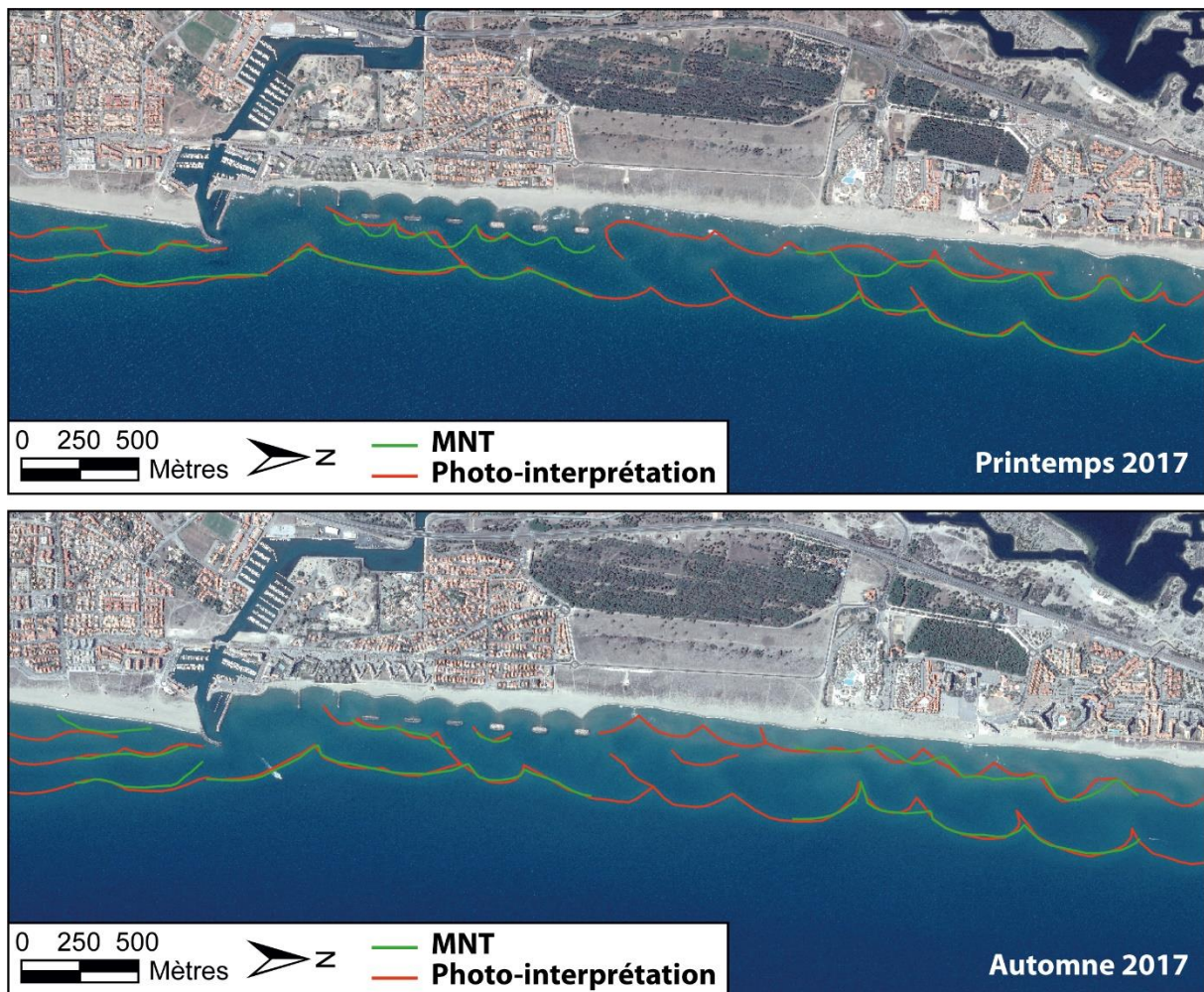


Figure 22 / Comparaison de la position des barres sédimentaires d'avant-côte de la zone du Barcarès digitalisée par photo-interprétation d'image pléiades et sur MNT topo-bathymétrique pour le printemps et l'automne 2017.

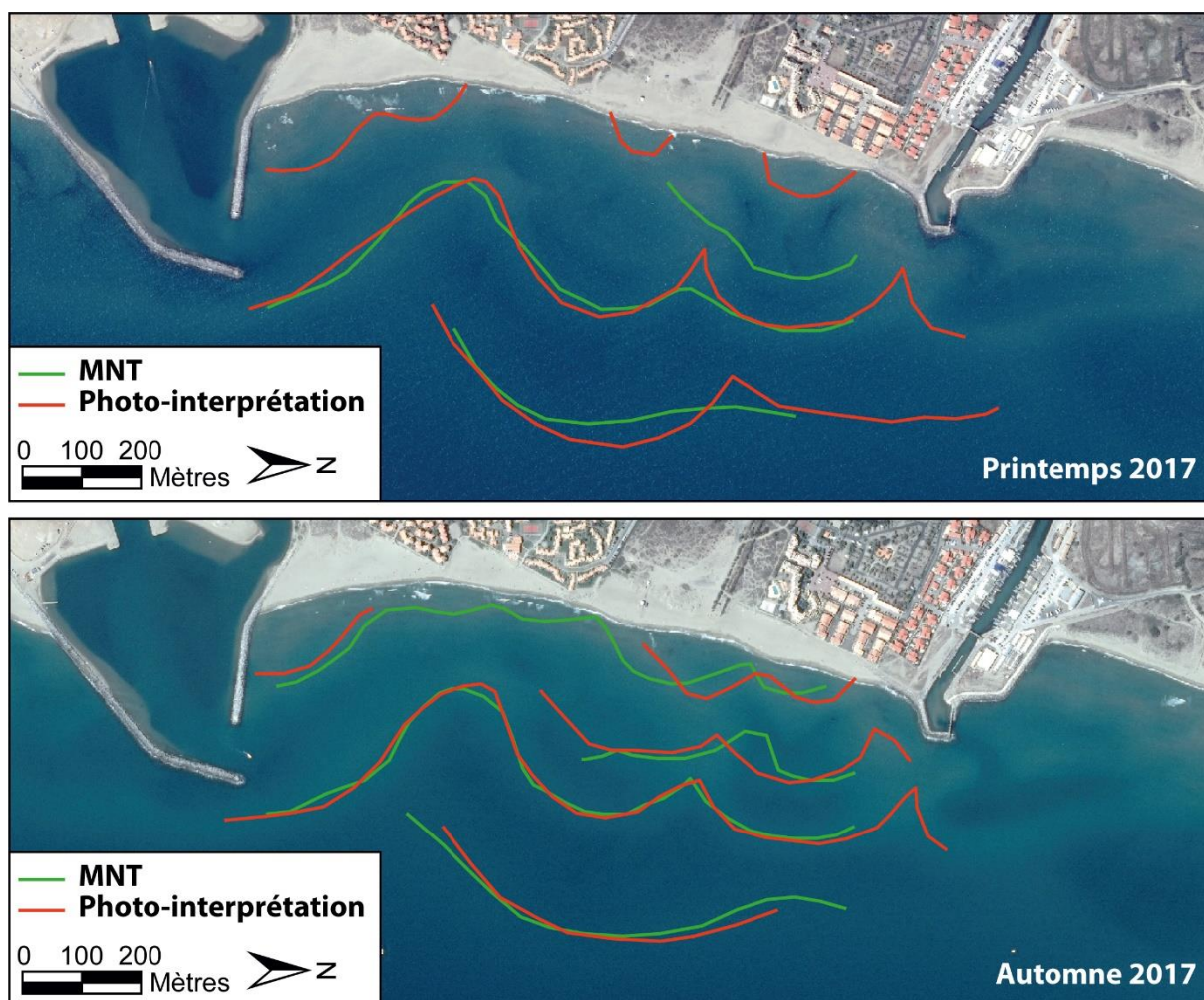


Figure 23 : Comparaison de la position des barres sédimentaires d'avant-côte de la zone Naturiste digitalisée par photo-interprétation d'image pléiades et sur MNT topo-bathymétrique pour le printemps et l'automne 2017.

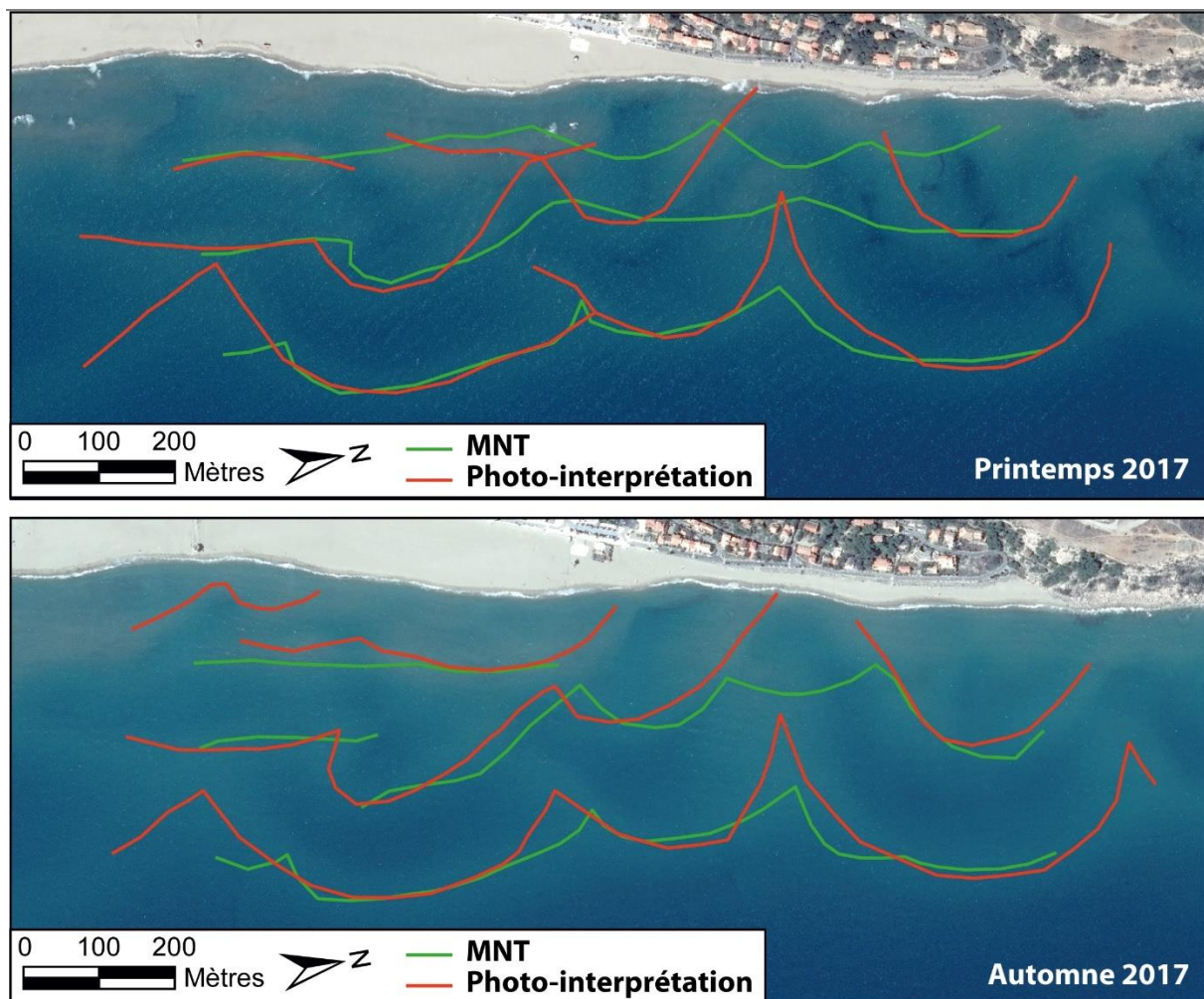


Figure 24 : Comparaison de la position des barres sédimentaires d'avant-côte de la zone de Leucate digitalisée par photo-interprétation d'image pléiades et sur MNT topo-bathymétrique pour le printemps et l'automne 2017.

4.4. Evolution du budget sédimentaire des plages de poches

Quatre levés topo-bathymétriques des plages de poche de la baie de Paulilles (plages de Bernardi, Paulilles et Forat) et de Banyuls ont été réalisés au printemps et automne 2017 et 2018. Les MNT différentiels permettent de déterminer le budget sédimentaire des plages de poche et d'analyser leur morphodynamique saisonnière.

4.4.1. Baie de Paulilles

Le Tableau 6 présente les budgets sédimentaires topographiques et bathymétriques des 4 plages de poche étudiées pour la période estival et hivernal 2017 et estival 2018. Les Figure 25 à 28 présentent les MNT topographiques et bathymétriques et les Figure 29 à 31 les MNT différentiels. Les volumes sédimentaires déplacés sont relativement faibles (quelques

centaines à un peu plus d'un millier de mètres cubes) en comparaison au plages sableuses ouvertes du Roussillon (e.g. Aleman et al., 2017). La plage émergée de Bernardi alterne entre petites phases d'accrétion et d'érosion alors que l'avant-côte est principalement en érosion. La plage de Paulilles est en érosion sur les trois périodes avec une avant-côte stable. La plage émergée du Forat a quant à elle un budget sédimentaire stable et l'avant-côte alterne entre perte l'hiver et gain l'été.

