Actualisation des connaissances sur l'érosion de la côte Vermeille entre 1942 et 2019, par imagerie satellite très haute résolution – Enquêtes de perception de la population sur l'érosion du littoral du Parc Naturel Marin du Golfe du Lion

Rapport année 1 :

synthèse de l'évolution historique ancienne et récente du trait de côte des différentes plages sableuses ou de galets de la côte rocheuse



Anses de Paulilles © photos-hedelin.com, 2019 pour le Parc Naturel Marin du Golfe du Lion

novembre 2020

CONTACTS

Hugues Heurtefeux

hheurtefeux@eid-med.org

04.67.63.72.99

Mathieu GERVAIS

mgervais@eid-med.org

EID Méditerranée

Pôle Littoral

165 avenue Paul Rimbaud

34 184 Montpellier Cedex 4

www.eid-med.org

Le pôle littoral de l'EID Méditerranée réalise le suivi morphologique de nombreux sites littoraux sur toute la Méditerranée française depuis plus de 20 ans. Il s'agit de monitoring des plages avec des moyens terrestres et nautiques (topo-bathymétrie), des moyens aéroportés (imagerie drone) ainsi que des données des satellites qui permettent de poser des diagnostics qualitatifs et quantitatifs quant à l'évolution du littoral et ses différents milieux. Le pôle d'étude apporte aujourd'hui une expertise complète permettant de comprendre l'évolution des fonds sableux, des plages et des dunes, des herbiers et fonds rocheux, et expliquer l'évolution de ces milieux avec les événements météo-marins ou les interventions de l'Homme sur le littoral (divers aménagements).

Les connaissances scientifiques et techniques accumulées sur cet espace constituent aujourd'hui un capital mis à disposition des collectivités territoriales et des établissements publics. Le Pôle Littoral est ainsi en mesure de concevoir et proposer aux gestionnaires 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.



Référence à utiliser pour toute citation du document
GERVAIS M., HEURTEFEUX H., RICHARD P., 2020. Actualisation des connaissances sur l'érosion de la côte Vermeille entre 1942 et 2019 par imagerie satellite très haute résolution – Enquêtes de perception de la population sur l'érosion du littoral du PNMGL. pour le Parc Naturel Marin du Golfe du Lion.

Calanque de l'Ouille © photo EID-Mediterranée 2015 / CD-34

Sommaire

I) Introduction générale 5

II) Site d'étude 8
Les fonds 8
Les cours d'eau et leurs embouchures 12
Principaux ouvrages affectant la dynamique hydro-sédimentaire 13

III) Revue bibliographique sur la dynamique sédimentaire – principaux enseignements 14
Point de vue général 14
Principaux résultats tirés des études EID – CEFREM de 2014 – 2019 23

IV) Analyses préliminaires sur la zone d'étude (physiographie et hydrodynamique) 33
Exposition différenciée des plages de poche 33
Les côtes à falaises 37
Précipitations intenses et fortes crues des torrents depuis 2007 40
Climat moyen et valeurs extrêmes des vagues sur la zone 42
Enregistrement des houles de ces 10 dernières années (houlogramme de Banyuls) 47
Energie par saison hivernale et secteur d'incidence des vagues 51
Problématique initiale de l'étude sur le rôle des forçages 52

V) Actualisation des connaissances sur l'érosion des plages de la côte rocheuse 53
Méthodologie 53
Résultats généraux sur l'ensemble du site d'étude 57
Résultats par cellule sédimentaire et par plage 64

VI) Conclusion 169

VII) Bibliographie 170

Rappel : rendu année 1

- Revue bibliographique
- Ré-analyses des données existantes pour décrire le fonctionnement hydro-sédimentaire des plages de la côte rocheuse
- Digitalisation et interprétation des nouveaux traits de côte sur les plages de poche entre Cerbère et le Racou pour la période 2009-2018, ainsi que pour la période ancienne (quelques dates très anciennes pour apporter une perspective long-terme aux observations récentes).
- Inventaire des travaux et des modes de gestions sur chacun des sites principaux de la côte Vermeille, en particulier au niveau des plages urbaines
- Rapport de synthèse sur le fonctionnement hydro-sédimentaire des sites accompagné d'une cartographie des mouvements du trait de côte sur deux périodes représentatives pour chaque site (ex. : 1942 – 2009 et 2009-2018)
- Représentation graphique et cartographie régionale de la côte vermeille et des reculs/avancées moyennes du trait de côte ainsi que les gains/pertes de surface de plage.

année 1				année 2			
Analyse bibliographique de l'érosion sur la côte vermeille et des enquêtes déjà réalisées	Bilan des principales interventions (travaux) sur le littoral						
Digitalisation des traits de côte et cartographie érosion trait de côte 1:25000 (42-09 ; 09-18)	Représentation cartographique			Digitalisation nouveaux TDC 2019-2021	Cartographie de l'aléa érosion à l'horizon 2030 si mouvement du rivage significatif		
	bilan du fonctionnement hydro-sédimentaire actuel				Impact d'une tempête sur l'évolution annuelle du trait de côte		
Mise en place des questionnaires	choix des 3 sites à enquêter	Enquête de terrain sur les plages fréquentées par les locaux				Restitutions des enquêtes de perception	
	Rapport					Rapport	
		Réunion d'avancement					Réunion de restitution

Tableau 1 : calendrier décrivant les grandes étapes du projet sur une durée de 2 ans

I) Introduction générale

Le déplacement du trait de côte est un indicateur simple mais efficace pour estimer l'érosion du littoral et comprendre la dynamique générale du sable à une échelle pluriannuelle (10 ans). Même si cet indicateur ne donne pas accès directement aux volumes de sables ou de galets perdus ou gagnés sur une plage, il demeure une variable accessible facilement et à grande échelle grâce aux images aériennes et satellites prises par temps de mer calme. La position de ce trait de côte est ici la zone de contact terre-mer en l'absence d'agitation marine. En Méditerranée, cette interface est représentative d'une élévation proche de 0 m car la marée est très faible, tout particulièrement dans le Golfe du Lion que nous étudions (niveau marin = 0,1 m NGF en moyenne). La surface de plage qui est au-dessus de cette limite est considérée comme le domaine émergé du littoral, et une diminution de cette surface fait écho très souvent à une perte de volume sableux vers la zone immergée.

Suite au projet SENVISAT (2016-2020), le Parc Naturel Marin du Golfe du Lion (PNMGL) et le Pôle Littoral de l'Entente Interdépartementale pour la Démoustication (EID) ont décidé de poursuivre dans cette voie de l'utilisation des images aériennes et satellites de très haute résolution (provenant essentiellement du dispositif Pléiades) pour essayer d'investir davantage la compréhension des mouvements du littoral. La présente étude porte sur les risques d'érosion et de submersion sur la côte rocheuse des Pyrénées-Orientales, appelée côte Vermeille. Cette portion du littoral n'est pour le moment suivie que secondairement par l'Observatoire de la Côte Catalane (OBSCAT), qui se concentre sur les communes de la côte sableuse entre Argelès et Leucate, et où il est vrai, les mouvements du trait de côte ont été nettement plus conséquents depuis de nombreuses décennies (révélés par les cartes d'état-major, puis images aériennes). Toutefois, les risques littoraux touchent également, et parfois lourdement, la côte Vermeille. En effet, il n'est pas rare que cette portion du littoral essuie de très fortes houles et parfois des épisodes d'érosion des petites plages situées au fond des baies et des criques, épisodes peu documentés par la communauté scientifique. Sur les fronts de mer urbanisés, les tempêtes de ces 30 dernières années ont généré à plusieurs reprises des dégâts sur les digues et baladoirs situés en front de mer. Enfin cette côte est soumise au risque d'éboulement et de chutes de blocs depuis les falaises et escarpements côtiers qui surplombent parfois des lieux de promenades et des plages, ou supportent des chemins de randonnée tels que le sentier du littoral.

Ce projet s'inscrit parfaitement dans la démarche "ambition littoral" portée par le Parc Marin, en particulier afin de compléter les travaux déjà présentés lors de "l'atelier connaissance" du 19 avril 2019. Les phases ultérieures du projet seront la sensibilisation, la gouvernance et la prospective sur le territoire. Il est donc fondamental de mieux connaitre l'érosion à l'œuvre sur le territoire, d'assimiler de manière claire les principales problématiques sectorielles, et de connaitre la perception de la population.



Figure 1 : site des criques de Porteils au début des années 1970, montrant le paysage typique des vignes en terrasses, encore parfaitement d'actualité sur ce secteur géographique (© DREAL)

Du point de vue géomorphologique, selon la bibliographie, les roches qui constituent le relief des Albères et *in-fine* les falaises côtières de la côte Vermeille, sont des roches cristallines ou cristallophylliennes fortement métamorphiques, datant du Paléozoïque (ère primaire, de 500 à 540 Ma). Ce sont des formations rocheuses sédimentaires cambriennes de schiste et de micaschistes (LNH, SOGREAH, 1984 ; CEPREL, 1995). Ces roches sont relativement friables et tendres.



Figure 2 : illustration d'un épisode de fortes vagues sur les criques naturelles de la côte rocheuse (Paulilles le 18 février 2007 ; © EID Méditerranée)

Les falaises sont rarement totalement verticales du fait des éboulements, et le paysage montre une alternance de baies à la terminaison d'incisions des reliefs par des talwegs. En mer, les fonds présentent de nombreux **rochers** imposants, éboulés et arrachés aux falaises, **mais aussi de grandes surfaces de fonds sableux**. Les plages sont constituées de sables grossiers et de galets, provenant d'apports locaux. Le plateau continental est particulièrement étroit sur cette zone du golfe du Lion, en général inférieur à 20 km. La pente de l'avant-côte est relativement forte sur l'ensemble de la côte rocheuse : 11 à 12 % au Cap Cerbère, jusqu'à des fonds de 20 mètres. Cette pente diminue

ensuite à l'approche de la côte sableuse : elle n'est plus que de 1 à 2 % à Argelès (agence de l'eau RMC et UPVD/CEFREM, 2000).

Comme il est observé de manière universelle, la quarantaine de plages de la côte rocheuse se localise dans les parties rentrantes, les baies relativement protégées de la côte rocheuse, et sont pour la plupart tournées vers le nord ou l'est. Ces plages font donc face aux houles dominantes, et la plupart est protégée du vent clairement dominant dans la région : la Tramontane, d'origine ouest à nord-nord-ouest, ce qui leur donne d'autant plus d'attrait pour la baignade. Ces plages sont entourées par les nombreux caps qui jalonnent la côte, et par conséquent, les houles qui atteignent la plage ont au préalable subi des effets importants de réfraction et diffraction.



Figure 3 : Illustration des impacts des très fortes tempêtes sur les zones urbanisées de la côte Vermeille (A. Cerbère lors de la rupture totale de la digue en décembre 2008 ; B. Cerbère dernièrement lors de la tempête Gloria en janvier 2020 ; et C. le même jour à Collioure)

II) Site d'étude

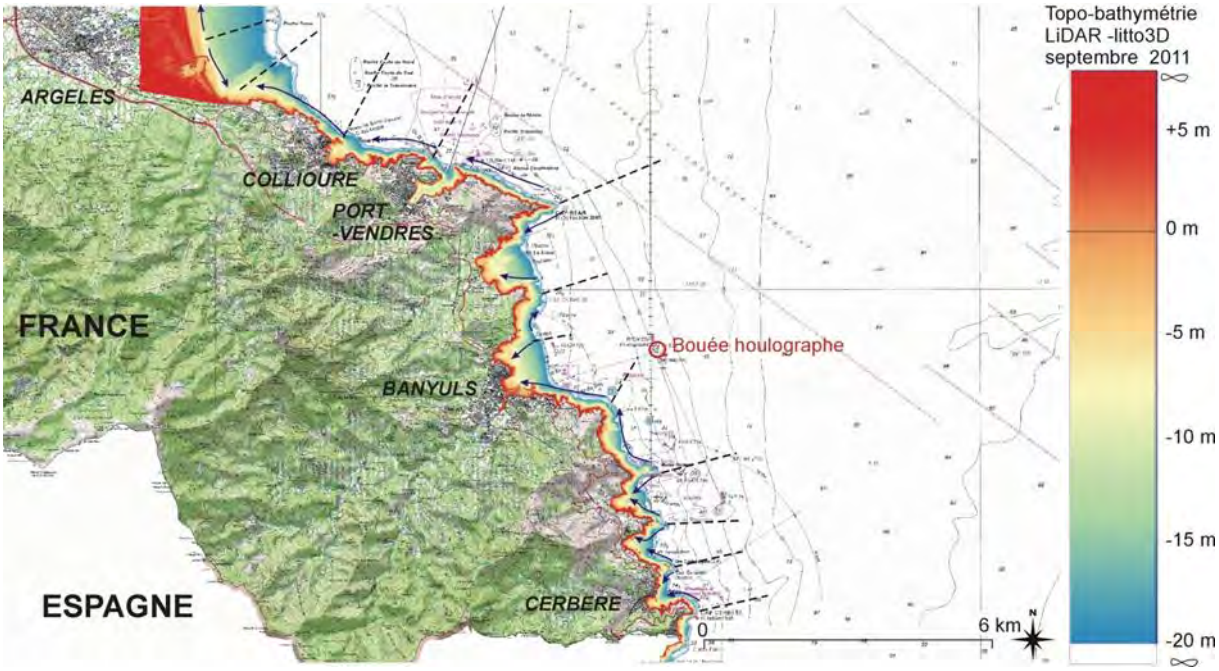


Figure 4 : site d'étude. D'après une analyse de la bathymétrie et des directions des fortes houles, une expertise est ici faite des différentes cellules sédimentaires dont les limites sont indiquées par des traits noirs en pointillés. Dans ces cellules, les sédiments non cohésifs (sable-gravier) ont la possibilité de se déplacer sur les fonds entre 0 et -15 m selon les directions des courants de dérive indiquées ici par des flèches bleues (circulation côtière lors des tempêtes marines les plus fortes qui sont habituellement accompagnée de houles d'E-SE).

Les fonds

Comme le montre la carte de la Figure 4, le site d'étude s'étend géographiquement entre la plage du Racou, au sud du port d'Argelès, et la frontière espagnole, au sud de la ville de Cerbère. La plage du Racou marque l'extrémité sud de la côte sableuse, mais est marquée par une contre-dérive littorale orientée vers le sud. D'un point de vue sédimentaire elle est donc potentiellement connectée aux anses rocheuses voisines de Porteils, c'est pourquoi elle est intégrée à cette étude.

La Figure 4 montre que les fonds sont beaucoup plus raides sur la côte rocheuse que sur la côte sableuse. En conséquent, les houles viennent frapper sans frein préalable les zones exposées de la côte rocheuse, tels que les caps ou les baies sableuses tournées vers l'est ou le sud-est, qui sont les directions d'origine des fortes houles dites "marines" dans la région (en comparaison des houles moins énergétiques mais plus fréquentes liées à la Tramontane).