Tableau 6 : Budget sédimentaire topographique et bathymétrique en m^3 et en m^3/m^2 des plages de poche de Banyuls, Forat, Paulilles et Bernardi pour les périodes estivale 2017 (mai-juillet 2017 à septembre-octobre 2017), hivernal 2017 (septembre-octobre 2017 à avril 2018) et estival 2018 (avril 2018 à septembre-octobre 2018). En rouge, les pertes, en bleu, les gains, et en vert, les périodes stables.

	Période	Topo		Bathy	
		m^3	m^3/m^2	m^3	m^3/m^2
Bernardi	Estival 2017	-188 ± 85	-0,052 ± 0,024	2 ± 485	0,000 ± 0,017
	Hivernal 2017	151 ± 3	0,048 ± 0,001	-596 ± 475	-0,015 ± 0,012
	Estival 2018	-93 ± 25	-0,030 ± 0,008	-376 ± 228	-0,009 ± 0,005
Paulilles	Estival 2017	-342 ± 177	-0,046 ± 0,024	X	X
	Hivernal 2017	-383 ± 50	-0,062 ± 0,008	623 ± 942	0,015 ± 0,023
	Estival 2018	-412 ± 62	-0,067 ± 0,010	1333 ± 2373	0,032 ± 0,057
Forat	Estival 2017	X	X	X	X
	Hivernal 2017	62 ± 8	0,021 ± 0,003	-1671 ± 538	-0,065 ± 0,021
	Estival 2018	-113 ± 101	-0,039 ± 0,035	1200 ± 455	0,044 ± 0,017
Banyuls	Estival 2017	-970 ± 1170	-0,054 ± 0,065	-60 ± 135	-0,002 ± 0,006
	Hivernal 2017	1291 ± 190	0,077 ± 0,011	-696 ± 603	-0,030 ± 0,026
	Estival 2018	1784 ± 144	0,139 ± 0,011	255 ± 1110	0,006 ± 0,026

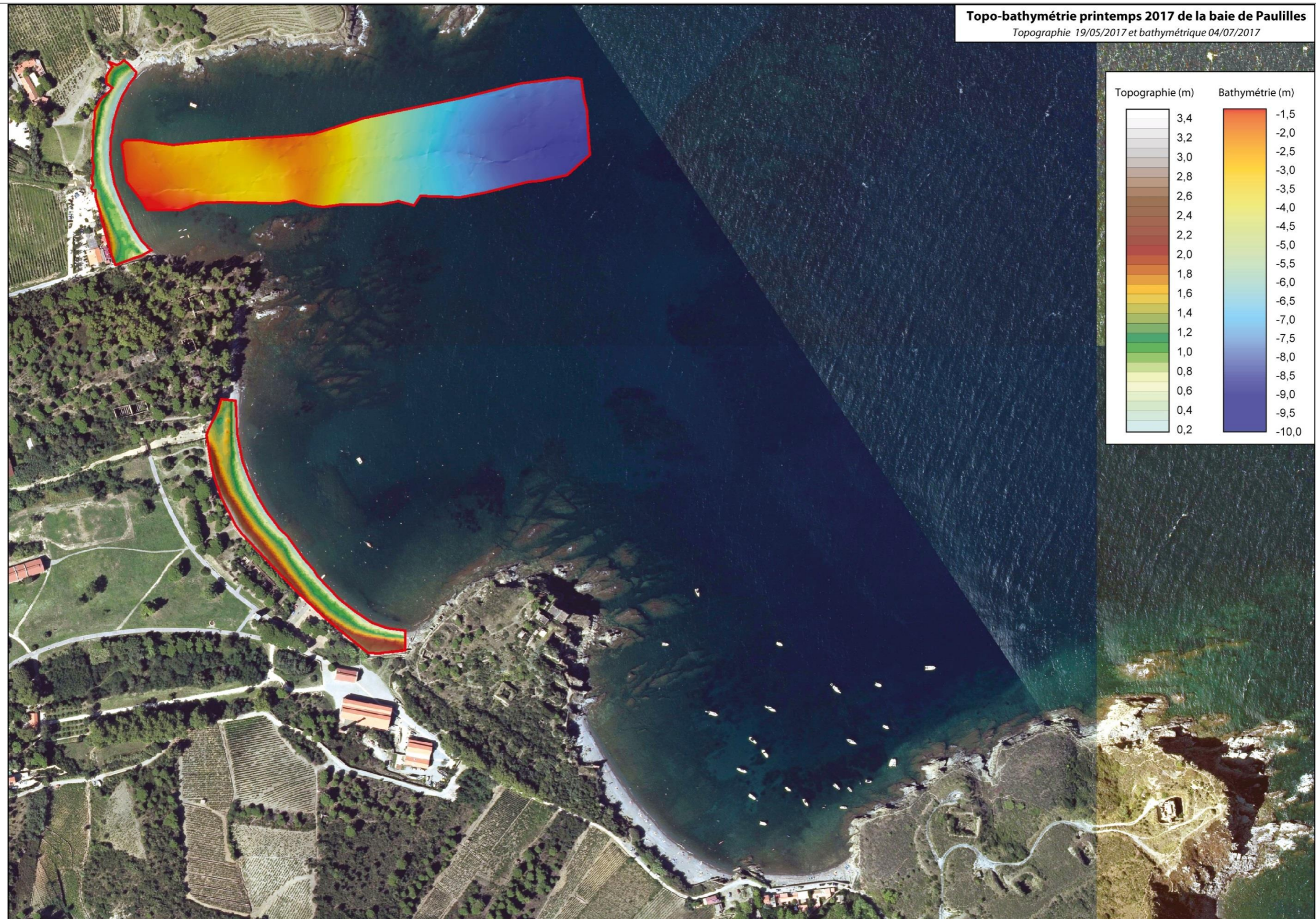


Figure 25 : Topographies et bathymétries des plages de poche de la baie de Paulilles au printemps 2017.

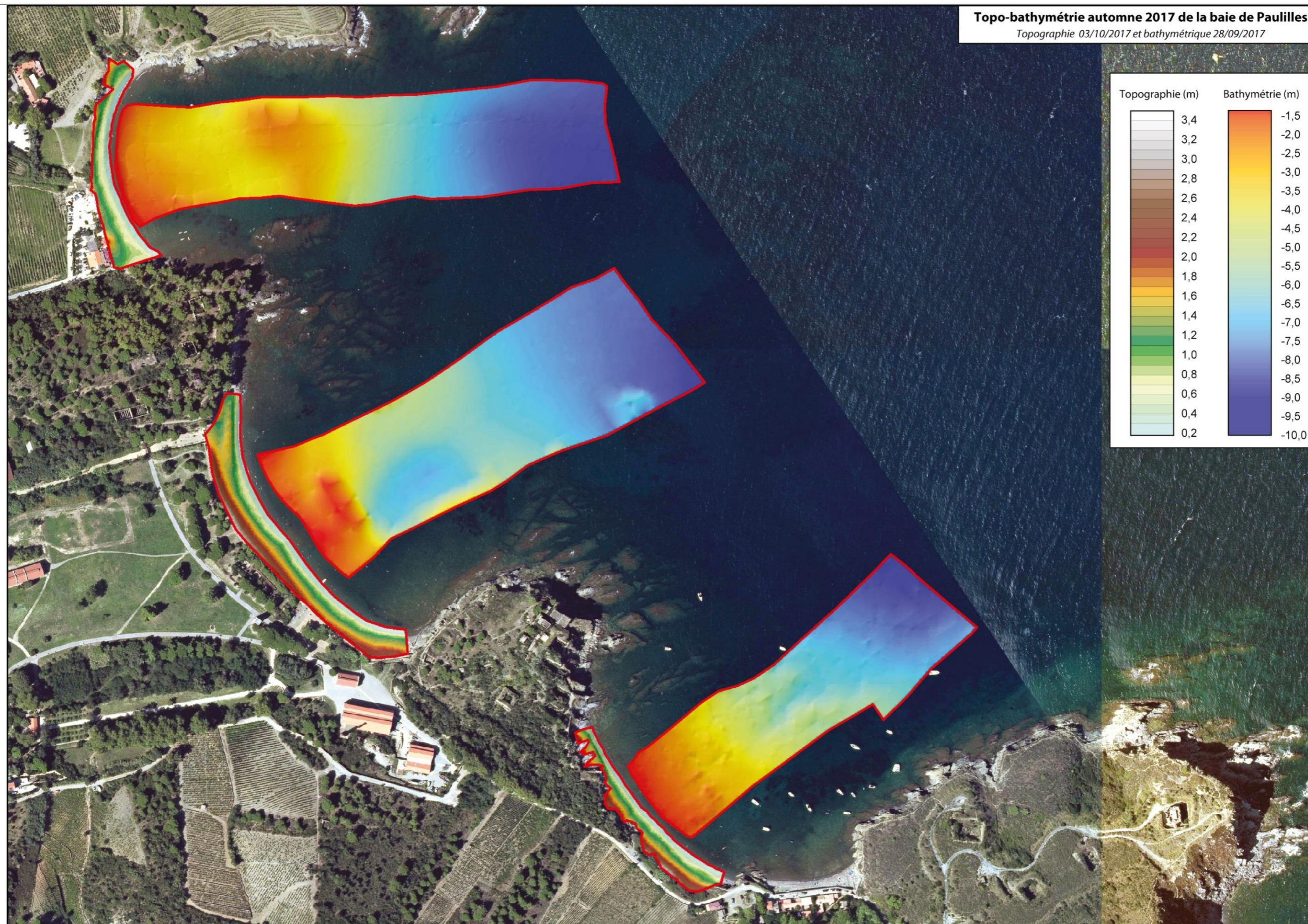


Figure 26 : Topographies et bathymétries des plages de poche de la baie de Paulilles à l'automne 2017.

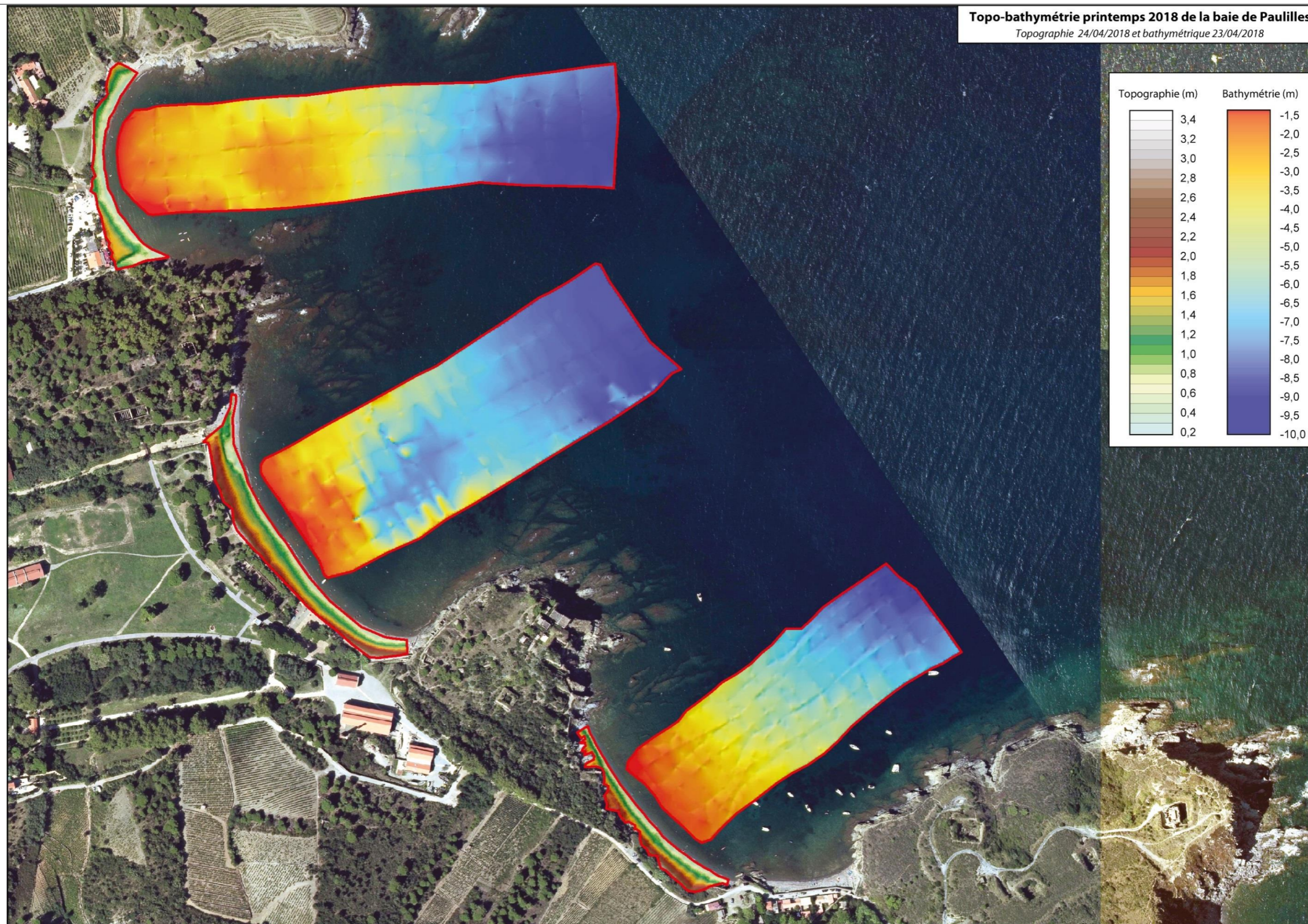


Figure 27 : Topographies et bathymétries des plages de poche de la baie de Paulilles au printemps 2018.

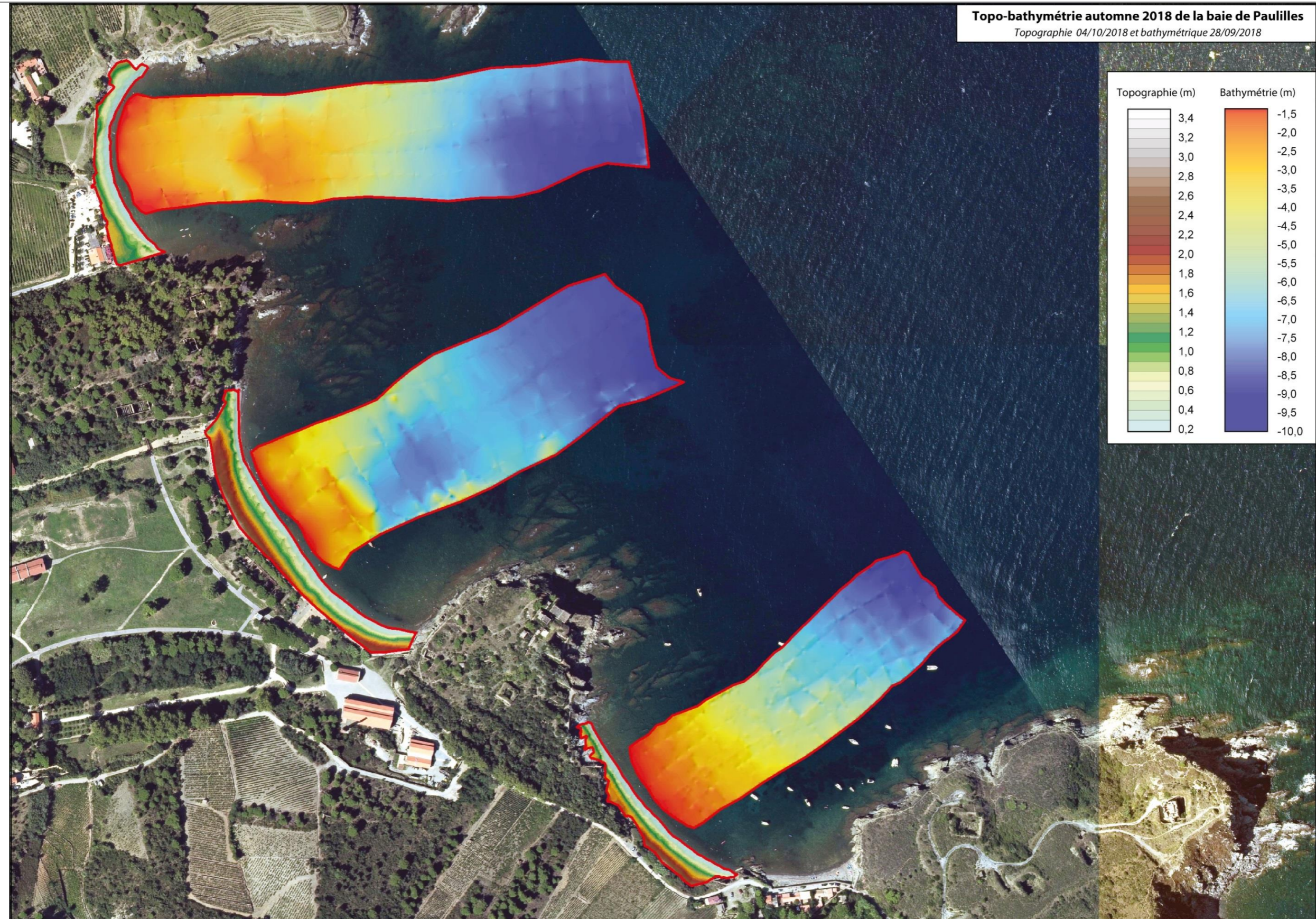


Figure 28 : Topographies et bathymétries des plages de poche de la baie de Paulilles à l'automne 2018.

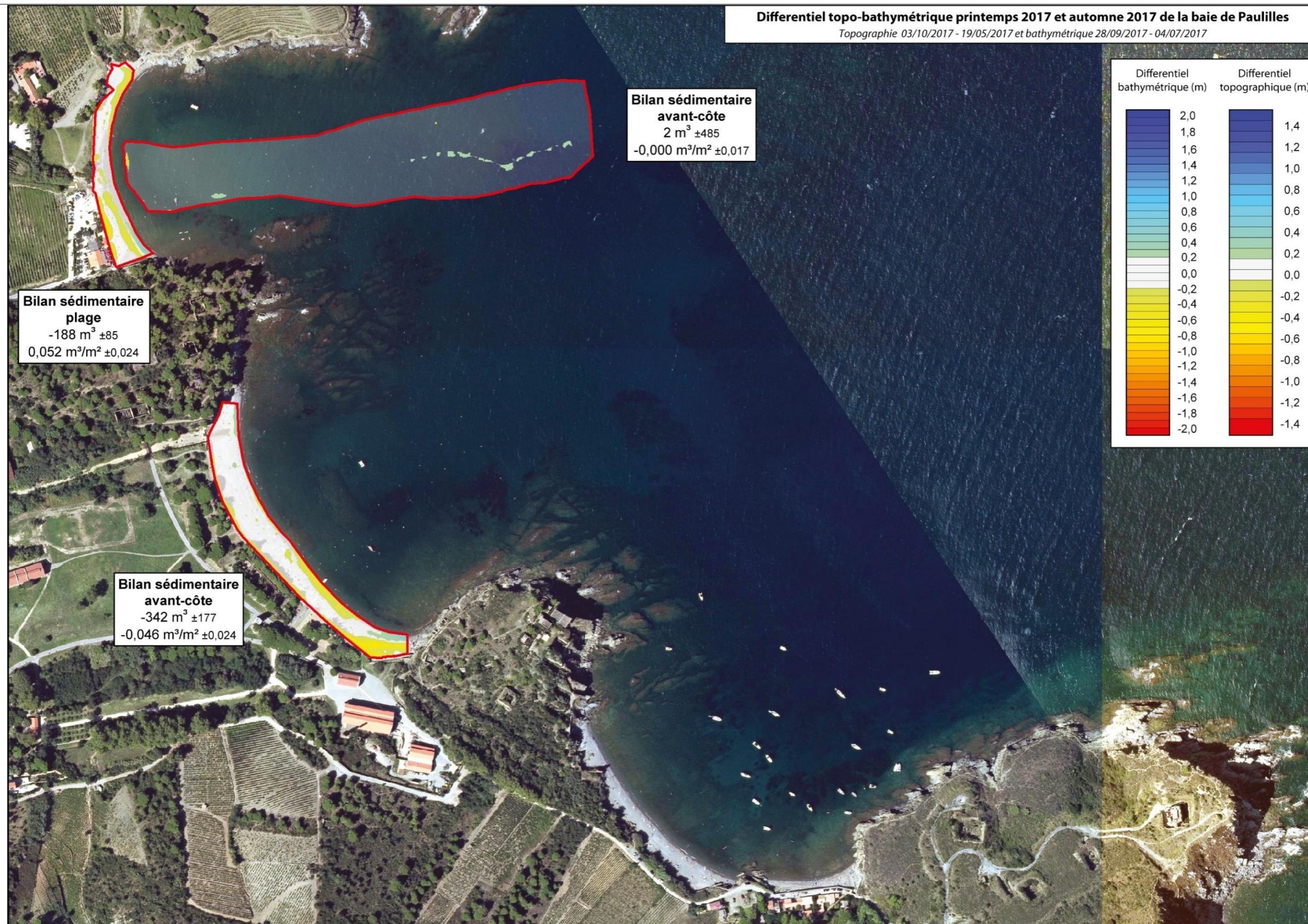


Figure 29 : Différentiels topographiques et bathymétriques des plages de poche de la baie de Paulilles entre le printemps 2017 et l'automne 2017.

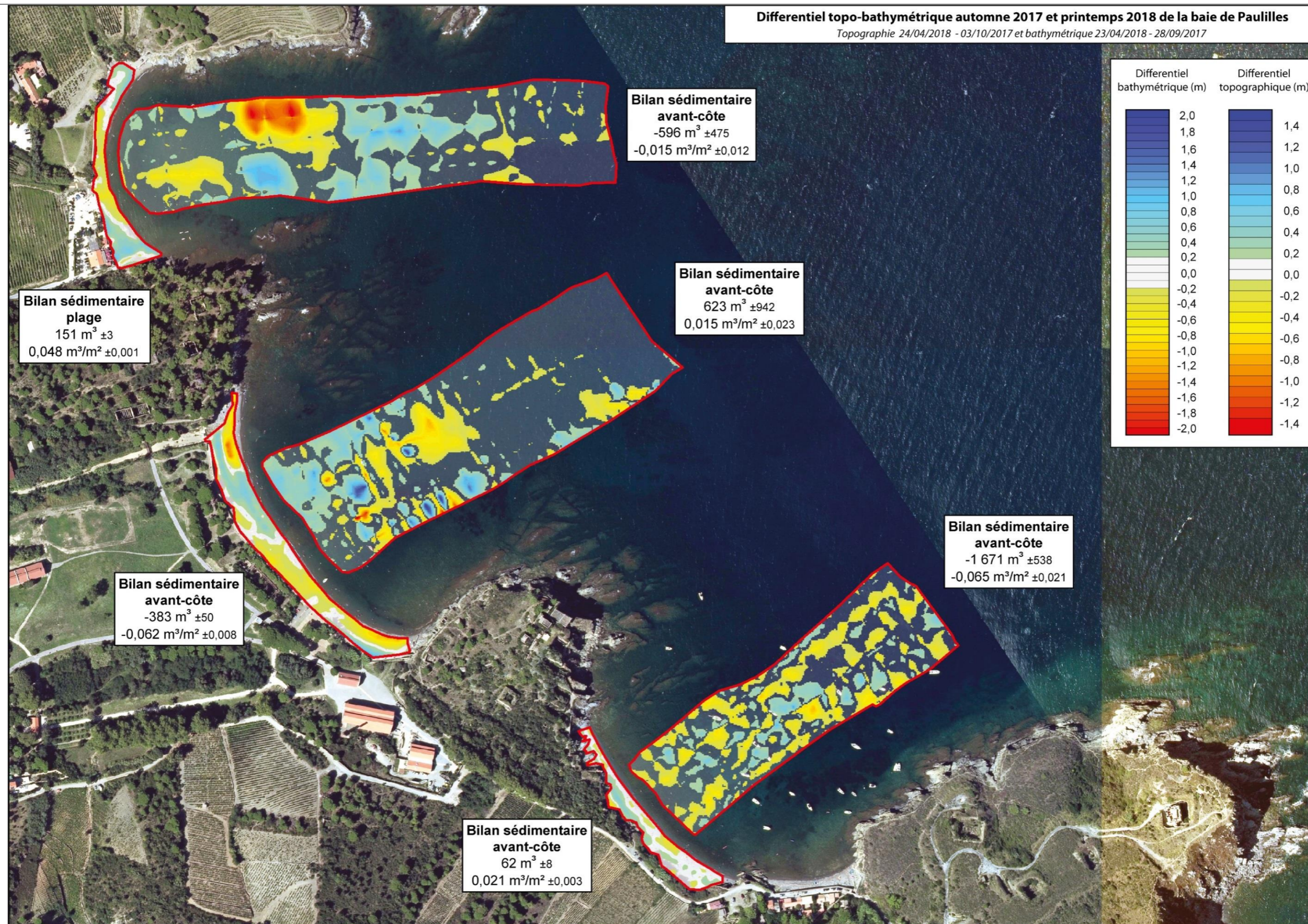


Figure 30 : Différentiels topographiques et bathymétriques des plages de poche de la baie de Paulilles entre l'automne 2017 et le printemps 2018.