A la différence d'un simple découpage des secteurs en fonction d'une opposition entre les escarpements rocheux et les petites plages sableuses, dans lequel chaque plage d'une baie est indépendante de l'autre et de ses zones rocheuses adjacentes, cette étude propose en Figure 4, et pour la suite du projet, une nouvelle vision des choses basée sur un **découpage en cellules hydro-sédimentaires littorales.**

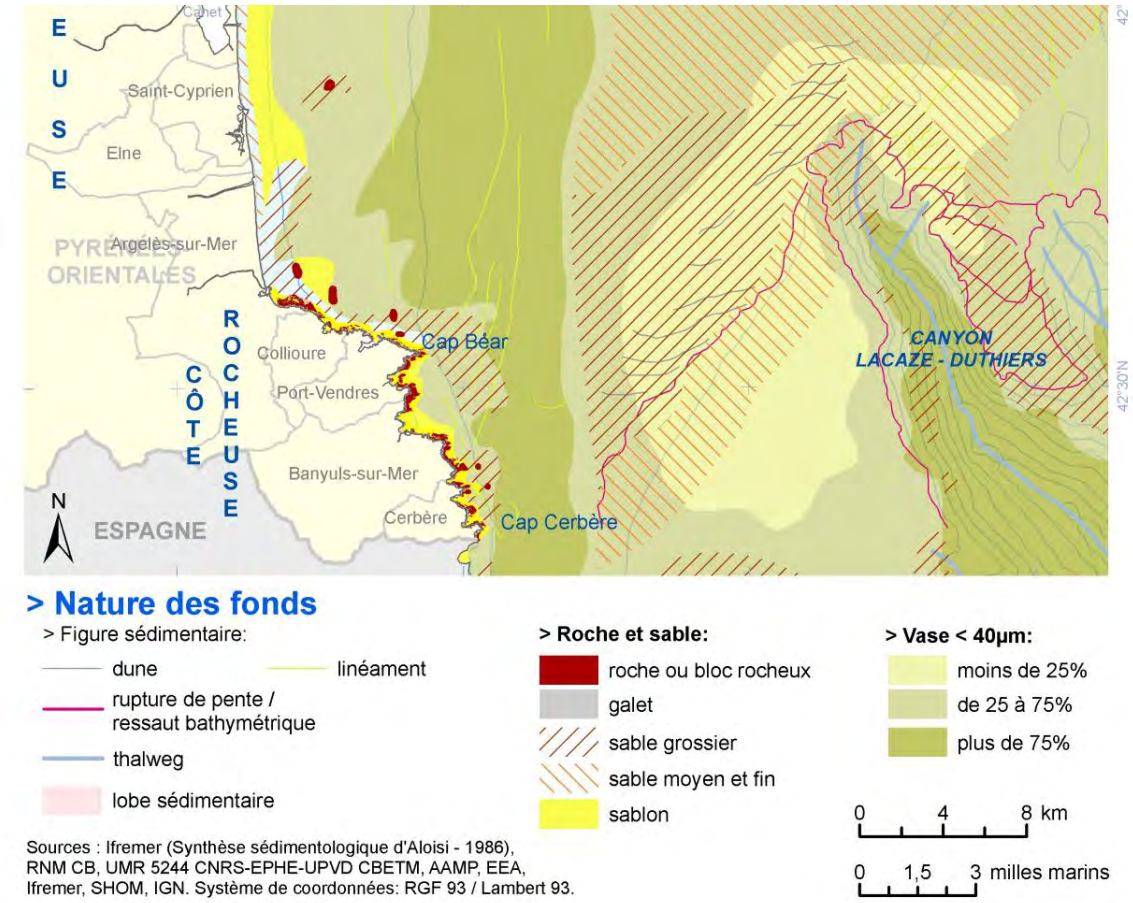


Figure 5 : extrait de la carte de la nature des fonds du PNMGL (http://www.parc-marin-golfe-lion.fr/lespace-marin/cartotheque.html) issue des données d'imagerie/sonar des campagnes océanographiques de l'Ifremer

En effet, de simples plongées montrent qu'une grande partie des fonds devant les criques rocheuses sont constitués d'un mélange de zones sableuses et de rochers (éboulés des falaises ou dits "en place", issus du socle). Ce matériel détritique est très présents sur les fonds entre 0 et -25 m, comme le montre la carte de la nature des fonds en Figure 5 (cf. limite des sablons en jaune ; les sablons sont des sables fins de diamètres > 0,020 mm). Ces sables sur l'avant-côte n'ont pas l'aspect cohésif des vases, et peuvent se déplacer librement dans leur cellule au gré des courants induits par les houles.

Ainsi, cette étude part de l'hypothèse que le volume de sable et de galets de chaque plage de poche est un stock dont le déplacement est certes fortement entravé par les caps et les petits pointements rocheux qui les bordent, mais que néanmoins**, épisodiquement lors de très fortes tempêtes, il est possible qu'une partie du sédiment puisse se déplacer entre la plage émergée et la partie sous-marine**.



Figure 6 : image © Google Earth des criques de Porteils datée du 29 juin 2015, montrant clairement la présence de sable dans les petits fonds (0 à -5 m), visibles entre les dalles rocheuses et les herbiers de posidonie



Figure 7 : illustration du débouché de la Baillaury dans l'anse du Fontaulé à Banyuls (© photos-hedelin.com prise le 26 septembre 2019 pour le compte du PNMGL). La transparence de l'eau rend visible la présence de sable sur le fond.



Figure 8 : photographie aérienne (EID-Méditerranée) des anses de Paulilles (à gauche) et de Bernardi (à droite), montrant le mélange de sable et de rochers sur ce site, dont une barre sableuse d'avant-côte présente sur cette dernière (cf. le banc de sable en partie sous-marine devant la baie à droite de l'image).



Figure 9 : photo de la calanque de l'Ouille et de l'embouchure très dynamique du Ravaner qui bouge fortement avec les épisodes de crues (photo du 17 mai 2013 © EID)

Les cours d'eau et leurs embouchures

Les torrents et petits fleuves côtiers présents sur la zone sont (les 3 principaux **en gras**) :

- La **Massane**, d'un parcours de 22,1 km, dont l'embouchure se trouve aujourd'hui être le port d'Argelès-Sur-Mer
- Le **Ravaner** qui débouche après 11,3 km dans l'anse de l'Ouille
- El Douy, arrive en baie de Collioure, ainsi que le petit torrent le "Coma Chéric"
- El Correc Dell Vall de Pintes débouche en baie de Port Vendres
- El Correc d'Oliva de Rama termine sa course sur la plage du Bernardi (nord Paulilles)
- El Rec de Cosprons arrive sur la plage centrale de Paulilles
- La **Baillaury** a son embouchure dans l'anse du Fontaulé au centre-ville de Banyuls-sur-Mer
- El Rec de Tallalauca arrive sur la petite plage du Troc entre Banyuls et le Cap de l'Abeille
- El Rec de la Torrassa termine sa course sur la plage de Peyrefite au nord de Cerbère
- Enfin, El Riberal sort, à travers un canal sous-terrain dans l'anse du centre-ville de Cerbère

L'autre constat de départ concerne les cours d'eau, puisqu'il peut être remarqué que les plages de fond de baies les plus "nourries" en sable, c'est-à-dire les plages les plus larges, sont celles qui coïncident avec les débouchés de petits fleuves côtiers dont le fonctionnement purement torrentiel peut devenir un convoyeur important de sédiment lors d'un épisode météorologique méditerranéen de fortes pluies. A ce titre, la Baillaury qui débouche dans la baie de Banyuls a dû participer à nourrir la plage du Fontaulé en galets et graviers, cela de manière progressive, à l'échelle de plusieurs millénaires. Il en est certainement de même pour Le Ravaner qui débouche plus au nord sur la plage de l'Ouille. A la limite de la côte sableuse, la Massane a indéniablement participé au rechargement régulier en sable de la plage du Racou par le passé. Ce fleuve a aujourd'hui son exutoire dans la marina du port d'Argelès sur Mer, et sa contribution aux apports sédimentaire est nulle.

Un premier regard sur la géomorphologie de la côte Vermeille révèle une alternance de caps rocheux et de petites plages "de poche" (terme consacré pour les plages coincées dans des baies). L'avant-côte n'est pas uniquement rocheuse et de grandes quantités de sables connectent parfois les plages voisines entre elles. Cette connexion est parfois très faible, toutefois un découpage de la côte rocheuse en "cellule sédimentaire" est proposé ici.

Cette côte est soumise à des tempêtes violentes et donc indéniablement sujette à une dynamique sédimentaire très active. De plus, beaucoup de baies se trouvent au débouché d'un torrent ou d'un petit fleuve côtier dont le fonctionnement hydrologique est purement méditerranéen, avec de très fortes crues, qui participent activement à cette dynamique sédimentaire (et à de nouveaux apports ?).

Principaux ouvrages affectant la dynamique hydro-sédimentaire

Une liste des ouvrages en enrochements de la côte Vermeille a été réalisée par le CEFREM en 2011 dans le cadre du travail pour la DREAL pour le "plan de gestion des sédiments en Languedoc-Roussillon" (Tableau 2).

n°	Commune	Lieu-dit	Nature - Type	Dimension	Date	Date 2	Date 3
3015	Cerbère	Plage del Saurel	Digue - Port abri	100 m	1976	1979, 1998, 2003	2010
15398	Banyuls-sur-Mer	Port	digue de l'Ile Grosse (Est)	100m	1871		
15422	Banyuls-sur-Mer	Port	éperon Nord Ile Grosse	54m	1891		
15425	Banyuls-sur-Mer	Port	Jetée Est-Ouest	250m	1968		
15721	Banyuls-sur-Mer	Port	Epi - Ile Petite	150m	1968		
15763	Banyuls-sur-Mer	Plage	Éperon-Ile Petite	360m	????		
29376	Port-Vendres	Port Commerce, pêche et plaisance	Port - Jetée Sud	230m	1846-53, 1856-61	1863-65, 1868, 1884	2009-2010
36047	Collioure	Anse de la Balette - rav. Coumacherie	Port abri - éperon Nord	20m	1882		
36065	Collioure	Anse de la Balette - rav. Coumacherie	Port abri - éperon Ouest	20m	1882		
36052	Collioure	Anse de la Balette - rav. Coumacherie	Port abri - Quai Ouest	60m	????		
36217	Collioure	Ile St-Vincent	éperon sur mur-jetée Est	30m	????		
36229	Collioure	Château Royal	Passage au pied du Château	3km	1876-80		
37111	Collioure	Château Royal	Ravin du Douy - digue Nord	150m	1866		
37019	Collioure	Eglise St-Vincent	Eperon	40m	1893		
37022	Collioure	Eglise et Ile St-Vincent	Mur-jetée	90m	1882-85		
37085	Collioure	Ile St-Vincent	Mur-jetée Est	125m	1882-85		
42135	Argeles-sur-Mer	Port	éperon (sur jetée Sud)	50m	1976		
42135	Argeles-sur-Mer	Port	Digue Sud	300m	1976		
42500	Argeles-sur-Mer	Port	Digue Nord	350m	1976		

Tableau 2 : liste des ouvrages de protection côtière de Cerbère à Saint Cyprien. Les ouvrages en vert correspondent aux zones portuaires (données DREAL-LR, rapport CEFREM, Raynal et al., 2011 pour l'élaboration plan de gestion des sédiments de 2011, Phase A1 du projet)

Cette liste peut être mise à jour avec les éléments suivants :

- l'épi anti-retour de la plage de Banyuls, construit entre 1985 et 1987
- d'après les ortho-images historiques de l'IGN, la digue de Cerbère a été construite plus tôt, entre 1972 et 1974, et non en 1976

Peu d'ouvrages sont présents sur les plages de la côte rocheuse à l'exception des digues portuaires, des murets et des baladoirs de cœur de villes (Collioure, Port-Vendres, Banyuls et Cerbère). La majorité des plages possède un muret de haut de plage ou une falaise, réflective lors des plus fortes tempêtes et épisodes de submersion (cf. description dans le rapport de l'EID, 2014).

III) Revue bibliographique sur la dynamique sédimentaire – principaux enseignements

Point de vue général

Concernant les mouvements du rivage sableux, l'indicateur national d'érosion côtière du Cerema (2015, Figure 10) indique que **les déplacements long-terme du trait de côte sont en grande majorité très faibles sur la zone**. Sur quelques plages, dont celles de Paulilles, et sur toutes les zones purement rocheuses, ils sont classés comme "non-perceptibles" (très proches de 0 m/an) sur 69 ans. Cependant, il est indiqué que la plage de l'Ouille, de Peyrefite et du Minerai (à la frontière espagnole, non étudiée ici) subissent une érosion lente, mais notable. A l'opposé, la plage du centre de Banyuls (anse du Fontaulé) se serait légèrement élargie.

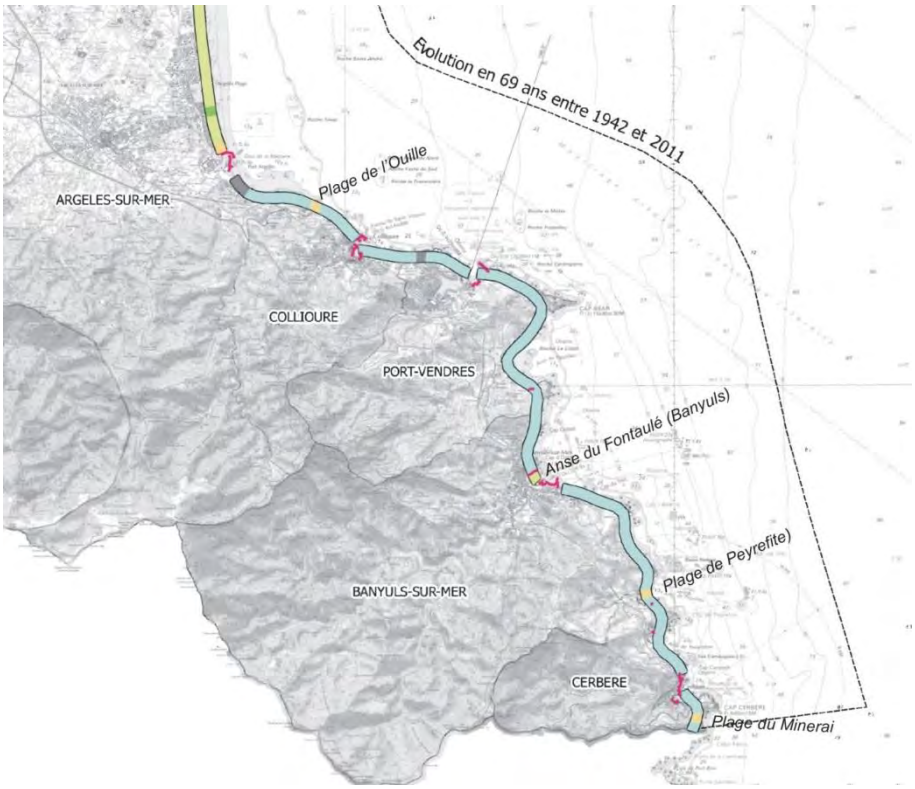
Contrairement à la côte sableuse, la dynamique hydro-sédimentaire de la côte rocheuse n'est pas étudiée très fréquemment par les organismes scientifiques et les bureaux d'études. Un observatoire océanologique existe à Banyuls, mais ses axes d'études et de recherche sont davantage en lien avec l'observation de la biologie marine, de la géochimie des eaux et de la biodiversité planctonique. Sur la côte rocheuse, les bureaux d'études ont essentiellement accompagné les collectivités dans la construction d'ouvrages en mer via des calculs et des modélisations pour la construction et le dimensionnement de digues. Ce type d'étude permet d'étudier la propagation des vagues dans les baies urbanisées avec leurs ports, mais se préoccupe généralement moins de la dynamique sédimentaire.

La déclinaison régionale de la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte (SRGITC ; DREAL-Occitanie, 2018) traite également de la côte rocheuse. Il y est décrit que les plages concernées sont relativement stables et que l'essentiel du stock de sable se trouve sur la zone émergée qui est isolée sur chaque plage de baie. Cette vision des phénomènes semble limitée, et à l'issue de nos recherches et de ce travail, un peu réductrice. Au regard de la dynamique littorale et des risques, le document de la SRGITC se base sur les travaux de l'EID de 2014 qui constatent que les plages sont globalement stables à la différence de la côte sableuse.

Les objectifs principaux et la stratégie qui ressortent de ce document sont :

- préserver la dynamique sédimentaire naturelle des plages de la côte rocheuse
- limiter l'artificialisation et le mitage de la zone côtière pour garder l'effet résilient des plages de la côte rocheuse. **Un protocole de suivi annuel par image satellite et image aérienne ou oblique est décrit comme important sur cette portion de littoral.**

Selon la SRGITC, les interventions humaines sur les plages sont "principalement du reprofilage effectué par les communes avant la saison estivale. Les plages reprofilées sont les plus fréquentées, systématiques en zone urbaine (Collioure : plages de la Ville et du Faubourg, Banyuls : Fontaulé, les Elmes, le Sanatorium, Cerbère : Peyrefite et plage de la Ville). La plupart du temps, il s'agit de reprendre au printemps les matériaux accumulés contre les murs de fond de plage".



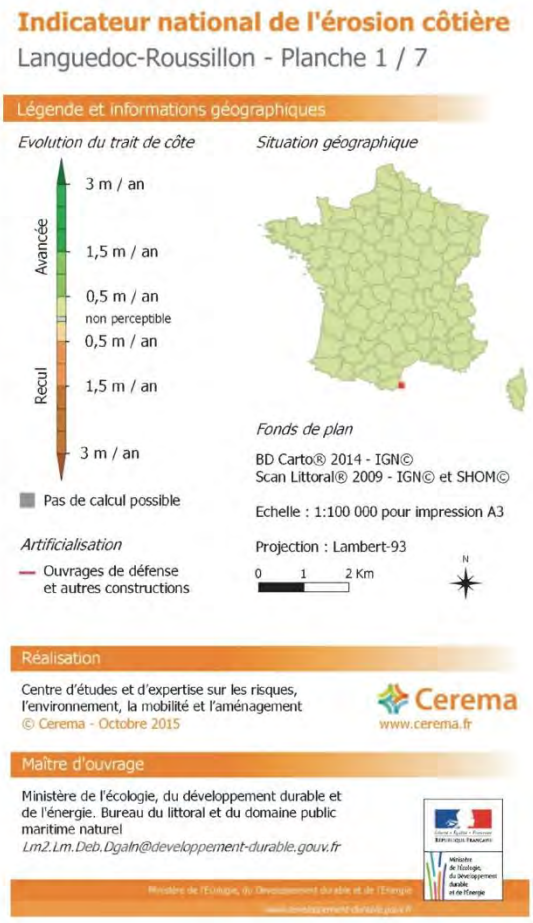


Figure 10 : extrait de l'indice national de l'érosion du trait de côte, montrant le peu de mouvements à l'échelle pluridécennale (69 ans) du trait de côte, à l'exclusion de quelques "plages de poche" dont le nom a ici été indiqué.

D'après l'ancien ouvrage du LNH et SOGREAH (et autres collaborateurs ; 1984) : "cette partie de la côte n'a pas subi de modifications sensibles depuis les temps historiques. Seules quelques baies importantes où débouche un cours d'eau sont encore l'objet d'un comblement lent par les alluvions". De nombreux éléments montrent que les parties rocheuses de la côte ne reculent pas, ou alors très lentement (pas de platiers, blocs éboulés encore en place, cônes d'éboulis végétalisés). Selon l'EID (2014), la côte rocheuse évolue plutôt par le haut que par le bas avec des épisodes de recul des falaises,… la mer se contente de remanier les sédiments en place (déplacements, roulage, polissage).

Les grands documents nationaux sur l'érosion montrent qu'en comparaison de la côte sableuse du golfe du Lion, le trait de côte des plages sableuses (graviers/galets) des baies de la côte Vermeille est stable. Les falaises sont également très stables dans le temps. Toutefois un suivi régulier est préconisé en raison des enjeux présents et des risques présents, d'une forte dynamique naturelle et des interventions humaines (digues de port, murets, et reprofilage essentiellement).

Le rapport de stage de Master II de P. Richard, fait au département de Géographie de l'Université de Perpignan en 1993 avec le CEPREL (ancien bureau d'étude sur le littoral qui sera assimilé plus tard à l'EID), est certainement l'ouvrage le plus complet, peut-être avec l'étude de l'EID de 2014, quant à la description du paysage des plages de la côte rocheuse. Le travail se base sur de très nombreuses observations de terrain et un imposant travail de remontée d'archives. Ce rapport montre qu'au moins 42 plages peuvent être comptabilisées sur la côte rocheuse, et que chacune d'entre elles est le résultat d'une histoire souvent complexe. Cette histoire prouve l'importance de la géologie que l'on retrouve aussi en mer sur l'avant-côte (qui influence la plage) ; de l'altération des roches présentes qui sont de deux types (il est à ce titre décrit l'importance du processus d'alvéolisation des schistes des falaises côtières par le sel) ; de l'hydrologie et du découpage des principaux fleuves et torrents ; des apports par l'érosion des talus ou falaises naturels de haut de plage ; de l'exposition aux houles… Par ailleurs l'ouvrage décrit les interventions successives de l'Homme depuis le XIXème siècle (au moins) avec des modifications des principales baies où se trouvent les villes actuelles, impliquant la construction de digues, de creusement de ports, de remblais pour construire des lotissement en comblant des petits ravins…

Ce rapport comprend de nombreuses observations sur la dynamique saisonnière des différentes fractions de bancs de galets et sédiments plus fins sur la plage, mais aussi des informations sur les modes de gestions des plages à cette époque (rechargements, reprofilages, nivellement,...), éléments qui seront rappelées ici dans la description de chaque site.

Si les données bathymétriques sur la zone sont très limitées, plusieurs comparaisons ont été faites sur la zone du Racou où davantage de données existent. Une comparaison des bathymétries historiques du SHOM a été réalisée dans la thèse de Brunel de 2010 (Figure 11).

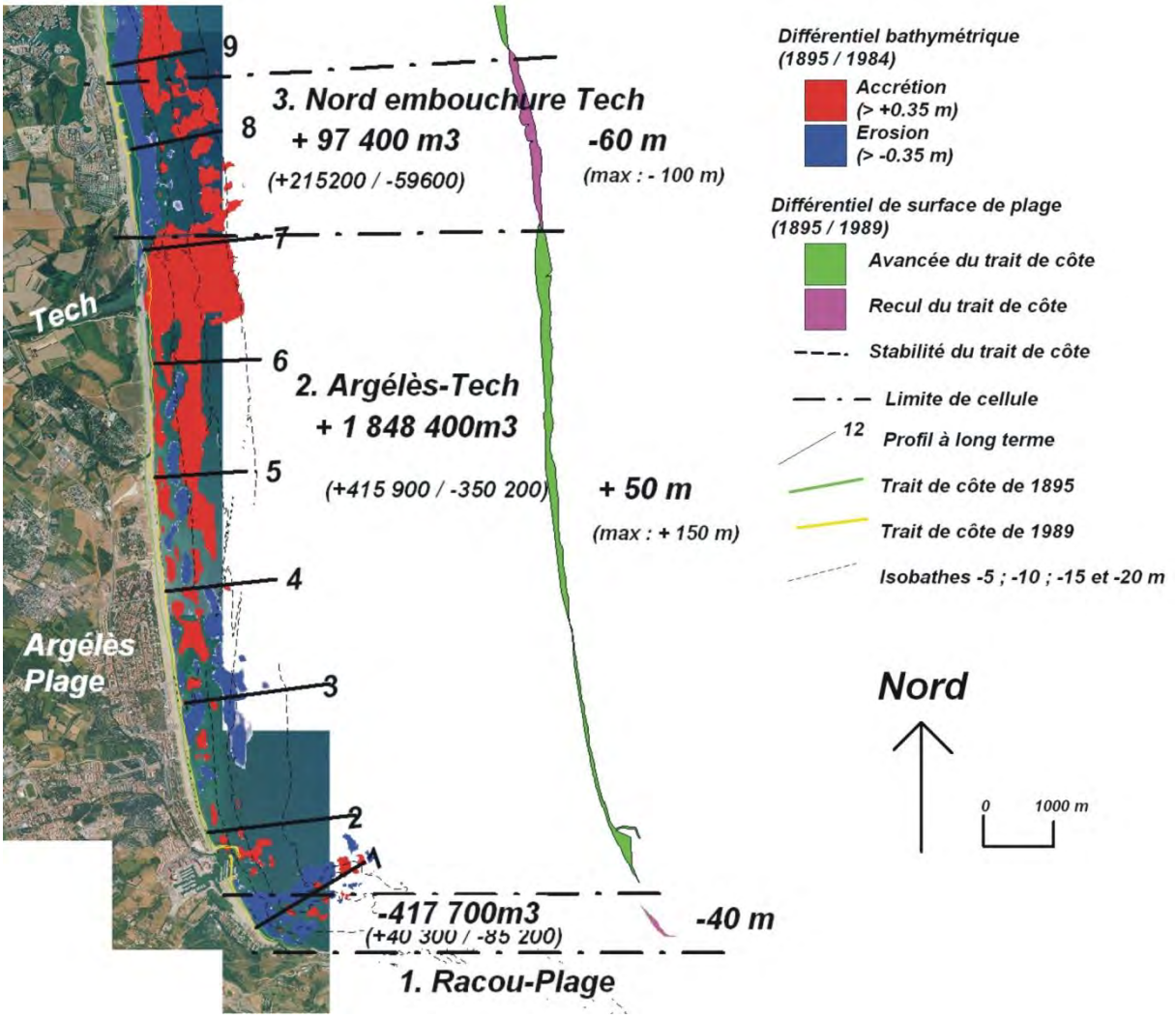


Figure 11 : comparaison des données bathymétriques anciennes du SHOM entre 1895 et 1984 réalisé par Brunel, 2010.

Cette cartographie montre que les fonds se sont affaissés et donc appauvris en sable devant le Racou au cours du siècle dernier (hormis sur certains points au large vers -20 m) et qu'il est fort probable que cet appauvrissement d'environ 4 700 m^3/an soit en lien avec la diminution des apports en sable au niveau de l'embouchure de la Massane et l'export du sable par des courants d'arrachement puissants lors des tempêtes, qui lui aurait continué (Aleman et al., 2019a).

Le CEFREM avance dans son étude sur les pertes au large (projet PAUL : Aleman et al., 2019a) un phénomène de courant d'arrachement vers le large lors des tempêtes, courant contraint par la topographie du substratum rocheux, qui favoriserait ce transport avec des perte de sable vers le large (Figure 12).

Le trait de côte est en recul constant depuis 1895 et les bilans sédimentaires de l'avant-côte sont négatifs, avec -215 000 m^3 (± 23 000 m^3) entre 1984 et 2009 relevés par Raynal et al. (2013), soit près de 8 000 m^3 de sable perdus par an, ce qui tendrait à prouver que l'érosion s'accélère (peut-être du fait de la diminution de l'effet de rechargement par la Massane). Entre 2011 et 2015, la perte a été probablement inférieure d'après la comparaison récente des dernières données LiDAR (Aleman *et al.*, 2019b).

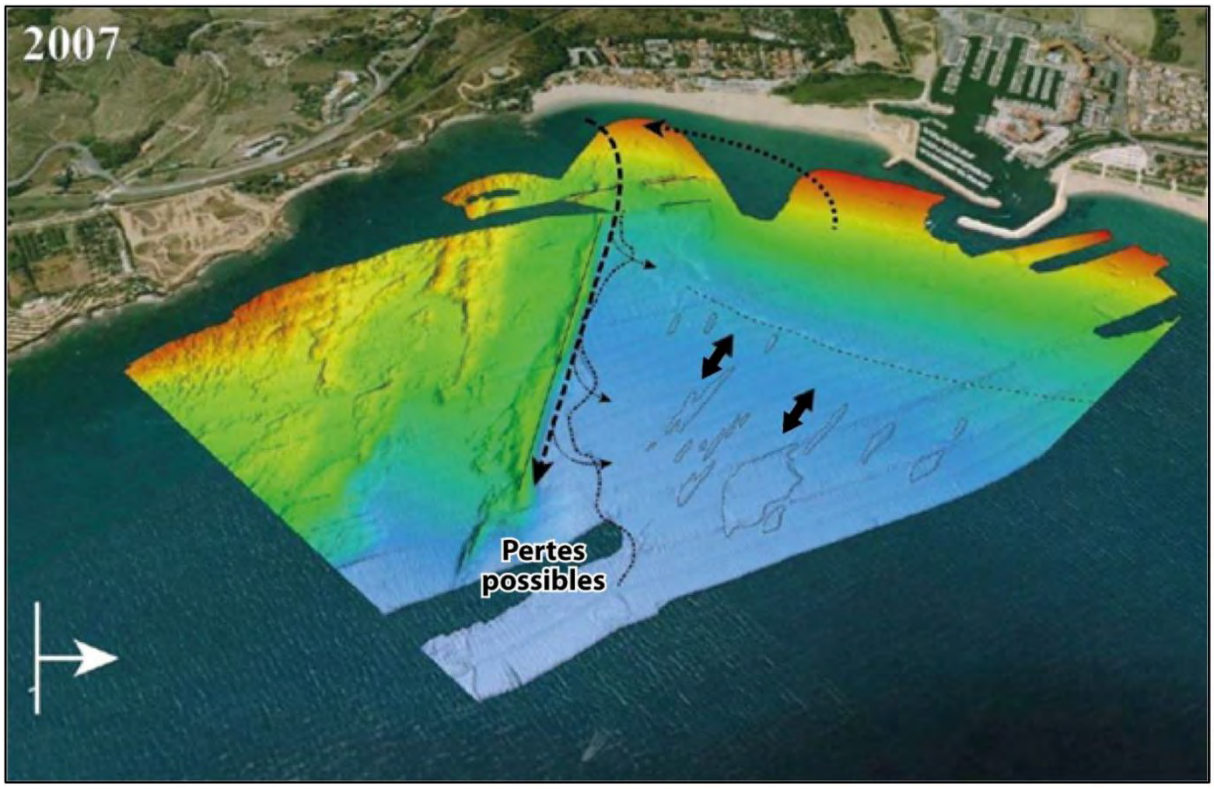


Figure 12 : bathymétrie multifaisceaux de l'avant-côte de la plage du Racou datant de 2007, montrant aussi le plateau rocheux proéminent devant Porteils. Sur cette figure de Pennec (2013), Aleman et al. (2019a) ont indiqué par des flèches les courants côtiers lors des tempêtes avec une dérive littorale qui est déviée au Racou en un courant d'arrachement vers le large, le long des linéaments rocheux ici surlignées en traits droits fins. La flèche blanche à gauche indique l'incidence des houles.