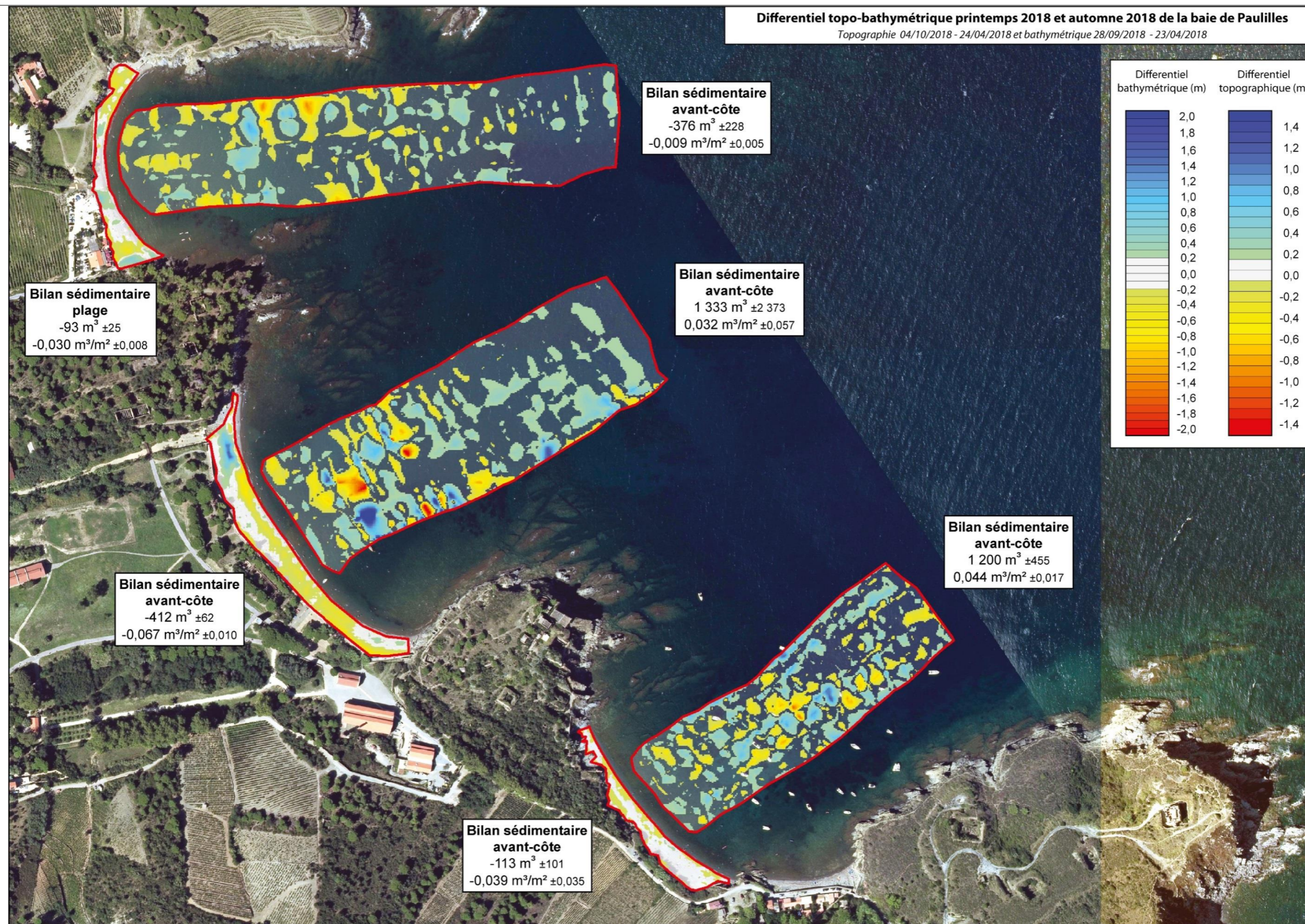


Figure 31 : Différentiels topographiques et bathymétriques des plages de poche de la baie de Paulilles entre le printemps 2018 et l'automne 2018.

Ces résultats indiquent que les plages de poches de Bernardi et de Paulilles subissent une érosion généralisée malgré l'espace d'accommodation limité et par conséquent, le faible disponible sédimentaire. La plage du Forat est plus stable certainement en raison de son orientation qui l'abrite des plus fortes tempêtes.

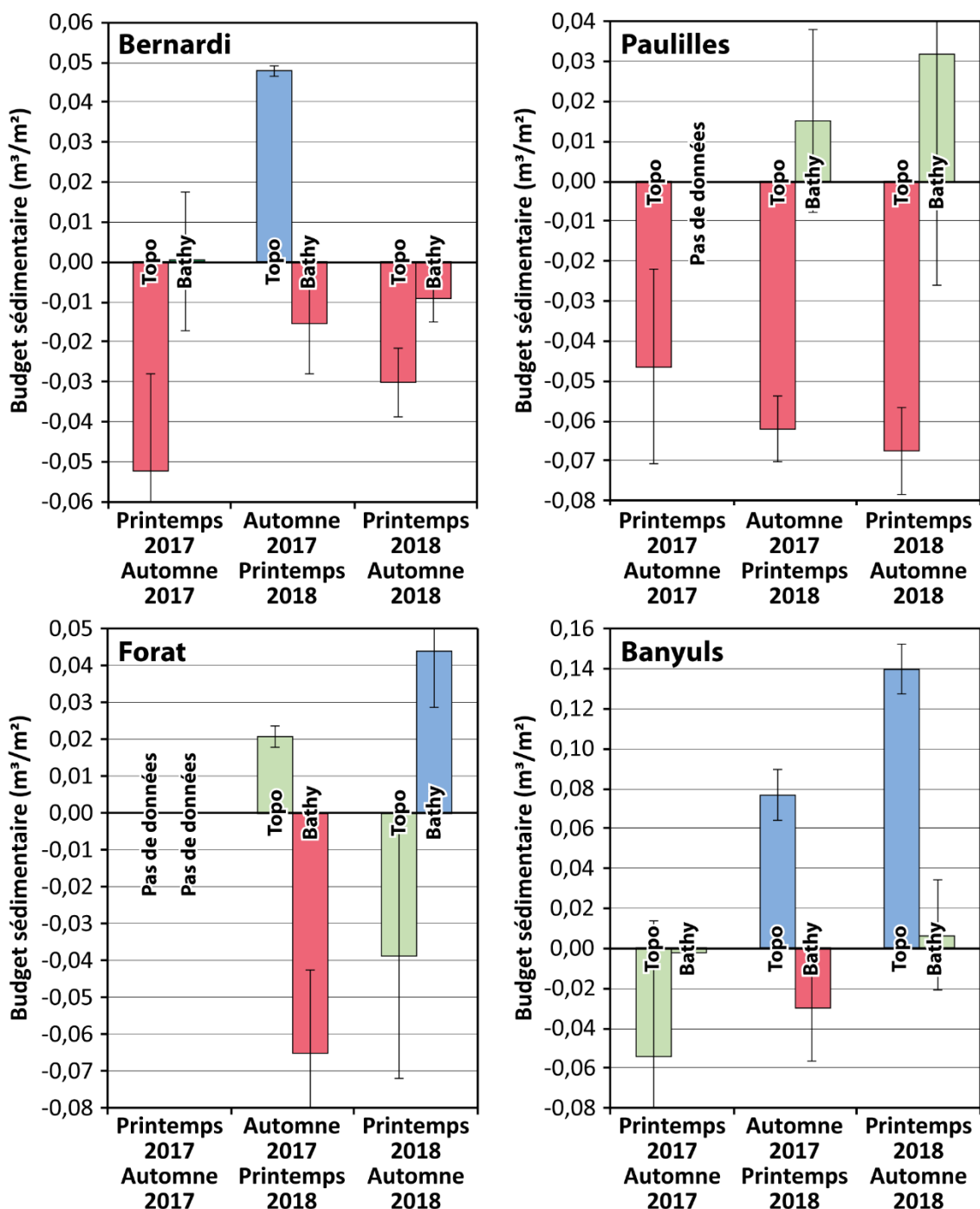


Figure 32 : Evolution du budget sédimentaire des quatre plages de poche étudiées : Bernardi, Paulilles, Forat et Banyuls. Le budget sédimentaire en érosion en rouge, en accrétion en bleu et stable en vert.

Les graphiques d'évolution du budget sédimentaire (Figure 32) montrent qu'il n'existe pas de réelle relation entre la plage émergée et l'avant-côte. Toutefois, les contraintes de navigation sur l'avant-côte (roches affleurantes, tirant d'eau, condition d'agitation lors des levés) n'ont pas permis de lever l'ensemble de la baie et surtout le continuum terre-mer. Les zones de levé peuvent également être de tailles différentes. A terre, le levé topographique prend en compte le premier mètre de bathymétrie (levé avec des cuissardes) et il est probable que des échanges plage émergée-immersée se fassent dans ces petites profondeurs d'eau.

Il n'y a également pas de relations strictes entre la période estivale et hivernale (Figure 32). Seule la plage émergée de Bernardi gagne du sédiment pendant la période hivernale alors qu'elle en perd pendant les périodes estivales. L'avant-côte est stable ou en légère érosion. La plage de Paulilles est en nette érosion sur les trois périodes alors que son avant-côte est relativement stable. Enfin sur la plage du Forat, la plage émergée est stable et l'avant-côte bascule d'une situation stable en été à une situation d'érosion en hiver.

En termes d'évolution du trait de côte, sa position alterne entre phases d'accrétion et d'érosion avec un déplacement de sédiment entre les extrémités et le centre de la plage de Bernardi (Figure 33). Sur la plage de Paulilles, le trait de côte alterne également des phases d'érosion et d'accrétion avec un point avancé au centre de la plage (Figure 34). L'hiver 2017-2018 est néanmoins marqué par un net recul sur chaque extrémité de la plage qui n'est pas comblé à la sortie de la période estivale suivante. Enfin, le trait de côte de la plage du Forat est relativement stable ou en léger recul (Figure 35).

Les conditions hydrodynamiques sont fournies par l'houlographe CANDHIS positionnée au large de Banyuls (Figure 36). Malheureusement, les données sont indisponibles pour toute la première période (juin à octobre 2017). Au cours de la période hivernale, deux tempêtes majeures se produisent avec des Hs supérieurs à 3 m. Malgré ces deux événements majeurs, les volumes déplacés ne constituent que quelques centaines de mètres cubes. En effet, la baie de Paulilles est protégée par les caps rocheux et notamment des forts coups de mer du sud par le Cap d'Ullastrell. De plus, les différentiels bathymétriques soulignent que les évolutions morpho-sédimentaires s'effectuent au sein de chaque zone, entre le haut de plage et le talus de collision ou les bords et le centre pour les plages émergées. Seule une étude in situ de la courantologie (déploiement de plusieurs courantomètres dans la baie) pourrait permettre de dresser un schéma général du fonctionnement hydro-sédimentaire des plages de poches de la baie de Paulilles.

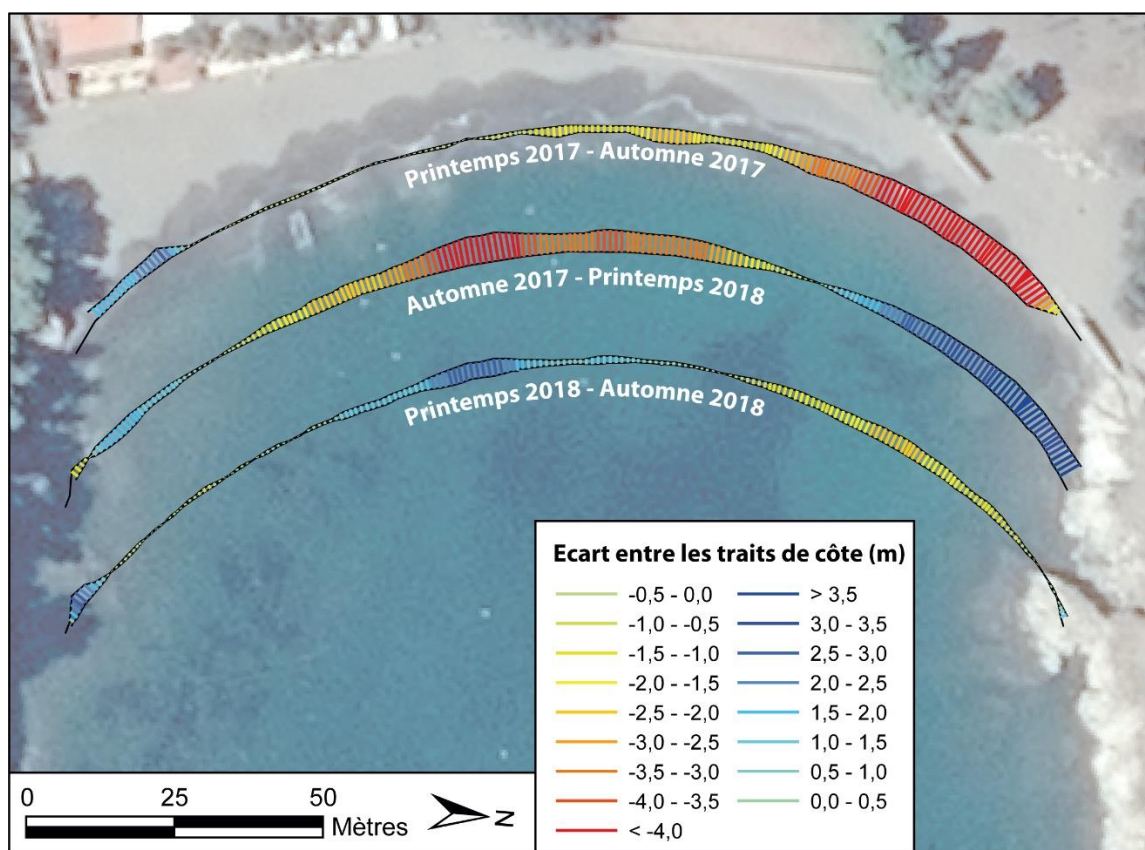


Figure 33 : Evolution du trait de côte de la plage de Bernardi.