Deux études plus récentes traitent spécifiquement de la morphodynamique à relatif court terme des autres plages de la côte rocheuse :

- l'étude de l'EID de 2014 (Heurtefeux et Lanzellotti) : "Dynamique morphologique des plages de la côte rocheuse des Pyrénées Orientales" (DREAL-Occitanie) ;
- la toute dernière étude du CEFREM (Université de Perpignan) publiée dans le rapport d'étude SENVISAT (étude projet SENVISAT, rapport de phase 1, Aleman et al., 2019c, pour le compte du PNMGL).

Ces deux études s'appuient sur de nombreux levés de terrain : levés topo-bathymétriques, granulométries (étude de l'EID), et suivis de trait de côte, et ces observations permettent de mieux cerner le fonctionnement de certaines plages en montrant une **dynamique saisonnière et évènementielle significative** entre chaque levé.

Liste des données existantes sur la zone :

- LiDAR topographique des étés 2009 et 2015 à la limite avec la côte sableuse (modèle numérique de terrain-MNT relevé par des méthodes de télémétrie laser aéroportée ; projet Litto-3D SHOM/IGN, dans lequel seules les plages du Racou et Porteils sont couvertes en bathymétrie)

- LiDAR topo-bathymétrique de l'été 2011 (données SHOM/IGN/DREAL ; Figure 4)
- Traits de côtes : levés GPS DDTM 66 (juin 2011, octobre 2012), EID (décembre 2012, janvier 2013), et CEFREM (mai et octobre 2017 ; avril et octobre 2018).
- Profils en travers : levés DGPS-sondeur EID réalisés de décembre 2012 à janvier 2013.
- MNT topo-bathymétrique DGPS-sondeur du CEFREM, avec 4 campagnes successives qui couvrent les 3 anses de Paulilles (Bernadi, Paulilles et Fora), ainsi que la plage principale du centre-ville de Banyuls aux printemps et automnes de 2017 et 2018.

La marge d'erreur de ces levés est de +/- 2 m en XY (positionnement plan) sur la localisation du trait de côte, en raison surtout des conditions de surcote météorologique et du niveau marin qui varient d'un jour à l'autre. Les mesures du relief et des profils topo-bathymétriques ont une erreur absolue liée au matériel de mesure et aux opérateurs de +/- 3 cm en topographie et +/- 6 cm en bathymétrie (l'erreur maximale de 6 cm étant observée sur les parties les plus profondes vers -10 m).

Profil 1 : plage du Portell (Porteils)	topographie	22/01/2013	Profil 4 : plage de Paulilles nord	bathymétrie	20/02/2013	Profil 8 : Peyrefite nord	topographie	22/01/2013
	bathymétrie	20/02/2013		topographie	05/04/2013		bathymétrie	20/02/2013
	topographie	05/04/2013	Profil 5 : plage de Paulilles sud	bathymétrie	20/02/2013	Profil 9 : Peyrefite sud	topographie	22/01/2013
Profil 2 : plage de l'Ouille	bathymétrie	20/02/2013		topographie	05/04/2013		bathymétrie	20/02/2013
	topographie	05/04/2013	Profil 6 : plage de Banyuls Fontaulé nord	topographie	22/01/2013	Profil 10 : anse cerbère nord	topographie	22/01/2013
Profil 3 : Collioure	topographie	22/01/2013		bathymétrie	20/02/2013		bathymétrie	20/02/2013
	bathymétrie	20/02/2013	Profil 7 : plage de Banyuls Fontaulé sud	topographie	22/01/2013	Profil 11 : anse cerbère sud	topographie	22/01/2013
	topographie	05/04/2013		bathymétrie	20/02/2013		bathymétrie	20/02/2013

Tableau 3 : liste des levés réalisés par l'EID-Méditerranée pour l'étude spécifique à la côte rocheuse de 2014

		printemps 2017	automne 2017	printemps 2018	automne 2018
Topographie et trait de côte	Bernadi	19/05/2017	03/10/2017	24/04/2018	04/10/2018
	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
Bathymétrie	Bernadi	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

X = levé non disponible

Tableau 4 : liste des levés récents par le CEFREM (2017-2018) pour le projet Senvisat (rapport Aleman et al., 2019c)

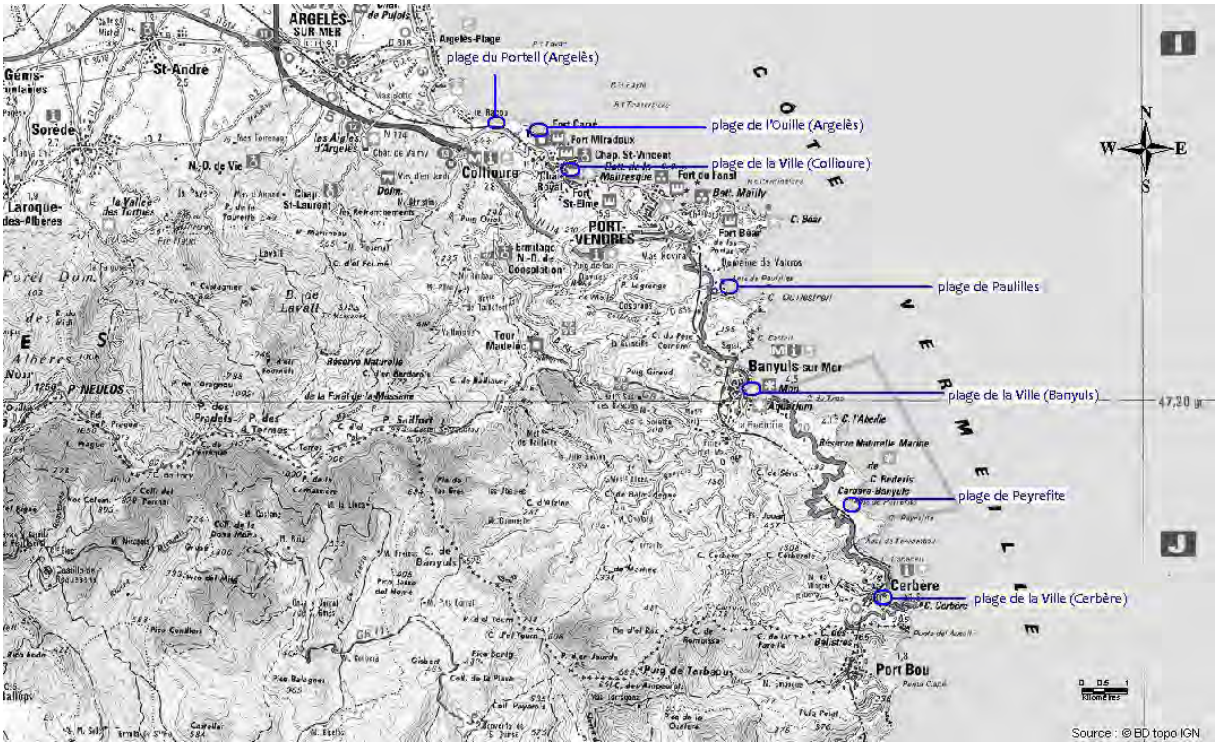


Figure 13 : sites étudiés par l'EID en 2014 avec des suivis du trait de côte, de la topographie et de la granulométrie en plusieurs points du profil de plage (depuis le haut de plage vers la zone mouillée du talus de collision).

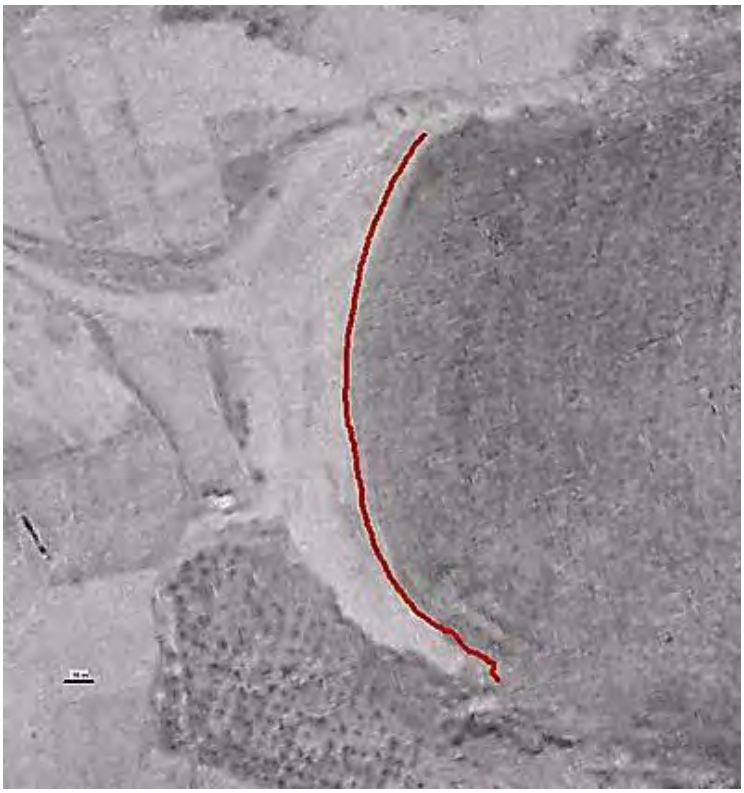


Figure 14 : évolution historique de la Plage de Peyrefite ; trait de côte 2012 (DREAL LR – DDTM66) recalé sur photo aérienne 1942 (EID, 2014)



Figure 15 : exemple des points de mesure d'un suivi MNT de la topographie et bathymétrie complexe des 3 anses de Paulilles (du nord au sud : Bernadi, Paulilles et Fora) par le CEFREM, ici lors de leur campagne de l'automne 2018.

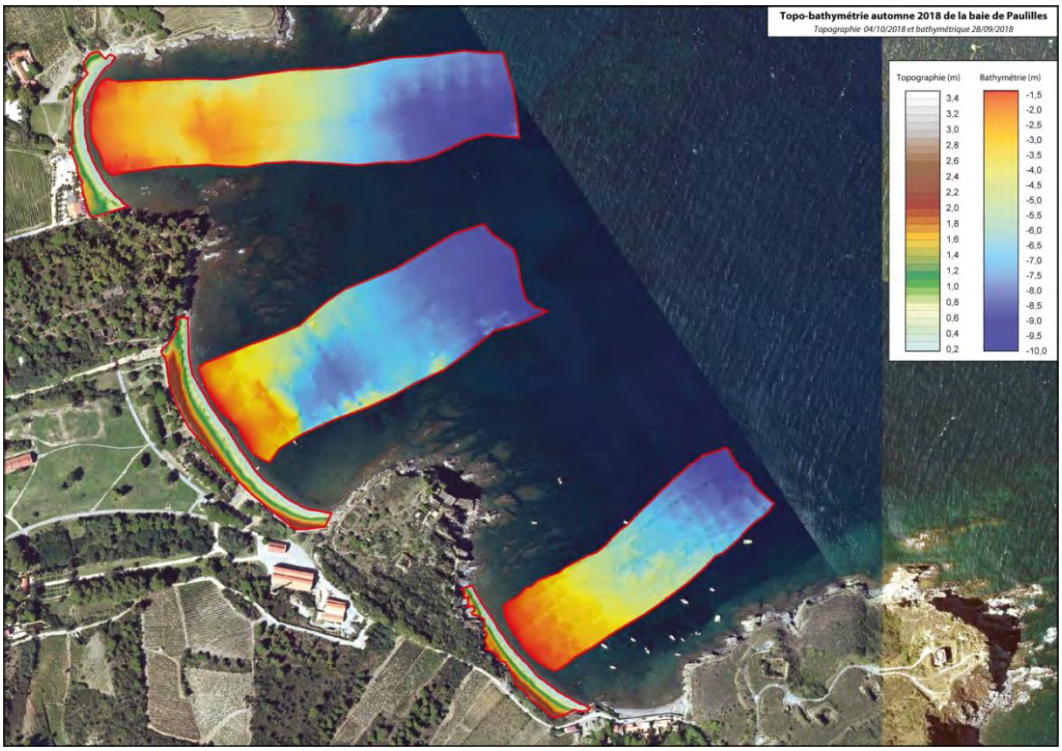


Figure 16 : exemple de représentation en dégradé de couleurs de la topographie et de la bathymétrie de Paulilles (levés automne 2018 - rapport Senvisat, CEFREM-EID, 2019)

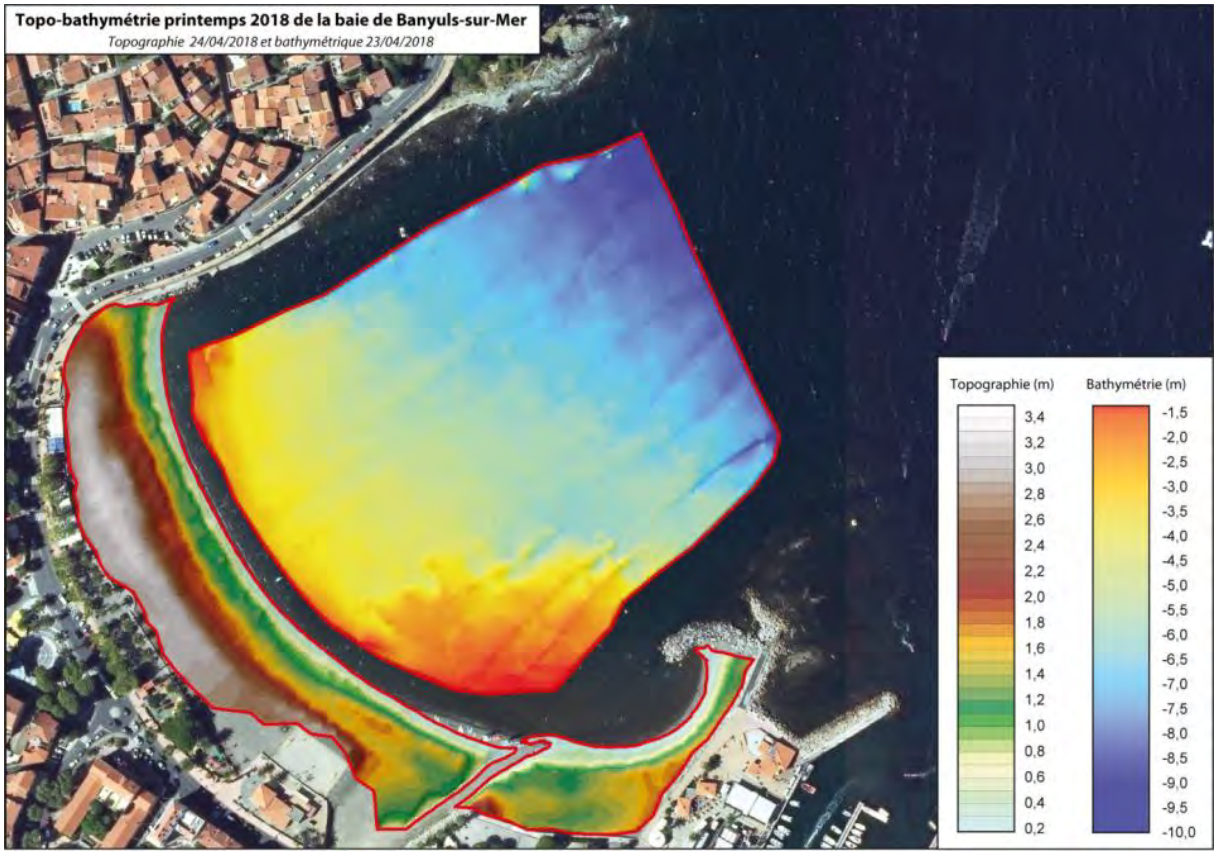


Figure 17 : exemple de topographie et de bathymétrie de la plage de Banyuls (printemps 2018) montrant clairement la trace d'un lobe de delta sous-marin au-devant de l'embouchure de la Baillaury (rapport Senvisat, CEFREM-EID, 2019)