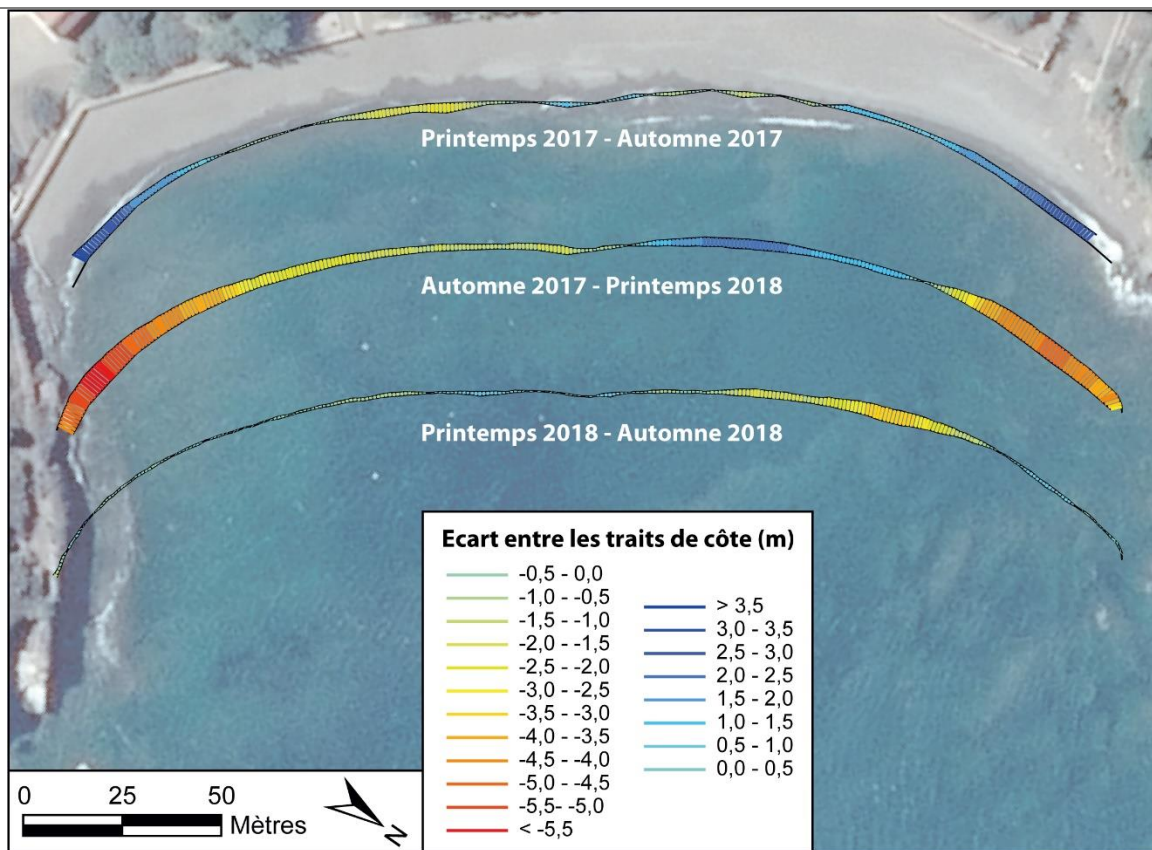


Figure 34 : Evolution du trait de côte de la plage de Paulilles.

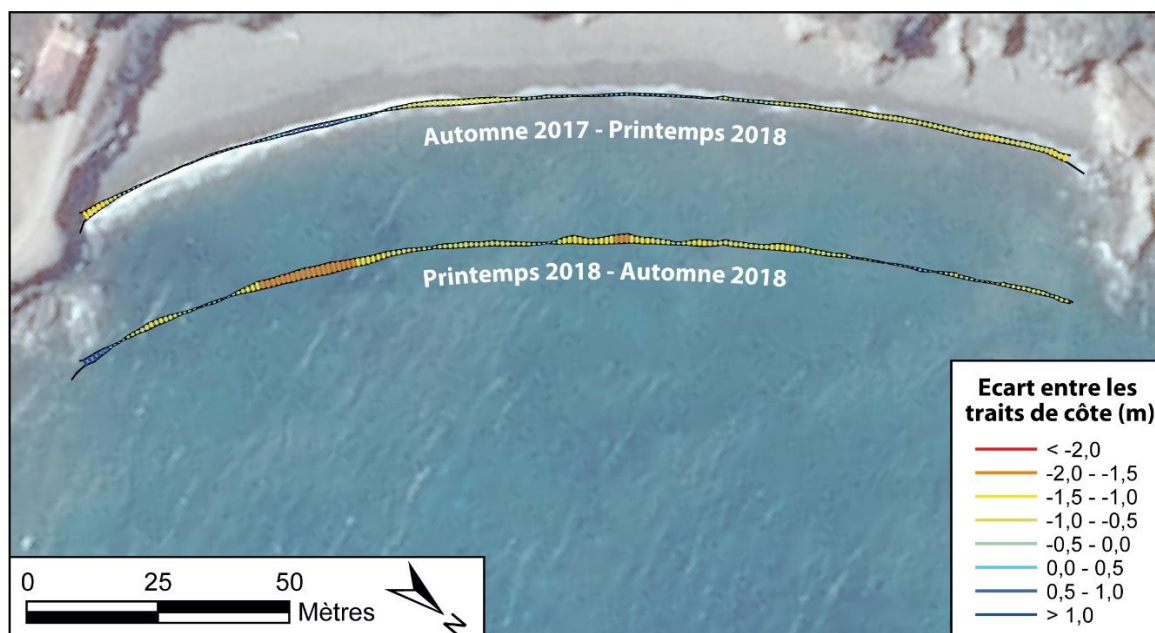


Figure 35 : Evolution du trait de côte de la plage du Forat.

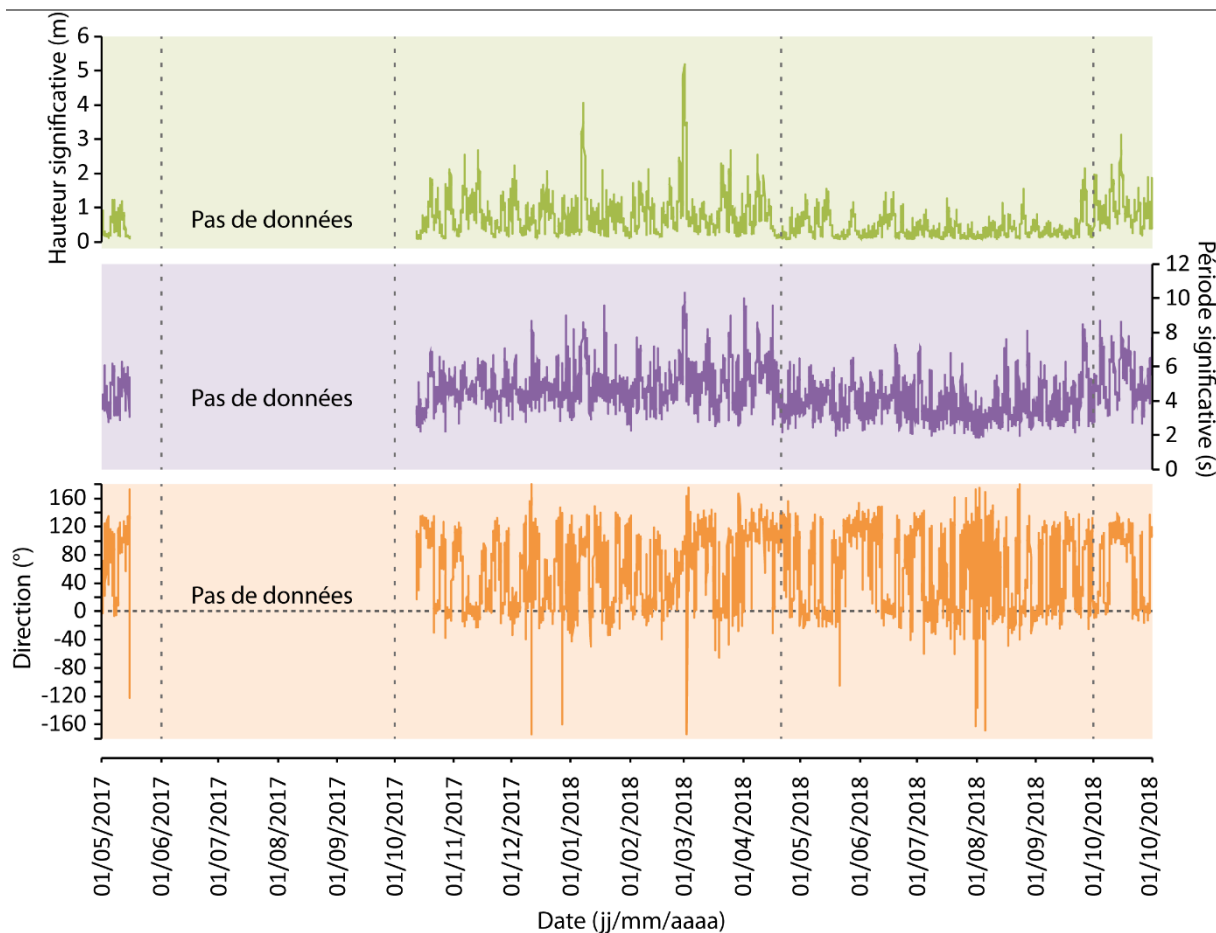


Figure 36 : Evolution de la hauteur significative, de la période et de la direction des houles enregistrées à l'houligraphe de Banyuls entre le 01/05/2017 et le 01/10/2018.

4.4.2. Plage de Banyuls

L'évolution morpho-sédimentaire de la plage de Banyuls est plus complexe en raison du débouché du ruisseau de la Baillaury dans la partie sud de la baie. Ce torrent de type oued est à sec l'été mais atteint des débits torrentiels pendant la période hivernale (Figure 37, 169 m³/s enregistré en octobre 1987). Par conséquent, la Baillaury peut charrier d'importants volumes sédimentaires et remodeler complètement la plage (Mear, 1985). Sur la période étudiée, un delta se met en place après la période hivernale, bien visible sur la comparaison des traits de côte d'automne 2017 et du printemps 2018. Ce dernier est érodé en été (Figure 38).

Les volumes mis en jeu sur la plage émergée dépassent le millier de mètres cubes. La plus grande partie de ces volumes est la conséquence de l'évolution de l'embouchure de la Baillaury. Il faut également souligner le remodelage estival anthropique de la plage qui, malgré le soin apporté à éviter au maximum les secteurs modifiés par l'homme, influence de

manière non négligeable la morphodynamique de la plage (EID, 2014). Enfin, les différentiels soulignent une dynamique de la berme qui s'érode entre l'automne 2017 et le printemps 2018 (hiver) pour se reconstruire entre le printemps 2018 et l'automne 2018 (été).



Figure 37 : Photo de l'embouchure de la Baillaury dans la baie de Banyuls le 30 novembre 2014 (photo de Albert Callis).
Le niveau du cours d'eau a atteint presque 5 m ce jour-là.

Sur l'avant-côte, les bathymétries réalisées au printemps et à l'automne 2017 ne sont pas assez étendues vers le sud (contraintes de navigation) pour identifier le delta (Figure 39 et 40) mais celui-ci est clairement visible sur les bathymétries du printemps et de l'automne 2018 (Figure 40 et 41). Des taches d'érosions un peu plus étendues au sud de la zone semblent souligner l'érosion de ce delta sur le différentiel printemps - automne 2018 (Figure 45). Sur le reste de la zone, l'avant-côte est très stable, excepté les petits fonds proches du rivage qui sont érodés entre l'automne 2017 et le printemps 2018.

Ces observations semblent en adéquation avec l'étude de la baie de Banyuls (Baie du Fontaule) menée par Méar en 1985 et son schéma hydrodynamique (Figure 46). Les conclusions de son rapport mettaient en avant une érosion par les crues (effet de chasse) dans la partie sud de la baie. Depuis, un épi courbe a été rajouté comme préconisé dans le rapport pour stopper la fuite des sédiments vers le large et créer une petite plage (Figure

47). Une étude plus complète avec notamment le déploiement de courantmètres pourrait permettre de mettre à jour le schéma morphodynamique de la baie de banyuls et évaluer l'efficacité de l'épi d'arrêt des sables.

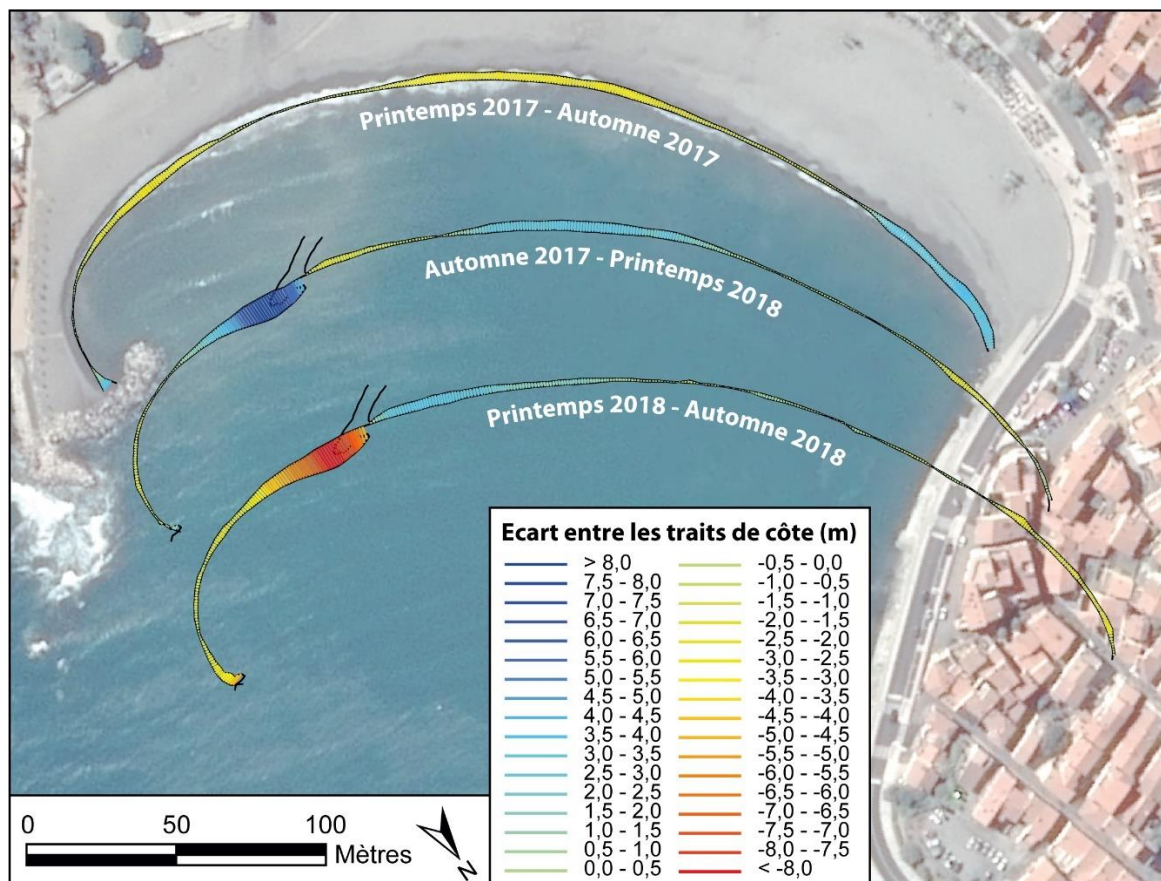


Figure 38 : Evolution du trait de côte de la plage de Banyuls.

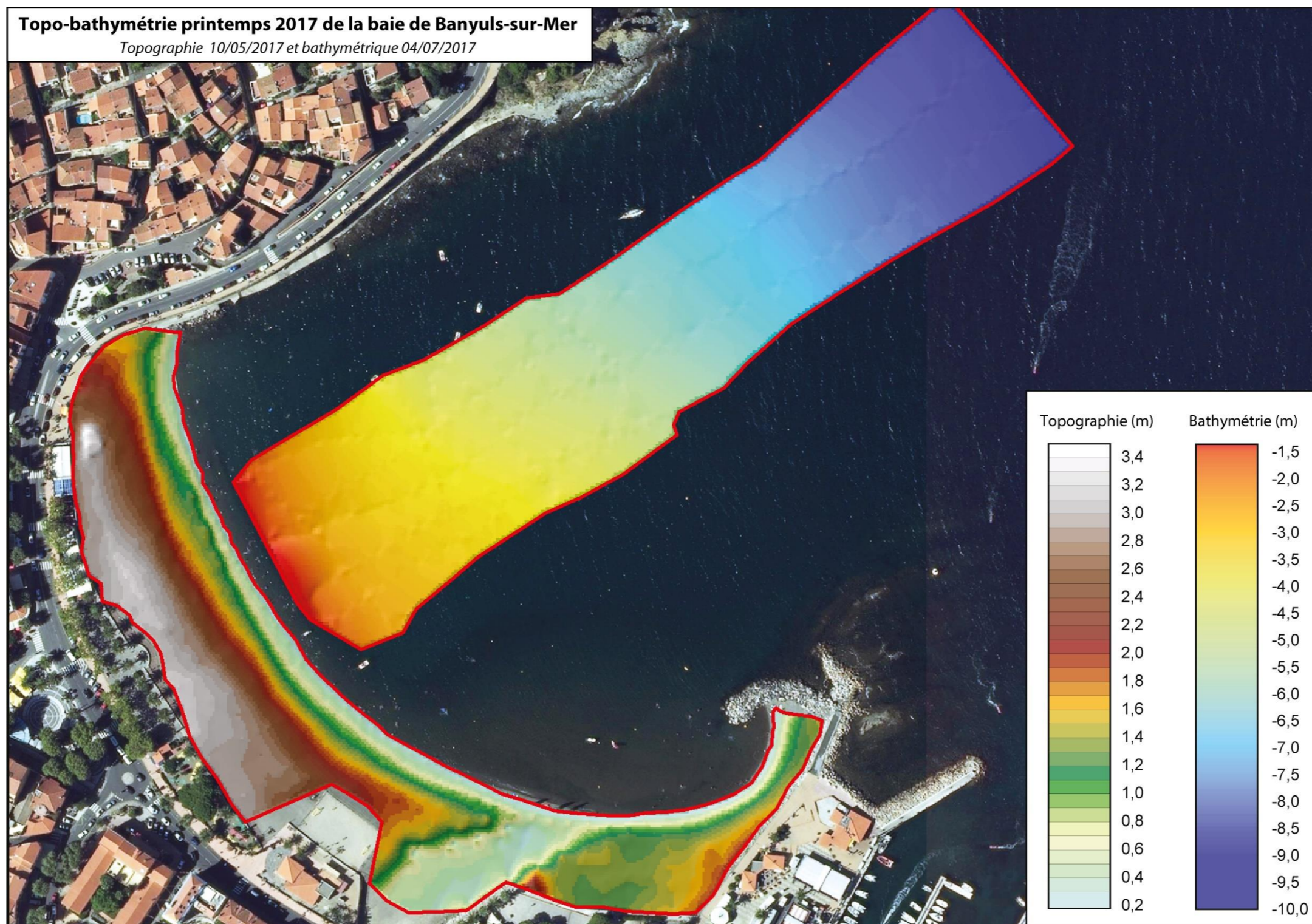


Figure 39 : Topographie et bathymétrie de la plage de Banyuls au printemps 2017.

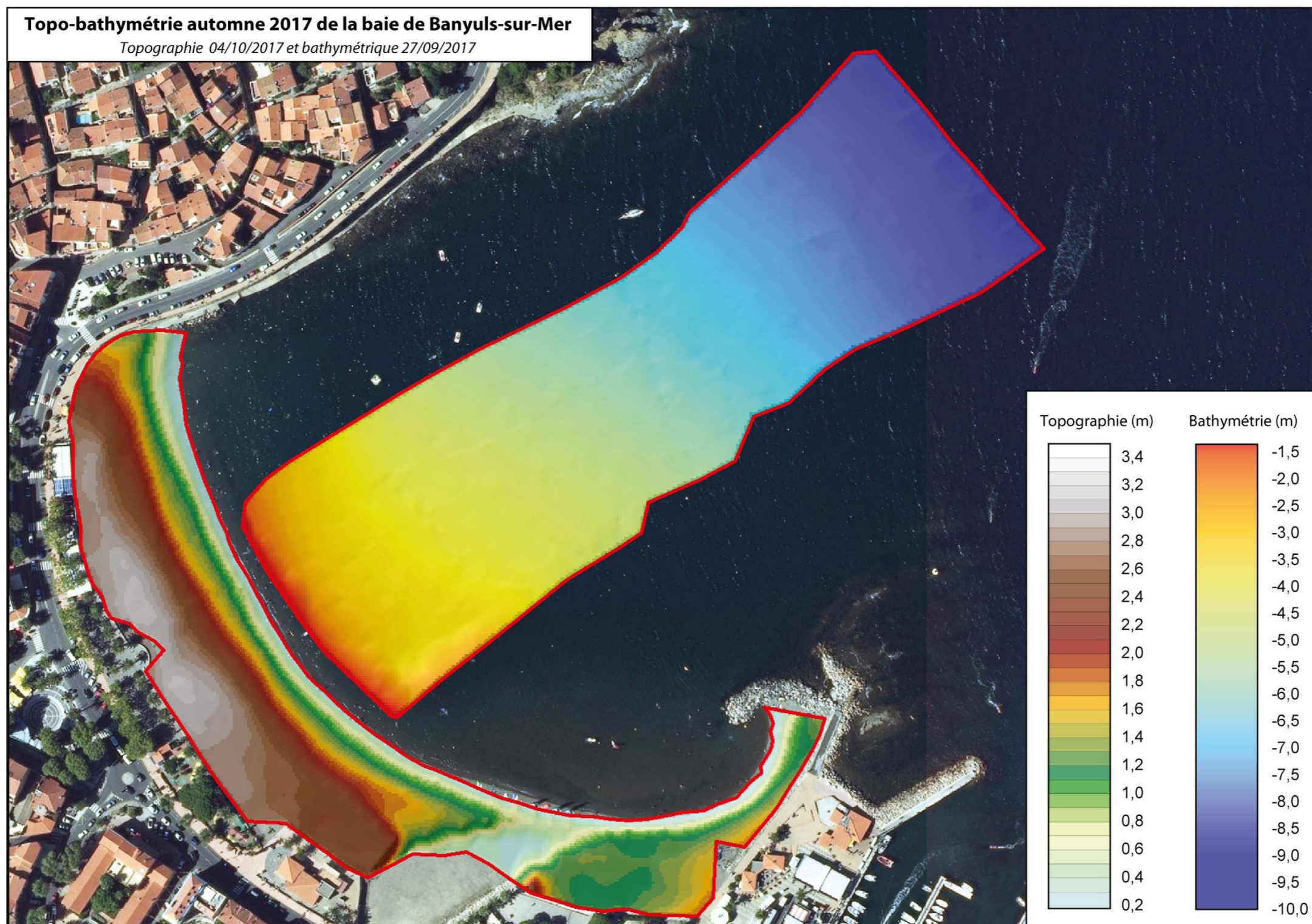


Figure 40 : Topographie et bathymétrie de la plage de Banyuls à l'automne 2017.

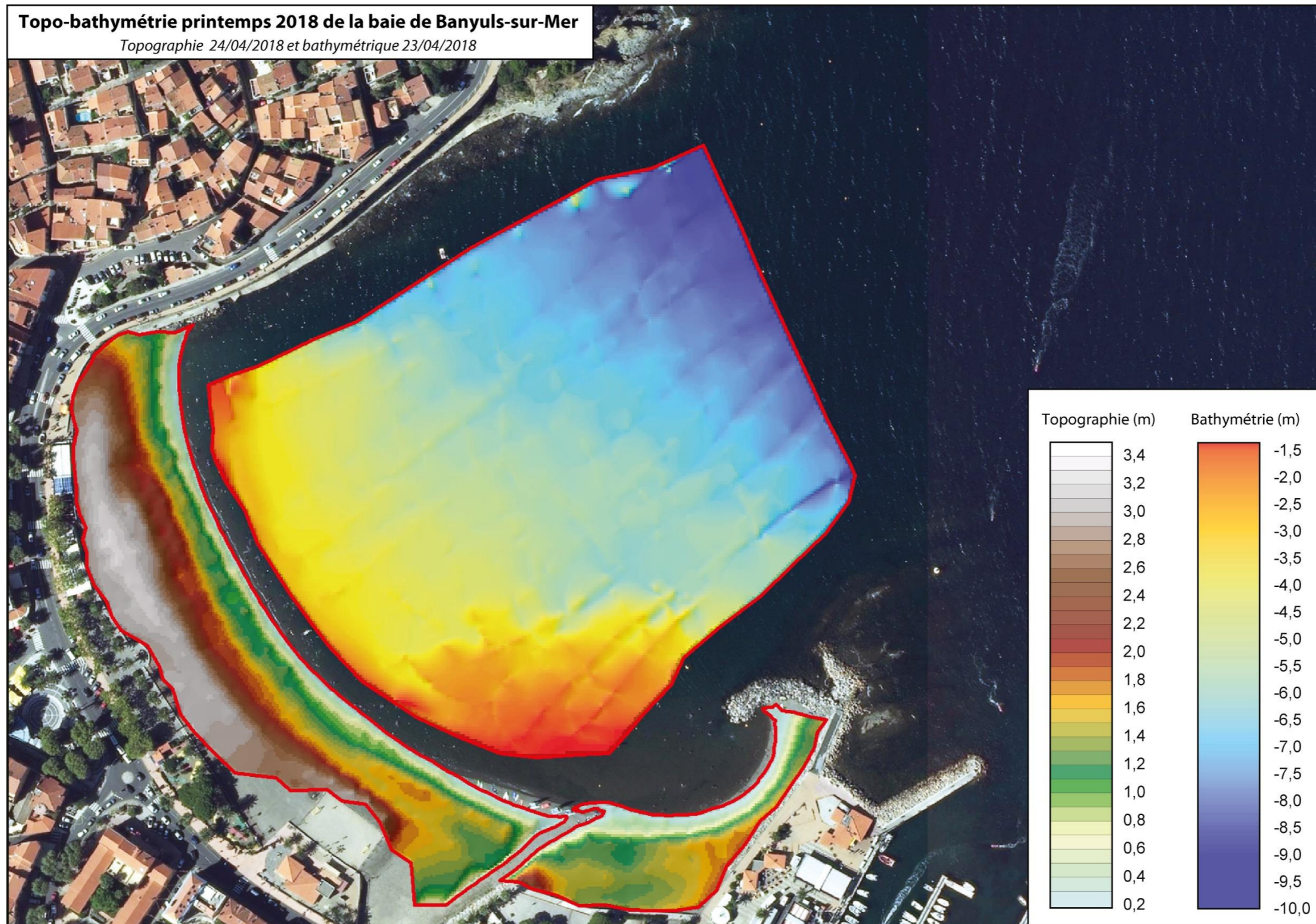


Figure 41 : Topographie et bathymétrie de la plage de Banyuls au printemps 2018.