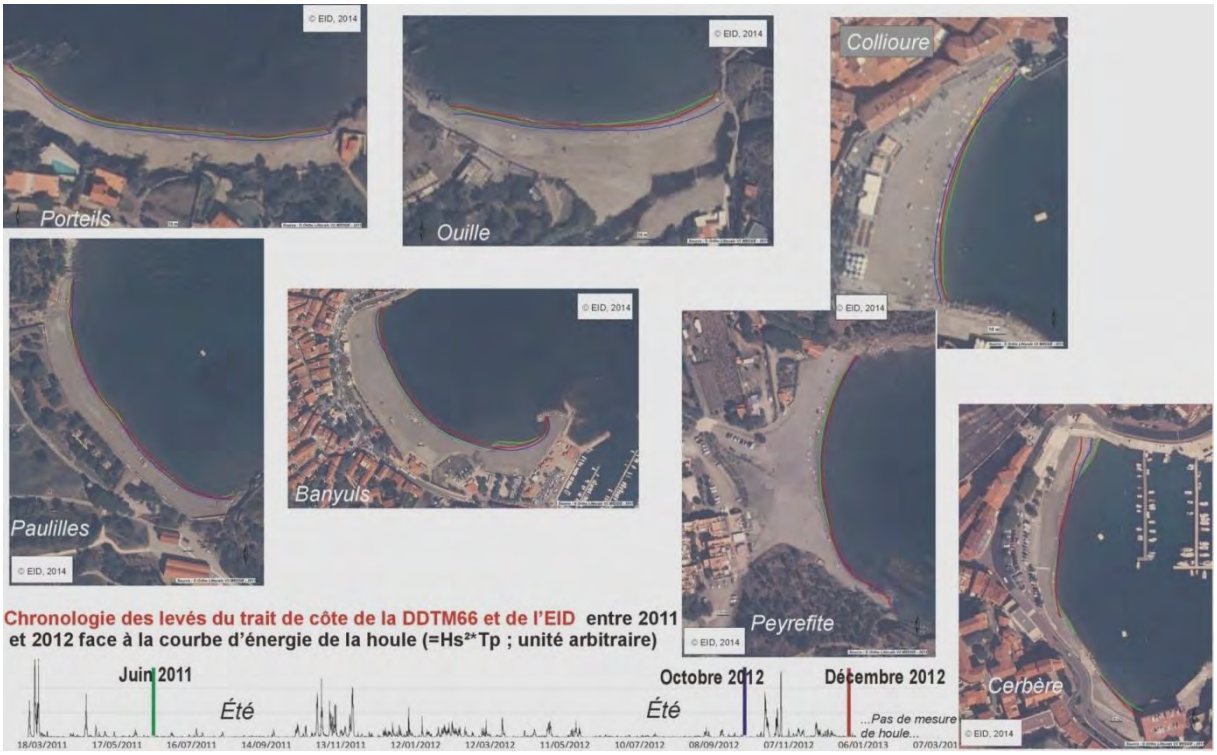


Figure 18 : Illustrations tirées de l'étude EID de la dynamique saisonnière du trait de côte dans les baies de la côte rocheuse entre juin 2011 et fin décembre 2012 (fonds orthophotographies littorales V2 IGN /MEDDE de 2011 ; EID 2014)

Principaux résultats tirés des études EID – CEFREM de 2014 – 2019

EID, 2014

Comme illustré précédemment (Figure 14), l'étude de l'EID de 2014 propose d'abord une comparaison des traits de côte des plages de poche sur une perspective de très long-terme, en confrontant des images aériennes anciennes de 1940-1950 avec des levés réalisés au GPS par le Conseil Départemental des Pyrénées Orientales (CD-66) et la DREAL.

Ces comparaisons sur une durée de 60-70 ans indiquent pour la majorité des cas une étonnante stabilité des plages de la côte rocheuse. L'écart entre le trait de côte des années 1942 ou 1952 est très faible avec celui de 2012. C'est particulièrement frappant sur les plages des anses de Paulilles et de Peyrefite, où les traits de côte semblent pratiquement ne pas avoir bougé.

L'évolution la plus conséquente concerne la plage centrale de Banyuls qui a fortement évolué du fait de la création d'un port et d'une digue séparatrice munie de son épi courbe. Il en est de même avec les aménagements de la baie de Collioure qui semblent avoir fait réduire la largeur de la plage, en plus de l'écourter au sud, au profit des plages de Saint-Vincent. On note par ailleurs une légère avancée de la plage du Sanatorium au nord de Banyuls et de la plage du Portell près du Racou. Toutefois l'importance des déplacements, en général d'une dizaine de mètres, montre la lenteur des phénomènes d'érosion/accrétion sur ces sites, face à la côte sableuse où le littoral a pu se déplacer de 100 m en 70 ans.

L'autre résultat essentiel de cette étude est que l'évolution saisonnière de toutes les plages est bien visible. Comme attendu, les sédiments de ces plages ne sont pas immobiles et des échanges s'opèrent entre la plage émergée et la plage immergée. En comparant les traits de côte de juin 2011, octobre 2012 et décembre 2012 (Figure 18), il s'avère que le trait de côte à l'automne 2012 apparait systématiquement en retrait. Pourtant, ce levé est celui qui fait suite à la période la plus longue en l'absence de forte agitation (voir la courbe de la puissance de la houle en Figure 18). Il est donc possible que, sur la côte rocheuse, à l'inverse des côtes sableuses, les plages soient généralement plus étroites l'été et s'élargissent l'hiver, dans un principe de fonctionnement où les petites vagues remontent les sédiments vers le haut du profil, tandis que les grosses vagues les balayent et les répartissent sur une surface supérieure. On note une dynamique différente, et généralement plus forte au niveau des embouchures, par exemple celle du Ravaner au niveau de la plage de l'Ouille ("le débit de crue du Ravaner peut atteindre 500 m^3/s") ou celle de la Baillaury sur la plage centrale de Banyuls. De nouveau, la plage de Paulilles apparait très stable à cette échelle saisonnière, tout comme Peyrefite. Enfin, on note un comportement étrange d'érosion chronique des extrémités nord des plages de Collioure et de Cerbère sur cette période, peut-être à mettre sur le compte "de l'exposition aux houles pour la partie sud, à l'action du torrent pour la partie nord de Cerbère, mais cela reste à vérifier". **Cette action des cours d'eau est évoquée à plusieurs reprises comme un facteur important** et marquant de la dynamique de la plage tout au long du rapport.

Interprétation des analyses granulométriques des sables (EID, 2014)

Dans cette étude, aucune analyse granulométrique fine n'est réalisée (D50,…), mais les prélèvements sur chacune de ces plages montrent une dominance des sables (diamètre compris entre 0,1 et 1 mm ; 18 échantillons sur 33), puis des graviers (1 à 10 mm ; 10 échantillons). Les points de prélèvement se situent au milieu de la plage, après la berme, sur la berme, et sur la zone immergée du talus de collision (Z ~0,5 m ; Figure 19). Les galets sont plus rares, et l'on trouve également fréquemment de la terre à proximité du débouché des torrents. Il est signalé que sur la grande majorité des sites, les petits fonds au-delà de -0.50 m de profondeur sont composés en grande majorité de matériaux plus grossiers : galets ou même blocs.

Ce résultat, en apparence banal, est essentiel pour comprendre la morphodynamique des plages de la côte Vermeille. En général, les sédiments les plus grossiers d'une plage se trouvent systématiquement charriés et expulsés par les vagues sur la partie la plus haute du profil de plage. Les sables les plus fins se trouvent à l'inverse sur la partie immergée la plus profonde. Généralement, les plages à cordons de galets se présentent avec des galets en haut de plage, et du sable en partie basse, au niveau du trait de côte ou sur la zone immergée (cf. site des Aresquiers à Frontignan dans l'Hérault). L'étude EID de 2014 montre que le sable est sur la plage, et les gros galets sous l'eau. Ceci s'explique par le fait que les plages sont le plus souvent bordées en partie haute d'éléments très réflectifs : falaises, murets, perrés, talus de terres… **Lors des tempêtes, lorsque les plages sont totalement submergées, les vagues sont réfléchies et peuvent "nettoyer" totalement la plage de son sable**, où il ne reste plus alors que de gros galets roulés par les vagues. Les sédiments fins partent sur l'avant-côte lors de la tempête, pour ensuite revenir à la fin de l'épisode, ou lors des évènements successifs de houle moins violents qui permet le charriage du sable et des graviers jusqu'en partie haute émergeante du profil de plage.

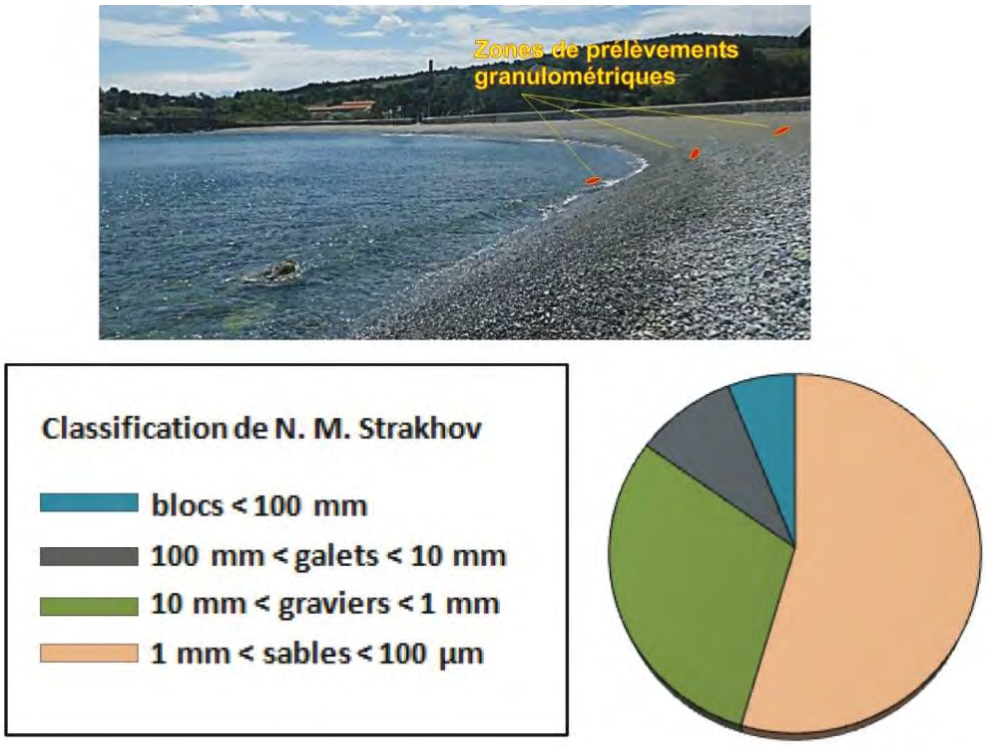


Figure 19 : graphique montrant la répartition des classes granulométriques des 33 échantillons de sédiments prélevés par l'EID en 2013 sur les différentes plages de la côte Vermeille ; dominance des sables grossiers et des graviers (n.b. : les galets sont par contre très présent sur l'avant-côte) ; EID, 2014

Cette étude apporte peu de comparaisons saisonnières des profils de plage. Néanmoins, quelques profils qui ont été levés à deux reprises, comme à Portell et sur la plage centrale de Collioure, repris en Figure 20, montrent des changements importants sur la partie émergée du profil et proche du trait de côte au niveau du talus et de la berme, en seulement 2 mois et demi.

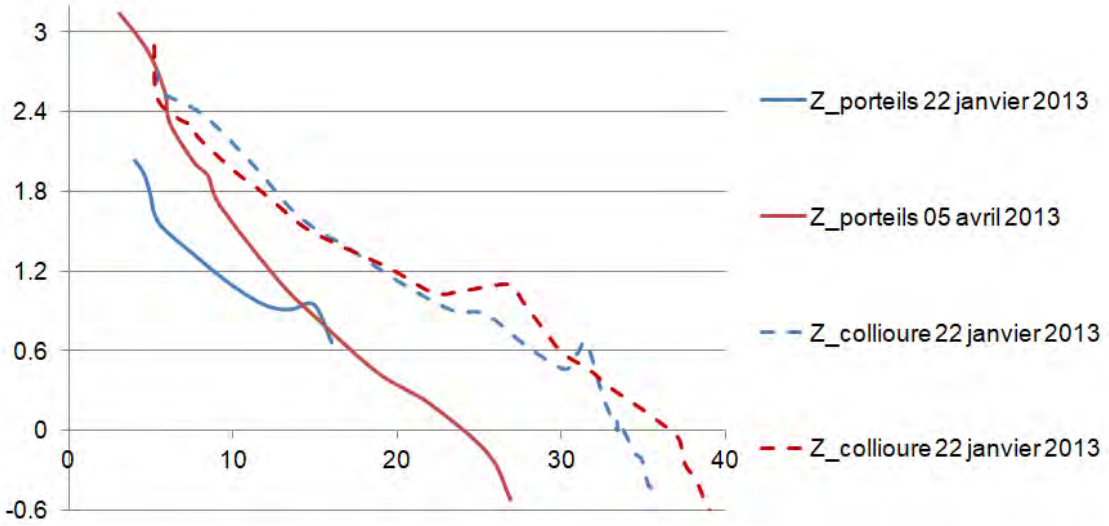


Figure 20 : profils topographiques réalisés par l'EID à 2 reprises à Portell et Collioure durant l'hiver 2013 (le 22 janvier et le 5 avril 2013 ; profils réalisés au centre de chaque plage) illustrant à chaque fois des changements importants

- Au vue de ces résultats, il est indéniable que les changements sont importants sur les profils de plage de la côte rocheuse à l'échelle évènementielle / saisonnière, ceci en fonction de la chronique des tempêtes hivernales (et phases de beau temps).
- Comme observé également sur la côte sableuse, les phases hivernales (d'octobre à mai) durant lesquelles se produisent les tempêtes n'engendrent pas systématiquement de l'érosion. Il arrive fréquemment que des tempêtes expulsent de grandes quantités de sable sur le haut de plage comme observé ici à Portell (Figure 20) durant la fin de l'hiver 2013-2014.
- Enfin, il semble que la phase estivale puisse produise des changements importants du trait de côte.