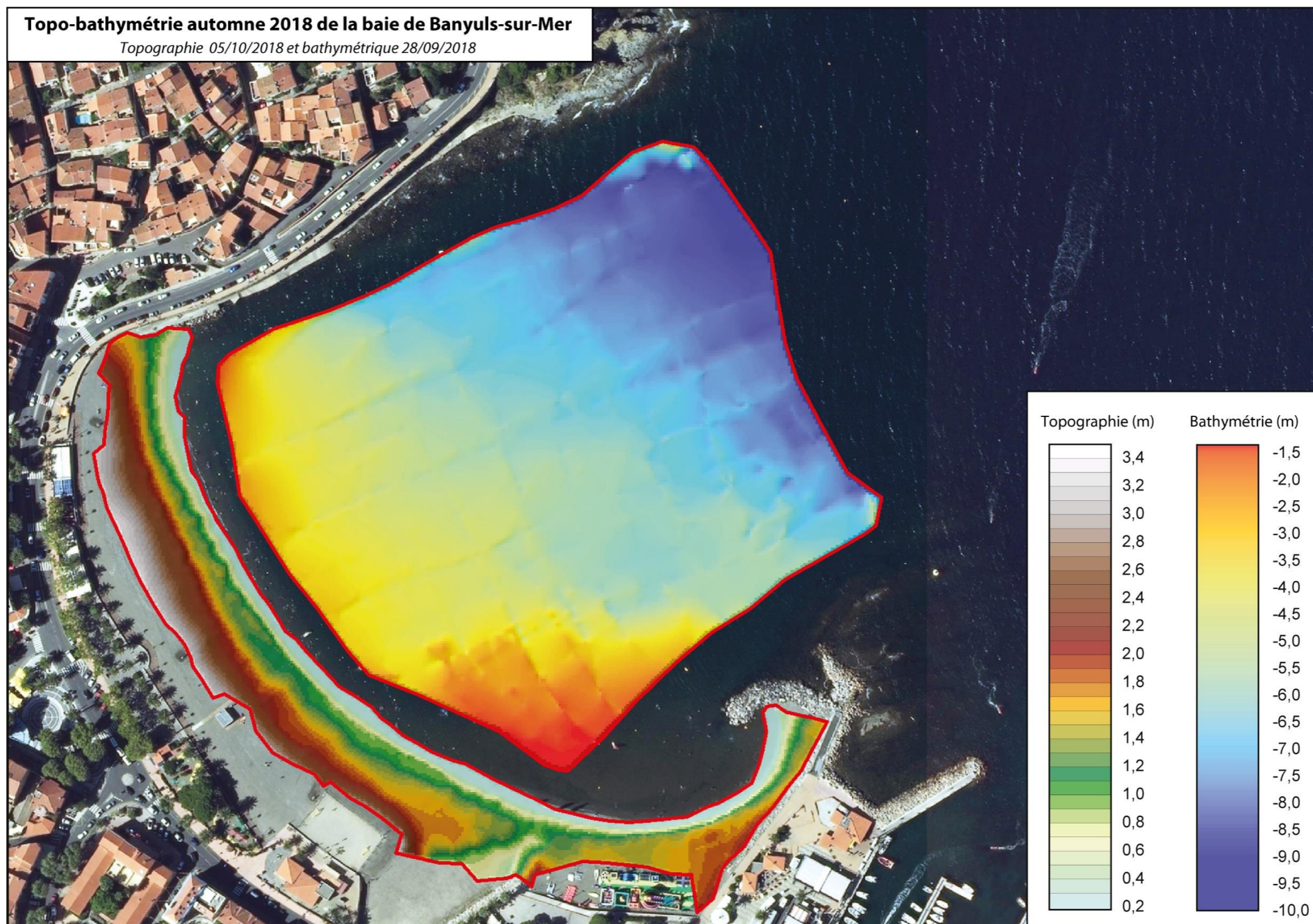


Figure 42 : Topographie et bathymétrie de la plage de Banyuls à l'automne 2018.

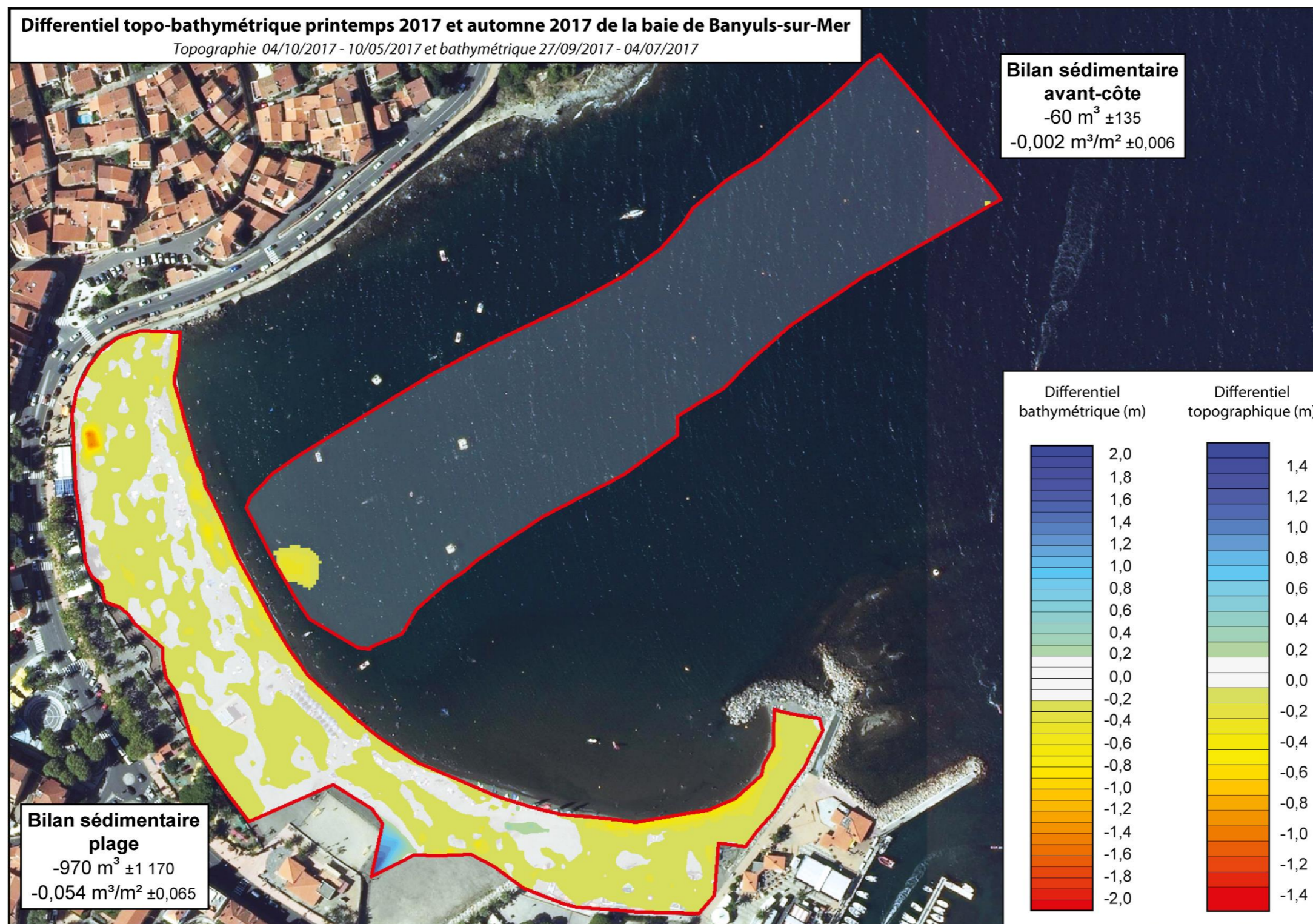


Figure 43 : Différentiel topographique et bathymétrique de la plage de Banyuls entre le printemps 2017 et l'automne 2017.

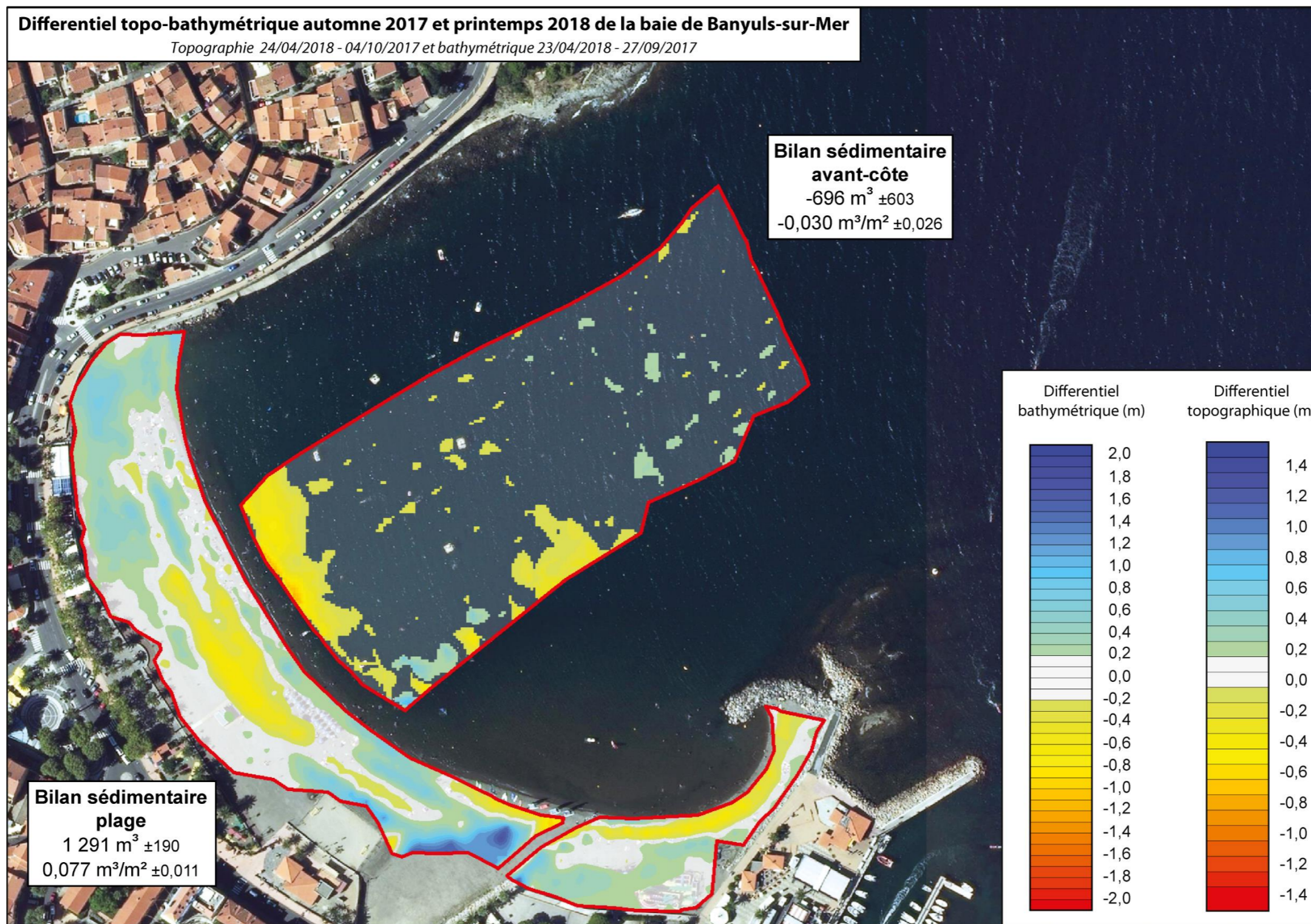


Figure 44 : Différentiel topographique et bathymétrique de la plage de Banyuls entre l'automne 2017 et le printemps 2018.