La particularité des tempêtes qui favorisent la remontée du sable sur la plage est un phénomène encore difficilement expliqué. Il est évoqué dans plusieurs études (Gervais, 2012) que les caractéristiques précises des tempêtes, telles que la durée des phases respectives du "montant" et du "tombant" (croissance puis décroissance de l'agitation), ou l'angle d'incidence des vagues et leurs périodes, influent grandement sur la réponse de la plage. Sur la côte rocheuse, il est très clair que l'exposition différenciée des baies par rapport à la direction d'origine de la houle au large est un critère important qui va induire des réponses très différentes selon les plages.

CEFREM, 2019 (étude intégrée dans le projet SENVISAT)

Le CEFREM a réalisé quatre campagnes de mesures aux printemps et automne 2017 et 2018 sur les trois plages des anses de Paulilles et celle de Banyuls. La comparaison des MNT leur a permis de calculer des volumes de sabls gagnés ou perdus sur la plage émergée (topographie) ou immergée (bathymétrie de l'avant-côte), ceci pour 3 périodes de temps successives : la phase estivale 2017, la phase hivernale 2017-2018 et la phase estivale 2018.

Le Tableau 5 présente les budgets sédimentaires topographiques et bathymétriques de ces 4 plages. Les auteurs signalent que les volumes sédimentaires déplacés sont relativement faibles en comparaison avec ceux des plages sableuses ouvertes du Roussillon (ex. : Aleman et al., 2017 ; quelques centaines à plus d'un millier de mètres cubes). Les marges d'erreur varient ici en fonction des levés et des changements du fond compris dans la marge d'erreur verticale de +/- 10 cm (mesure de l'élévation Z du relief). 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 un budget sédimentaire stable, l'avant-côte alterne entre perte l'hiver et gain l'été. Plus au sud, **à Banyuls, la baie de Fontaulé présente un fonctionnement particulier, avec l'influence très forte des crues de la Baillaury dans la dynamique du delta sous-marin** (visible sous la forme d'un banc de sable marqué au sud de la plage). A noter que les bathymétries réalisées au printemps et à l'automne 2017 ne sont pas assez étendues vers le sud (contraintes de navigation) pour identifier ce delta. Des "taches" sur les MNT montrent l'érosion de ce delta pendant l'été 2018. Sur le reste de la zone, l'avant-côte est très stable, excepté les petits fonds proches du rivage qui sont érodées durant

l'hiver 2017-2018 (deuxième ligne du Tableau 5). La plage émergée présente une légère érosion lors de l'été 2017, puis de l'accrétion marquée pendant les deux dernières périodes : hiver 2017-2018 et surtout été 2018.

	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

Tableau 5 : budget sédimentaire topographique et bathymétrique en m^3 et en m^3/m^2 des plages de poche de Banyuls, el Forat, Paulilles et Bernardi. En rouge les pertes, en bleu les gains, en vert les périodes stables ; en gris les cas où aucune mesure n'a pu être réalisée (CEFREM, Aleman et al., 2019c)

La Figure 21 reprend les données de volume brutes du CEFREM et montre que les changements sur la plage émergée peuvent-être aussi important en proportion au cours d'un cycle d'une année complète que sur la plage immergée, ce qui diffère en cela des plages purement sableuses où habituellement la zone immergée varie d'un facteur 10 fois supérieur. Dans une certaine mesure, les rochers présents sous l'eau semblent fixer en partie les possibilités de déplacement des parties sableuses du profil immergé.

La baie de Fontaulé (plage de Banyuls centre) ou les 3 anses de Paulilles n'ont pas un budget de sable constant ; des **pertes ou des gains de sédiment vers/depuis l'extérieur** se manifestent, au-delà des fonds de -10 m ou sur les côtés de la baie.

Il est possible, de notre point de vue, que les plages de Paulilles puissent échanger du sable entre elles lors des tempêtes. Mais ce genre d'hypothèse devra être vérifié par une répétition de levés et un maillage plus dense du levé bathymétrique entre les 3 plages et/ou des mesures de transport sous l'eau, ou du traçage des sédiments.

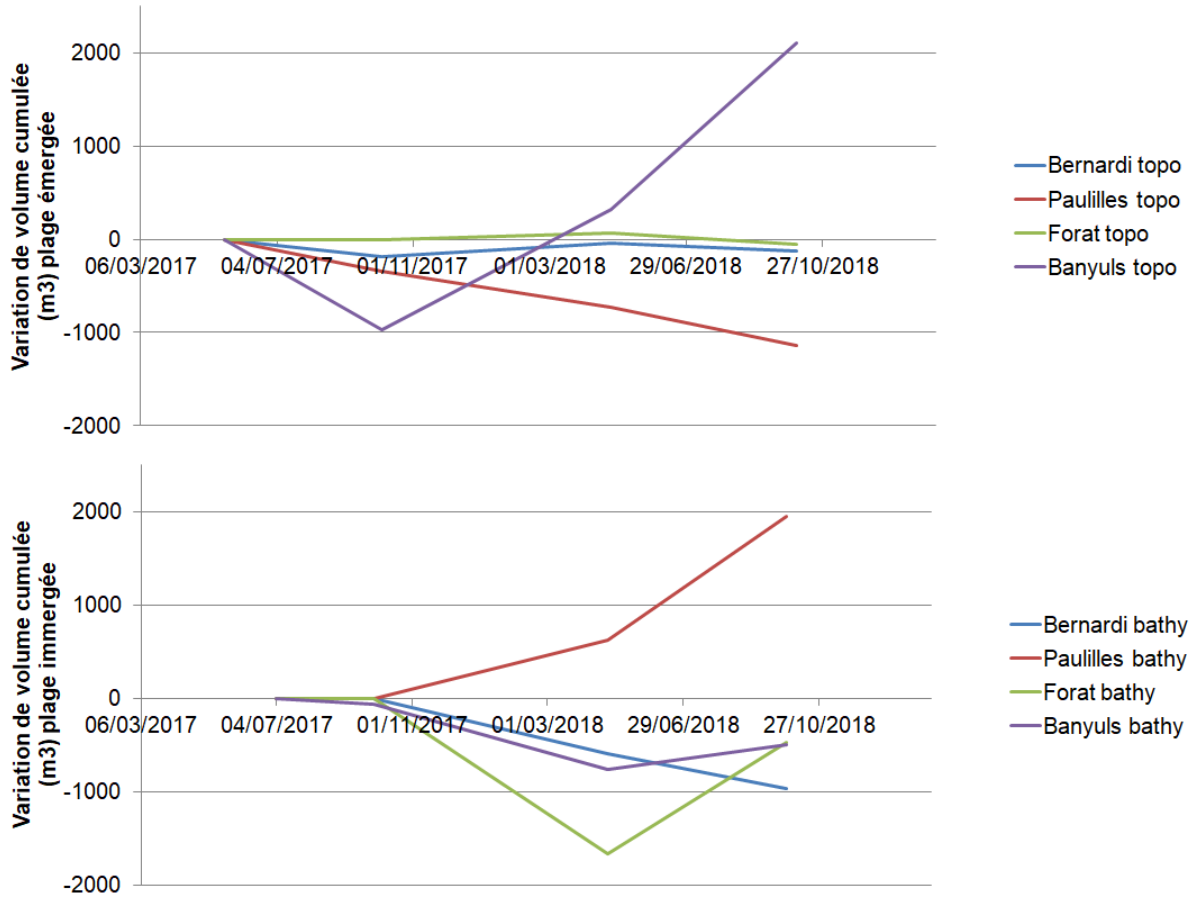


Figure 21 : représentation sous forme de courbe temporelle cumulée des volumes émergés et immergés sur les plages des baies de Paulilles et sur la plage centrale de Banyuls en 2017 et 2018 (selon les valeurs brutes du Tableau 5 précédent).

D'après les auteurs, "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".

Sur les 3 plages des anses de Paulilles le CEFREM signale des mouvements du trait de côte importants durant la période d'étude 2017-2018. La Figure 22 est un extrait de la carte des déplacements du trait de côte qui concerne la baie de Bernardi. Comme sur ses deux voisines, on observe des phases de **rotation du trait de côte,** assez typiques des plages de baies, montrant qu'il y a eu un déplacement du sable de la plage d'un côté à l'autre de la baie, ou bien une divergence ou convergence des sédiment depuis/vers le centre de la baie selon les périodes de l'année qui ont été étudiées.

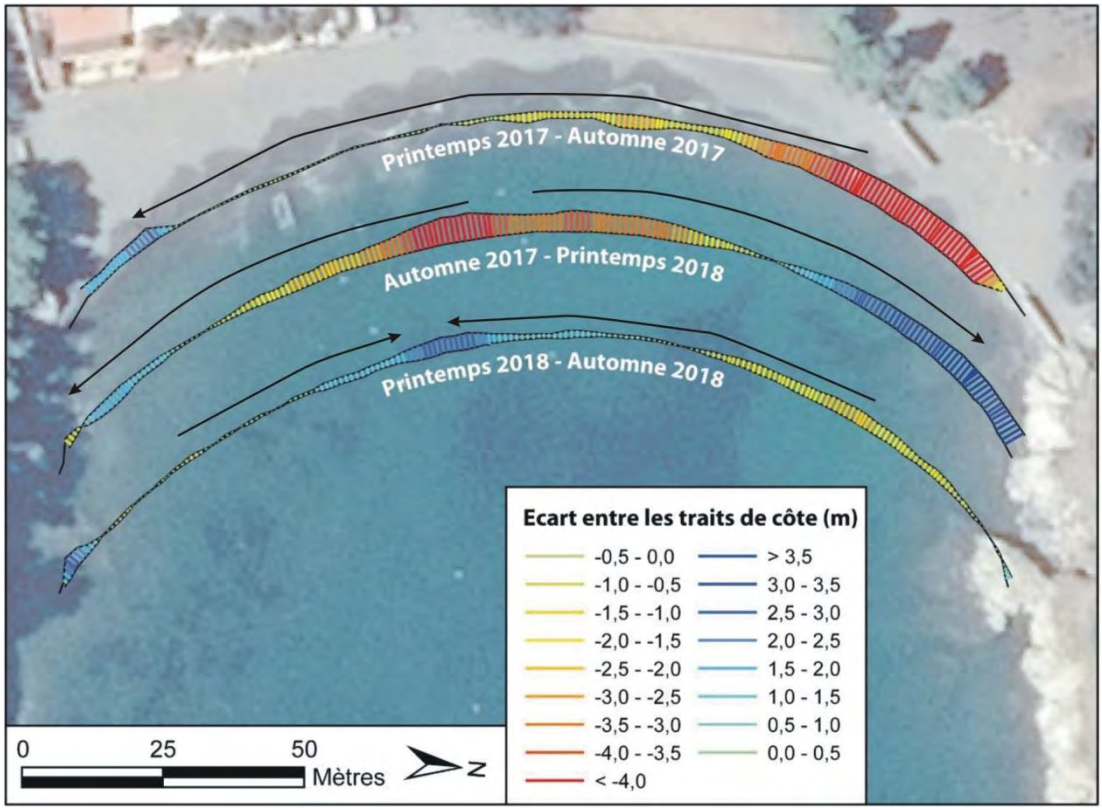


Figure 22 : exemple d'évolution du trait de côte sur la plage de Bernardi durant les saisons 2017-2018 où des "rotations du trait de côte" s'opèrent, d'après le CEFREM (2019). Les flèches noires sont une interprétation de cette étude indiquant un sens présumé de déplacement du sédiment en lien avec des courants de dérive en pied de plage

A Banyuls, sur la plage de l'embouchure de la Baillaury, les changements saisonniers sont également assez significatifs en termes de volumes de sable déplacés, en particulier sur la plage émergée (cf. Figure 21). Les auteurs indiquent que "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 (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 (Figure 23).

Les volumes mis en jeu sur la plage émergée sont importants, de l'ordre de 2 à 3 milliers de m^3, et essentiellement en lien avec la dynamique de l'embouchure de la Baillaury. Néanmoins, les auteurs soulignent l'importance du **remodelage estival de la plage par des engins mécaniques**, ce qui influence de manière non-négligeable la morphodynamique de la plage (comme observé par l'EID en 2014). Les différentiels cartes de différentiels de volumes (CEFREM, 2019c) soulignent **une dynamique de la berme** qui s'érode entre l'automne 2017 et le printemps 2018 (pendant l'hiver) pour se reconstruire entre le printemps 2018 et l'automne 2018 (pendant l'été).

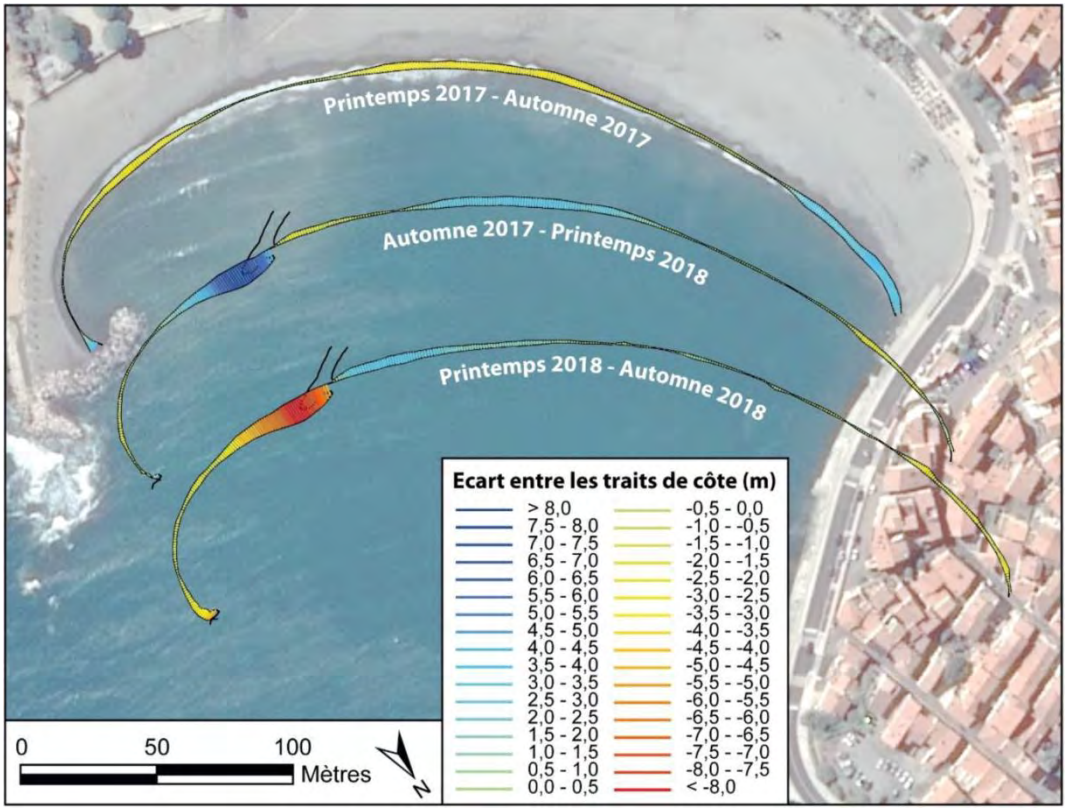


Figure 23 : Evolution du trait de côte de la plage de Fontaulé à Banyuls durant trois phases successives en 2017-2018.