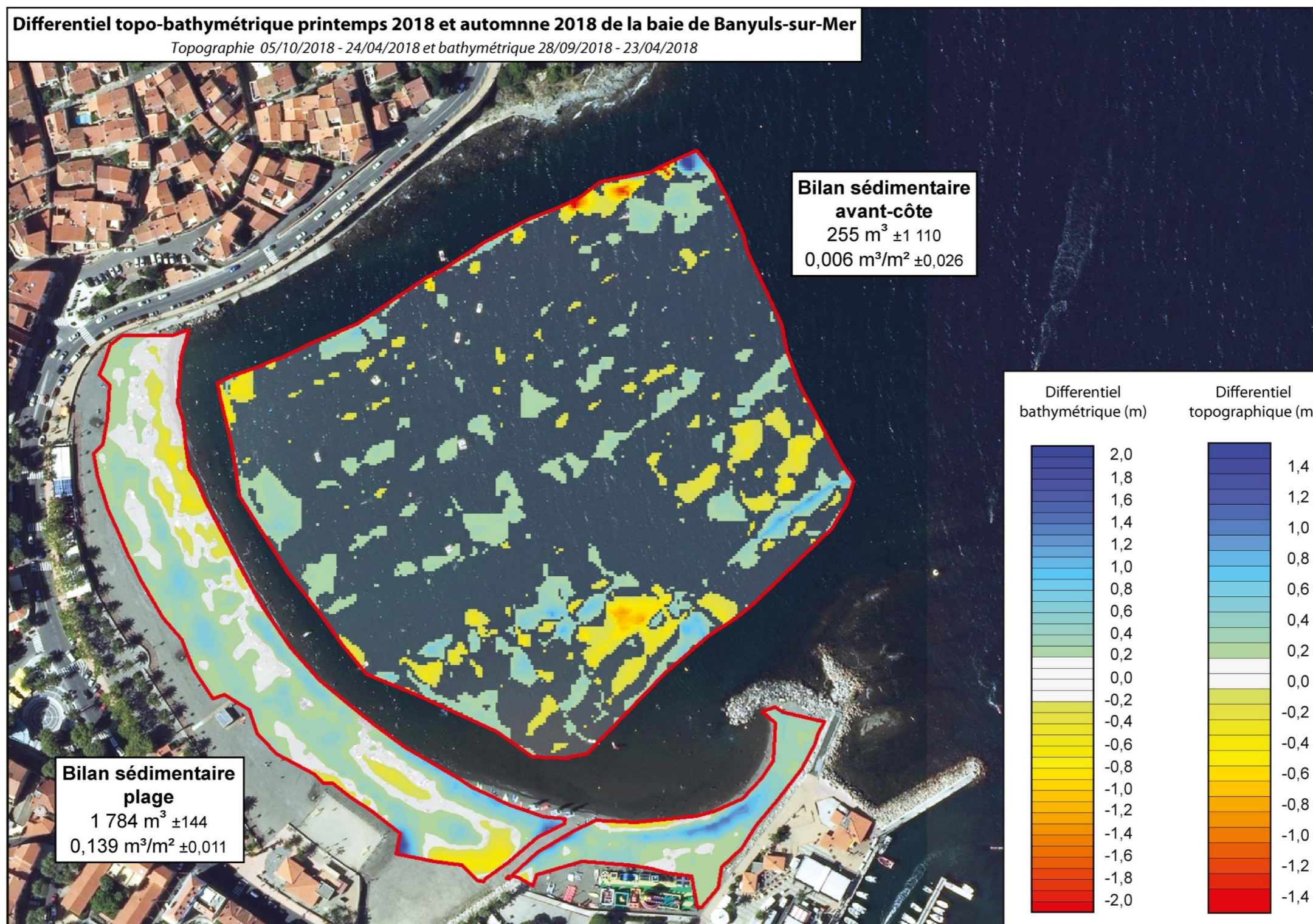


Figure 45 : Différentiel topographique et bathymétrique de la plage de Banyuls entre le printemps 2018 et l'automne 2018.

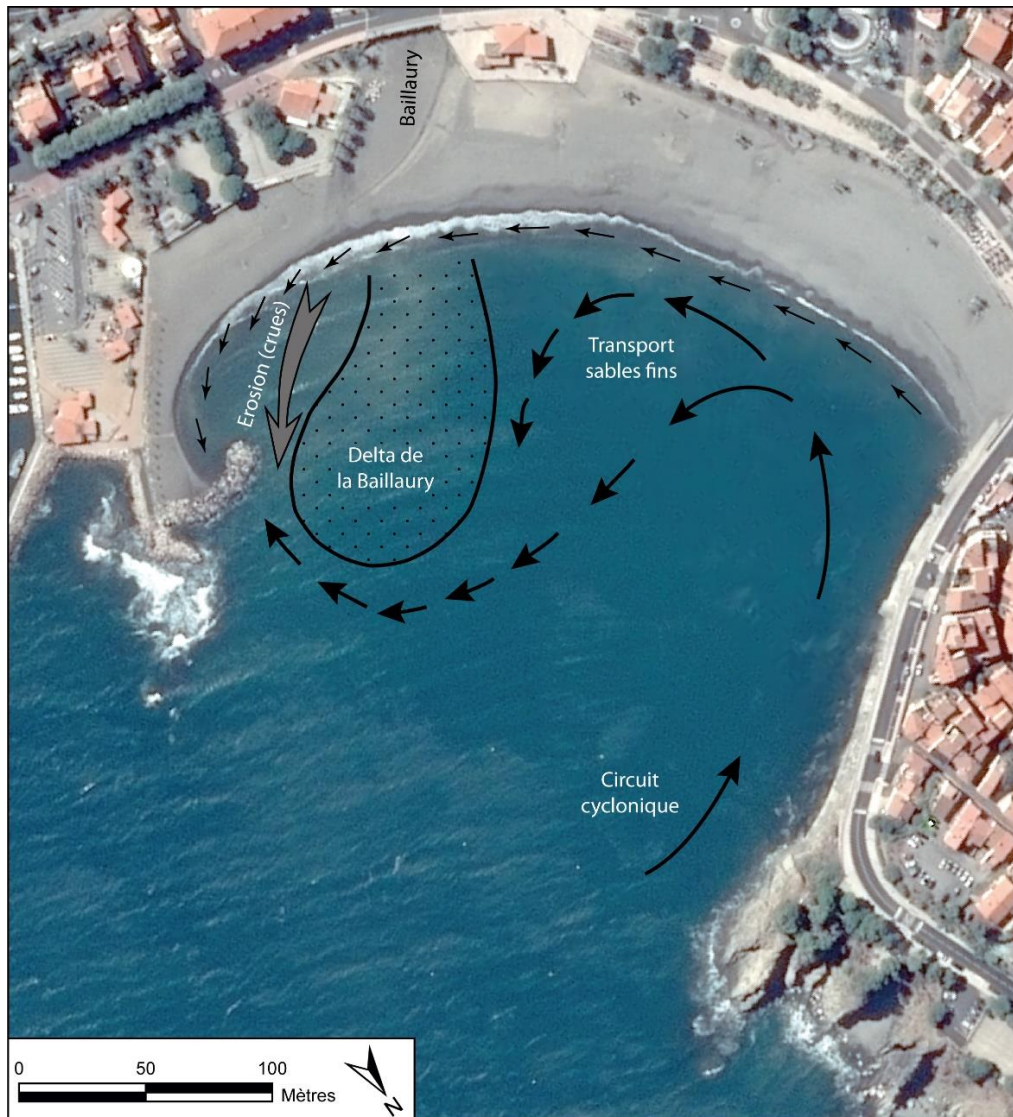


Figure 46 : Schéma morphodynamique de la baie de Banyuls adapté d'après Méar (1985).



Figure 47 : Photographie aérienne de la baie de Banyuls en 1985 (à gauche) et 2015 (à droite) montrant l'ajout de l'épi-courbe au sud de la baie pour stopper le transport des sédiments vers le large.

5. CONCLUSION GENERALE

Deux années de suivis de plusieurs plages le long du littoral couvert par le Parc Naturel Marin du Golfe du Lion ont permis d'évaluer la possibilité d'un suivi semi-automatisé du trait de côte à partir de données satellites de télédétection à très haute résolution spatiale (imagerie Pléiades). Les données issues du traitement semi-automatisé représentent avec une assez bonne précision la position du trait de côte. La marge d'erreur obtenue par comparaison aux données de terrain (DGPS RTK) est de l'ordre de $\pm 2,5$ m (hors biais ponctuels qui devront être corrigés). Si cette marge d'erreur demeure trop élevée pour un suivi événementiel de la position du trait de côte, elle apparaît suffisante pour un suivi pluriannuel. Ce type de traitement semi-automatique représente donc un atout non négligeable pour le suivi du trait de côte considéré comme un proxy important de l'état global du littoral du Parc Naturel Marin du Golfe du Lion. Grâce aux améliorations apportées à la méthode en 2019, qui ont pris en compte différents problèmes liés à la classification, la détection du trait de côte par seuillage de l'indice NDVI apparaît comme la plus opérationnelle pour faire une détection semi-automatique, facilement paramétrable pour coller au plus près à la limite définie par l'utilisateur et éviter les effets liés au jet de rive.

Le travail montre aussi la pertinence d'un suivi sur la côte sableuse des morphologies des barres d'avant-côte d'après les données des images satellites Pléiades. En comparant la photo-interprétation aux sondages bathymétriques constitués de profils transversaux espacés de 100 m, les images présentent l'avantage de fournir une résolution plus fine. Cette haute résolution permet de mieux décrire les imbrications complexes de petites barres et petits chenaux près du bord. Néanmoins, si on peut apprécier la forme des barres, il n'est aujourd'hui pas possible d'apprécier suffisamment précisément la bathymétrie avec les données satellites, et d'évaluer ainsi des changements en termes de volumes de sable entre deux levés.

En parallèle, ces travaux ont permis d'étudier l'évolution du budget sédimentaire de quatre plages de poche présentes au sein du PNMGL. Les résultats ont souligné le caractère stable ou érosif des plages de poche de la baie de Paulilles avec des volumes perdus de l'ordre de quelques centaines à un peu plus d'un millier de mètres cubes, volumes sensiblement inférieurs à ceux que l'on peut observer sur les plages ouvertes du parc. Les mouvements sédimentaires semblent s'effectuer principalement entre le haut de plage et la berme-talus ainsi qu'entre le centre et les extrémités des baies. La plage de Banyuls diffère de ces voisines par sa situation au centre de la station balnéaire et par le débouché du torrent de la Baillaury. Les fortes crues de cette dernière entraînent la mise en place d'un petit delta lors des périodes hivernales qui va être érodé pendant la période estivale. Les nombreuses interventions humaines peuvent également sensiblement influencer l'aspect de la plage émergée (e.g. remodelage à la fin de l'hiver, parking...). Malgré leur faible dynamique, les plages de poche représentent un enjeu important pour le parc de par les habitats qu'elles offrent (herbiers de posidonie, côte abritée...) et l'attrait touristique qu'elles représentent. Des levés avec une embarcation de taille réduite

(facilités de navigation) et un suivi annuel de l'hydrodynamique permettrait d'améliorer la connaissance du fonctionnement de ces systèmes de plage de poche.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aleman, N., Robin, N., Certain, R., Anthony, E.J., Barusseau, J.-P., 2015.** Longshore variability of beach states and bar types in a microtidal, storm-influenced, low-energy environment. *Geomorphology* 241, 175-191.
- Boak, E. H., Turner, I. L., 2005.** Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research* 21(4), 688-703.
- Bourachot, A., 2017.** Apport de la télédétection satellitaire pour le suivi de la végétation dunaire sur le littoral du parc naturel marin du golfe du Lion. Mémoire de Master 2, Université de Strasbourg, 76 p.
- CEREMA, 2018a.** Exploitation d'images satellite pour le littoral. Volet I : État de l'art de l'utilisation des technologies satellitaires pour la cartographie du trait de côte et de la bathymétrie. *Collection Connaissances*, 58 p.
- CEREMA, 2018b.** Exploitation d'images satellite pour le littoral. Volet II : Réalisation d'un prototype d'extraction du trait de côte à partir d'images satellite. Application à l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon. *Collection Connaissances*, 72 p.
- EID, 2014.** Dynamique morphologique des plages de la côte rocheuse des Pyrénées-Orientales. Contrat d'Etude DREAL-LR, 82 p.
- Larsson, T. K., Silfversten, L., 2018.** Coastline detection in satellite images using machine learning techniques. Mémoire de Master, Lund University, Suède. 60 p.
- Mallet, C., Michot, A.** avec la collaboration de **De La Torre, Y., Lafon, V., Robin, M., Prevotaux, B., 2012.** Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte – Rapport BRGM/RP-60616-FR, 162 p.

Mear, Y., 1985. Baie du Fontaulé : Etude de la dynamique sédimentaire. Université de Perpignan, Université de Paris VI, SMNLR de Port Vendres. Rapport pour la mairie de Banyuls, Juillet 1985. 82 p.

Rachdi, B., Fougrach, H., Hakdaoui, M., Hsain, M., Badri, W. 2011. Apport de la télédétection et des SIG pour l'évaluation des mares temporaires dans la province de Benslimane (Maroc)



LMUSCA

CEFREM – UPVD

52 avenue Paul Alduy

66860 Perpignan Cedex 9

Tél : 04 68 66 20 57



Parc Naturel Marin

du Golfe du Lion

2 impasse Charlemagne

66700 Argelès-sur-Mer

Tél : 04 68 68 40 20



EID Méditerranée

165, avenue Paul-Rimbaud

34184 Montpellier Cedex 4

Tél. 04 67 63 67 63



OBSCAT

Agence d'urbanisme catalane (AURCA)

19 Espace Méditerranée

66000 Perpignan

Tél : 04.68.87.75.52