La variation temporelle des volumes mesurée en topographie sur la plage émergée est mise en relation directe avec la courbe temporelle des débits de la Baillaury sur la Figure 24 suivante, qui laisse penser que si le gain de volume sur la plage émergée durant l'hiver 2017-2018 (phase 2/3) est indéniablement lié à une petite phase de crue de la Baillaury, avec une avancée bien visible de la partie émergée du delta (trait de côte), la phase suivante montre qu'à nouveau, on peut observer un gain pendant l'été alors qu'aucun crue ne s'est produite de nouveau (le pic de crue : à droite du graphique de la Figure 24 s'est produit après le dernier levé).

A Banyuls et dans les anses de Paulilles, la dynamique de la plage et le remodelage de la berme et du trait de côte sont importants lors de toutes les phases de l'année, avec des **rotations du trait de côte** qui ont été observées, supposant une **circulation le long de la plage**.

Les fleuves comme la Baillaury (Banyuls) et le remodelage mécanique du profil contribuent fortement aux évolutions de la plage (conséquences certaines sur la résistance du profil de plage aux premiers épisodes de vagues importants)

La dynamique de la plage de Banyuls implique indéniablement une contribution des deux facteurs que sont **les débits de la Baillaury et l'impact des crues**, et le remodelage des sédiments par les vagues. Des gains de sable sur la zone émergée sont aussi la conséquence d'un remodelage des sédiments sur la zone immergée.

Un gain de sable sur la plage à Banyuls n'est pas toujours lié à une crue, et ces deux paramètres pourraient être déconnectés (rôle unique des apports/pertes créés par les vagues).

La plage de Banyuls est sujette à un schéma de circulation induit par les vagues de type cyclonique

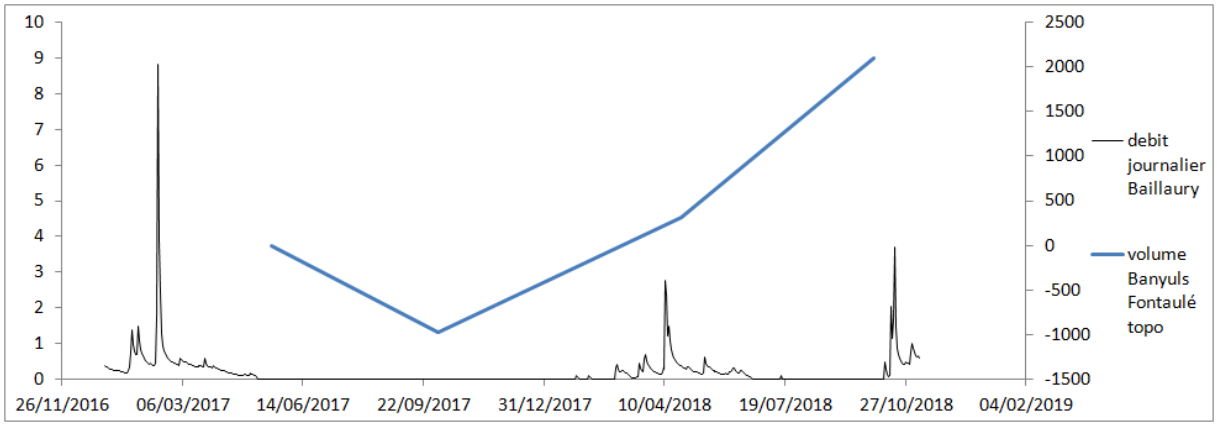


Figure 24 : évolution des volumes de sédiments sur la plage émergée de Banyuls (échelle des ordonnées de droite en m^3) face à la série temporelle des débits journaliers de la Baillaury (échelle des ordonnées de gauche en m3/s).

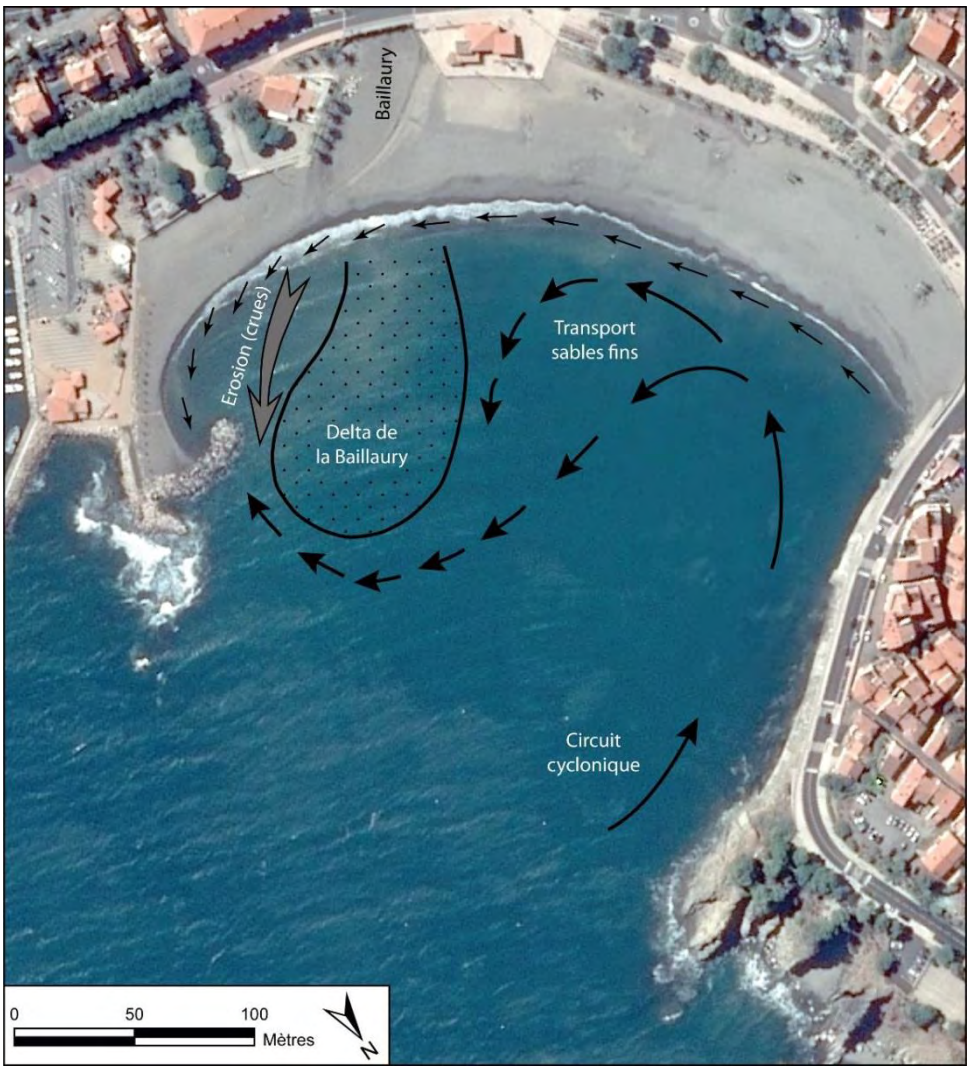


Figure 25 : schéma de fonctionnement supposé des courants sur la plage de Banyuls d'après l'étude du CEFREM de 2019 (adapté d'après Méar, 1985)

Le CEFREM cite, en 2019 : "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. 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 (travaux entre 1985 et 1987) comme préconisé dans le rapport pour stopper la fuite des sédiments vers le large et créer une petite plage derrière l'ouvrage" (Figure 26).



Figure 26 : influence de la construction d'un épi courbe anti-courant d'arrachement vers le large pour maintenir le sable charrié par la Baillaury sur la plage (données photographies aériennes IGN)



Figure 27 : embouchure de la Baillaury le 30 novembre 2014 (photo d'Albert Callis). Le niveau du cours d'eau a atteint 5 m ce jour-là, avec un débit moyen journalier de 8,6 m^3/s (un débit instantané de 173 m^3/s a été mesuré la nuit précédente).

IV) Analyses préliminaires sur la zone d'étude (physiographie et hydrodynamique)

Exposition différenciée des plages de poche

D'après les prévisions les plus fines des modèles de houle disponibles (grand public) et notamment de manière routinière et opérationnelle via le site marc.ifremer.fr, il existe une différenciation claire de l'impact d'un épisode de forte houle en fonction de la direction de provenance des vagues (liée aux vents au large). Cinq scénarios de houles bien distincts, présentés en Figure 28, démontrent que :

- les houles de Tramontane touchent principalement et presque exclusivement les plages exposées au nord et suffisamment éloignées des "fonds de baies" : la plage de Portell, la plage de l'Ouille, les plagettes entre Collioure et Port-Vendres (Batteries, l'Oli, en Baux), la plagette contre la digue de Port-Vendres, la plage du centre-ville de Banyuls, la plage du Troc à l'est de Banyuls, et la plagette d'El Canu à l'est de Cerbère.
- les houles de nord-est, qui sont des épisodes très rares avec de fortes houles, touchent la majorité des sites sauf les fonds de baies tournés vers le sud-est (les deux plages de Saint-Vincent à Collioure, la plage de Bernardi qui est relativement protégée par le cap Béar, les plages du Sanatorium et des Elmes à Banyuls, la plage de Peyrefite, de Terrimbo, de Cerbère et du Minerai, relativement protégées).
- les scénarios de houles d'est ou d'est-sud-est sont clairement ceux qui menacent la majorité des "grandes plages" de la zone : le Racou, les plages de Paulilles, de Banyuls (Sanatorium, Elmes, Fontaulé), la plage de Peyrefite, de Terrimbo, ainsi que la plage centrale de Cerbère et l'anse du Minerai.
- les scénarios de houle de (sud-)sud-est, souvent moins importants que les houles d'est, touchent surtout les plages tournées face à ce forçage : la plage de Bernardi, les plages et plagettes rocheuses entre le Cap d'Ullastrell et Banyuls, les plagettes de Taillelauque, Peyrefite, Terrimbo, et enfin la plage du Minerai.

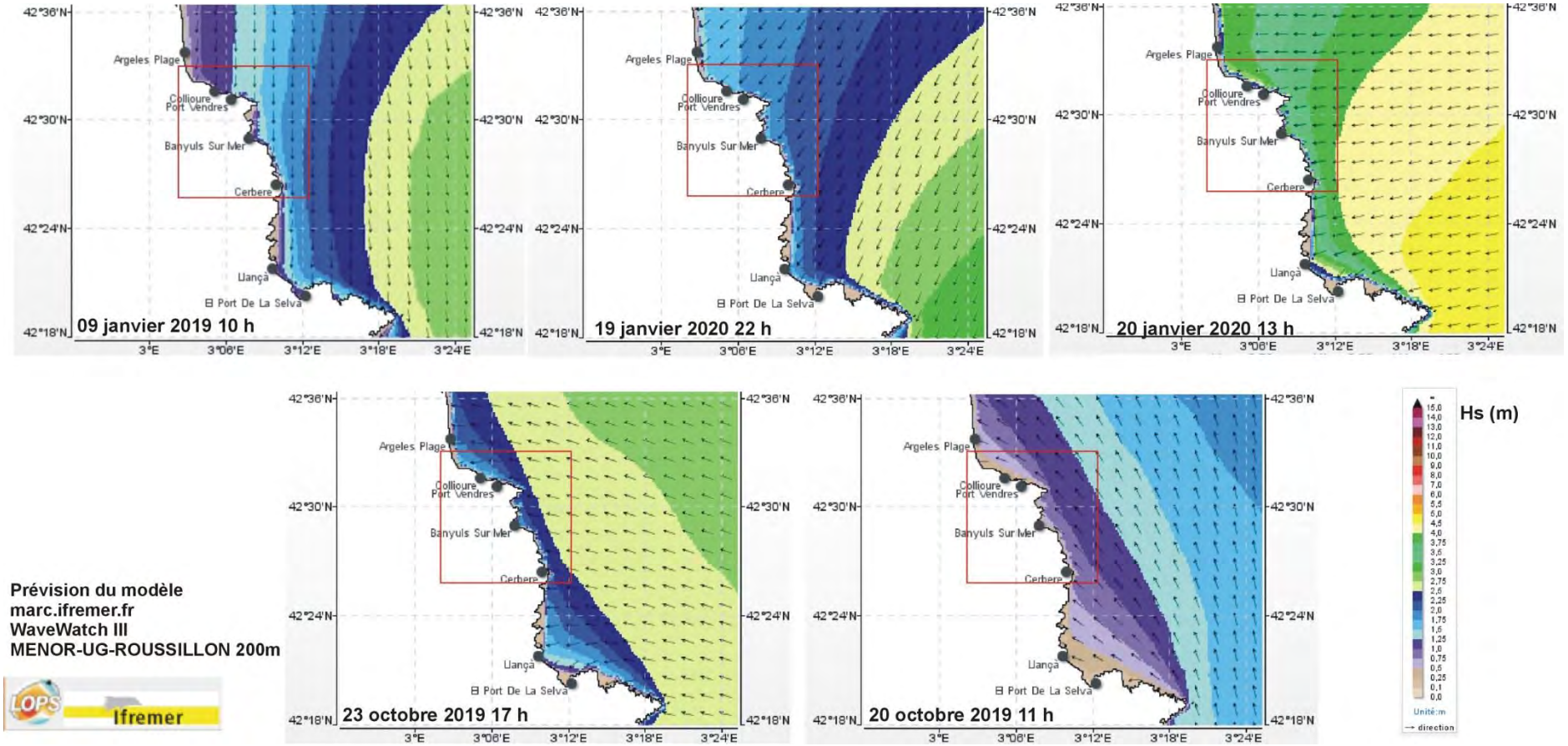


Figure 28 : 5 scénarios de houles en fonction des types de tempêtes avec des houles (site d'étude ici encadré en rouge) :

- **de nord**
- **de nord-est (assez rares)**
- **d'est (plus fortes tempêtes)**
- **d'est-sud-est (variante de la précédente)**
- **de sud à sud-est (épisodes assez fréquents, mais ce ne sont pas les plus énergétiques au large).**

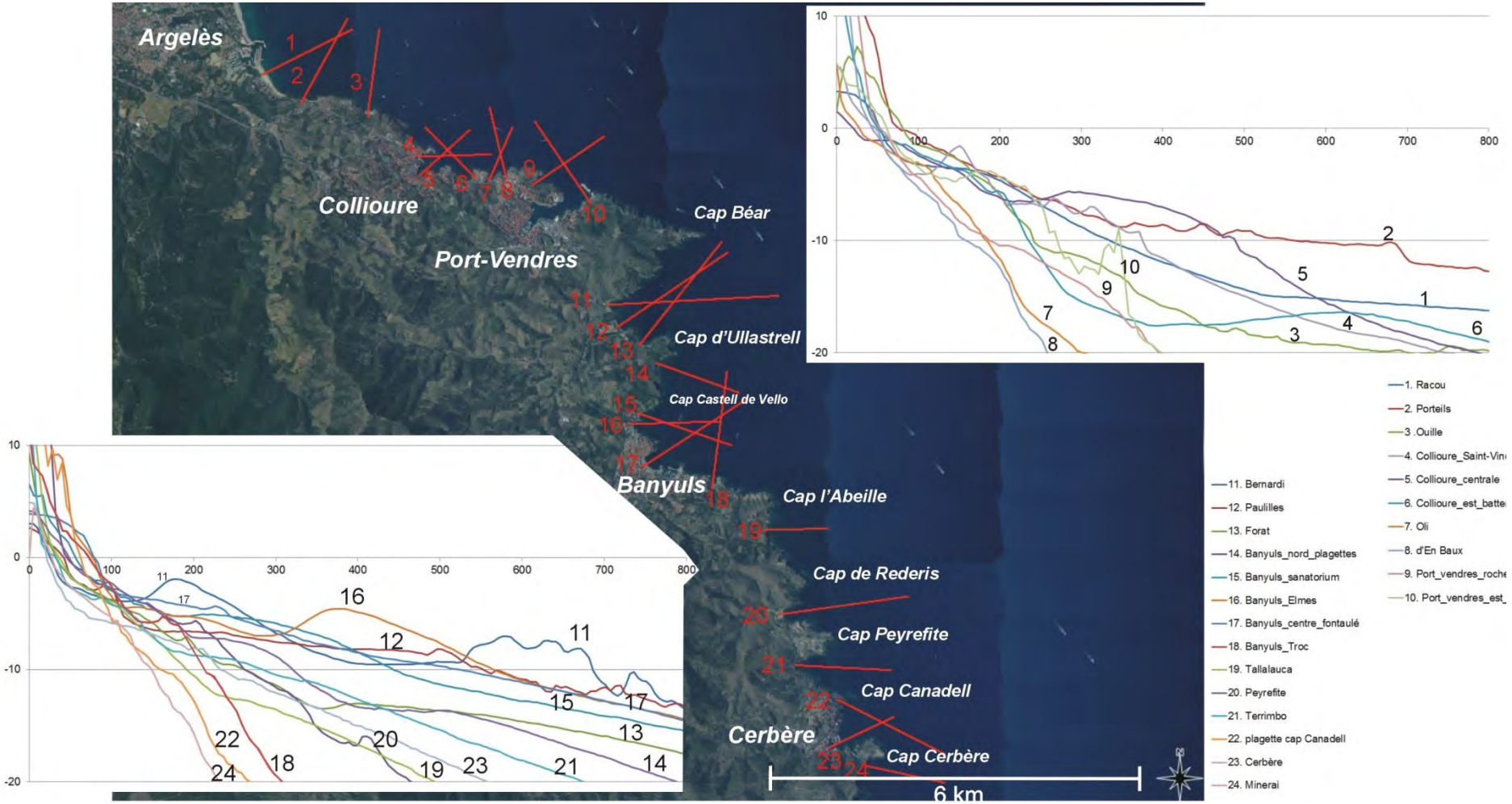


Figure 29 : extraction des profils sur la plage et l'avant-côte afin de montrer les différences de pente et deux grandes familles de profils

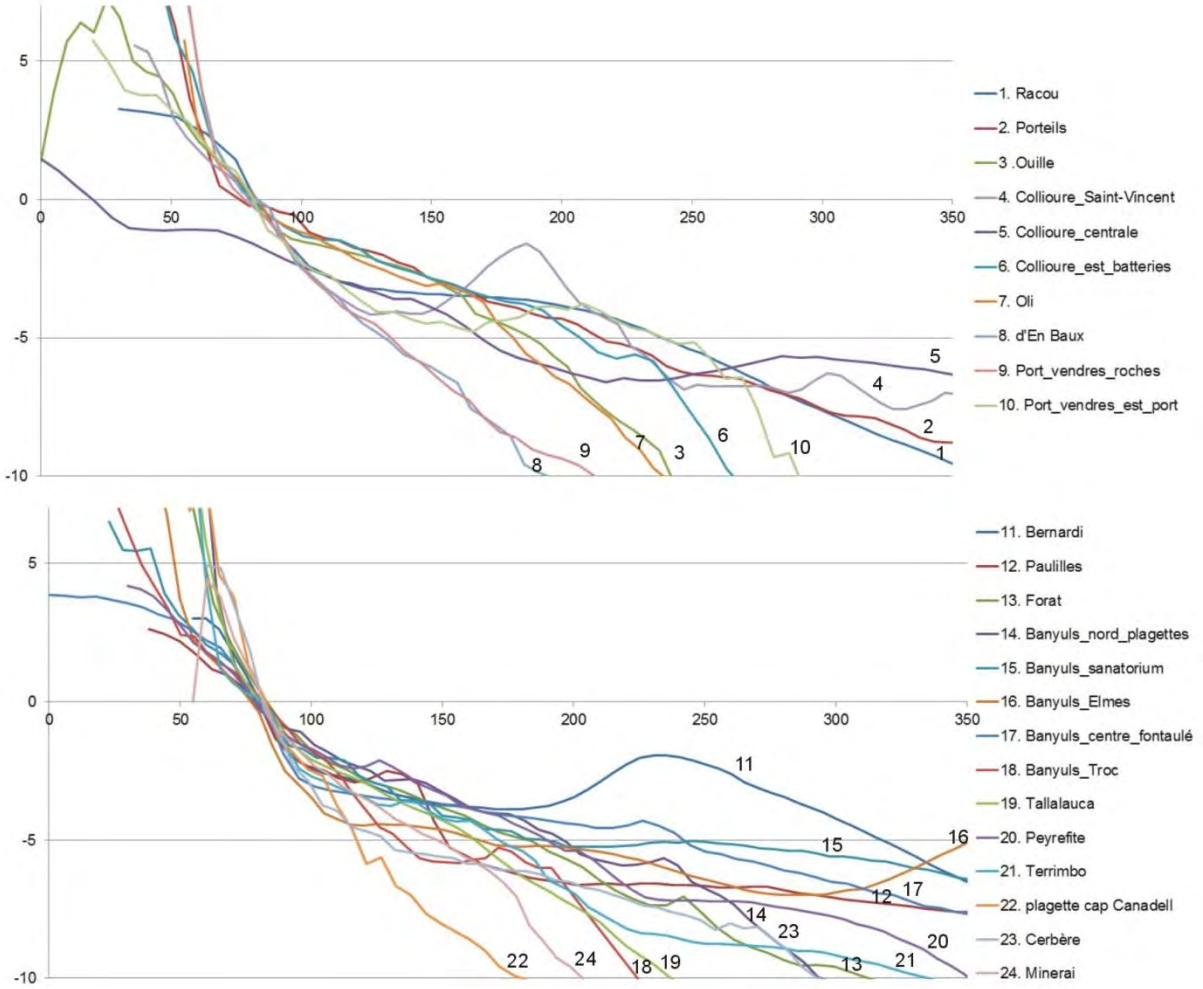


Figure 30 : zoom sur les pentes de plage et des petits fonds en rapport avec la Figure 29 précédente, avec une distinction de deux familles de profils séparés par le cap Béar

En parallèle de cette exposition, les profils de plage se montrent très différents du point de vue des pentes de la configuration des fonds. Dans beaucoup de cas, la situation de la pente est conditionnée par l'existence de platiers rocheux liés à l'affleurement du substratum des schistes et micaschistes attenants aux massifs des Albères. Ceci explique le cas d'une relative pente "douce" des fonds devant la plage de Portell ou de Saint-Vincent entre Argelès et Collioure, clairement visible sur la carte des fonds et du site d'étude en Figure 4, au début de ce rapport.

D'un point de vue plus général, il peut être distingué deux grandes "familles" de profils de plage entre 0 et -20 m :

- Les pentes raides se trouvent principalement au nord du cap Béar, au niveau des plages sur les portions de côte faisant face au nord ; les seules zones en pente douce sont les platiers rocheux d'avant-côte, ou les anciennes vallées incisées aujourd'hui immergées, formant les paysages de "*recs*" (= rias, calanques) où se sont établis les ports de Collioure et de Port-Vendres.
- Les pentes plus régulières des fonds se trouvent principalement au sud du Cap Béar sur les grandes baies les plus exposées des anses de Paulilles, de Banyuls, ou des petites anses de Taillelauque, ainsi que des anses très profondes de Peyrefite, de Terrimbo et de Cerbère.

Cette seconde famille de profils de plage semble être issue d'un nourrissage des fonds en sédiments à la fois sous l'action de l'érosion marine des caps alentours, ainsi que de la remontée d'un prisme littoral lors de la dernière débâcle glacière, fortement alimentée par l'érosion du massif des Albères, et on note à ce propos que chaque baie correspond dans ce cas à la terminaison d'une petite vallée et d'un torrent (cf. la Baillaury à Banyuls). Dans ce cas, seules les petites plages sous le cap d'Ullastrell et la celle du Minerai sous le cap Cerbère font figures d'exception. Mais dans ce cas, ce sont des plages étroites "accrochées" en pied d'un escarpement côtier largement éboulé qui se prolonge faiblement en mer.

Le cap Béar sépare au nord des plages exposées à la Tramontane, et au sud des plages quasi uniquement exposées aux houles marines. Cela se traduirait par deux types de profils de plage avec des pentes d'avant-côte en général plus douces sur les grandes baies au sud qui font face à l'est.

Toutefois certaines dalles de roches et barres sableuses d'avant-côte modulent la forme des profils et agissent aussi fortement sur la dissipation des vagues.

Les côtes à falaises

"L'évolution des falaises est plutôt terrestre que marine". Effectivement, la roche paraît souvent saine en bas des falaises, de plus souvent protégées à leur pied par des cônes d'éboulis. En haut de falaise, la roche apparaît plus altérée (présence de sols, racines des arbres qui profitent de la fissuration et de la schistosité de la roche, eau, urbanisation, etc.) A titre d'exemple, l'altération de la roche au nord de la plage de Paulilles a conduit les gestionnaires à sécuriser la falaise, par la mise en place d'un grillage anti-éboulement (source : Stratégie Régionale de Gestion intégrée du trait de côte, 2018). Sur certains sites sans cours d'eau ou ravins importants (ravins dont les torrents sont actifs lors des pluies diluviennes), les plages peuvent être considérées en partie comme le cône d'éboulis de la falaise (Richard, 1993, qui décrit aussi l'alvéolisation de la roche comme un autre agent à l'origine de la création de sédiment fins - action du sel des embruns sur la fragmentation de la roche exposée, avec des formes circulaires caractéristiques).

Le constat de stabilité long-terme du trait de côte n'est pas étonnant sur les parties rocheuses (Figure 10) où l'impact érosif de la mer et des vagues est un phénomène très lent sur ce type de formations dites "indurées" (on remarque à ce titre à quel point la falaise des plages du Racou ou de Terrimbo sont stables malgré de nombreuses collision avec les vagues). Il est en effet rare que des glissements de terrain se produisent, avec une ampleur suffisante pour être visibles sur les photos aériennes. A ce titre, le BRGM et le site d'information géographique du ministère www.georisques.gouv.fr répertorient et localisent seulement quatre épisodes de glissements de terrain ou de chutes de blocs sur les falaises maritimes :

- 1 épisode de chute de blocs en 2000 (date non précisée) sur la plage de Paulilles
- 1 épisode de chute de blocs à Banyuls le 04/12/2003
- 1 épisode de glissement important d'un volume de près de 300 m^3 de la falaise du Racou le 03/04/2009
- 1 épisode de chute de blocs le 06/03/2013 au sud de Cerbère (mais à une centaine de mètres du rivage).

Signalons que deux des épisodes répertoriés (04/12/2003 et 06/03/2013) correspondent à des situations et des journées de fortes houles marines.

Ce site ne semble pas totalement à jour puisque ne répertoriant pas la dernière tempête du 21 janvier 2020 (Gloria), qui a induit plusieurs éboulements, dont la coupure de la D914 entre Banyuls-sur-Mer et Cerbère à hauteur de Peyrefite, et un éboulement de grande dimension sur la falaise à côté du phare du cap Béar (Figure 32).



Figure 31 : exemples de plagettes surmontées d'un escarpement rocheux instable provoquant fréquemment des éboulements entre le cap Ullastrell et le cap Castell de Vello, au nord de Banyuls (photos © EID-Méditerranée)



Figure 32 : illustration de l'éboulement récent sous le sémaphore (station météorologique) du cap Béar à droite de l'image suite à la tempête Gloria (© photos-hedelin.com prise le 28 janvier 2020 pour le compte du PNMGL)

Il paraît donc assez certain que les fortes tempêtes marines, qui s'accompagnent souvent de fortes précipitations, sont des situations particulières et à risques pour la stabilité des falaises côtières, qui ne s'effondrent néanmoins que rarement, et plutôt "par le haut".

L'alvéolisation des roches sous l'action des embruns est aussi un agent important d'érosion mais probablement très lent.

L'action marine sur la formation de galets est plus rarement observée, mais l'érosion des roches existantes par les vagues sur l'avant-côte est indiscutable.

Précipitations intenses et fortes crues des torrents depuis 2007

Le tableau suivant répertorie et classe les évènements historiques de crues de la Baillaury en termes des pics de débits qui ont été atteints pendant quelques minutes à la station de mesure de Banyuls-sur-mer.

Classement de l'épisode	date / heure	débit max. (m^3/s)
1	30/11/2014 02:50	173
2	23/10/2019 02:45	89
3	21/03/2015 23:35	58
4	21/01/2020 05:55	44
5	15/03/2011 00:38	42
6	06/03/2013 04:19	40
7	04/05/2013 16:25	34
8	06/11/2011 08:42	32
9	13/10/2016 21:21	25
10	11/11/2010 06:15	17
11	18/11/2018 08:45	17
12	14/02/2017 06:55	15

N.B. : pour la période récente, et depuis la crue record de référence de 1940 ("grand Aïguat", plus forte crue connue à l'échelle historique), il semblerait que des crues importantes ont eu lieu en septembre 1971, octobre 1986, octobre 1987, décembre 1987, le 16 décembre 1995, le 09 décembre 1996, ainsi qu'en novembre 1999, précédemment donc aux premiers enregistrements sur la Baillaury.

Tableau 6 : classement des records de débits instantanés (quelques minutes) estimés dans la Baillaury à Banyuls-sur-Mer selon HydroFrance depuis le début des enregistrements en octobre 2008

La Figure 33 en page suivante montre les débits journaliers de la Baillaury enregistrés depuis l'hiver 2007-2008 jusqu'à aujourd'hui. En haut de la figure se trouve le débit de la Massane qui est aussi un fleuve représentatif de la météorologie et l'hydrologie de la côte rocheuse. La majorité du temps ces deux fleuves, très proches géographiquement, ont un fonctionnement synchrone. Depuis 2009, qui constituera le point de départ d'un suivi haute fréquence des images satellites et aériennes de cette étude, il est considéré que les principales crues et épisodes de forts apports terrigènes sur la côte rocheuse ont été, chronologiquement, les épisode du **15 mars 2011**, **6 mars 2013**, **30 novembre 2014**, 22 mars 2015, 14 février 2017 dans une moindre mesure, et enfin dernièrement les épisodes d'octobre-novembre 2018, d'octobre 2019 et surtout du **21 au 23 janvier 2020** (tempête **Gloria**).

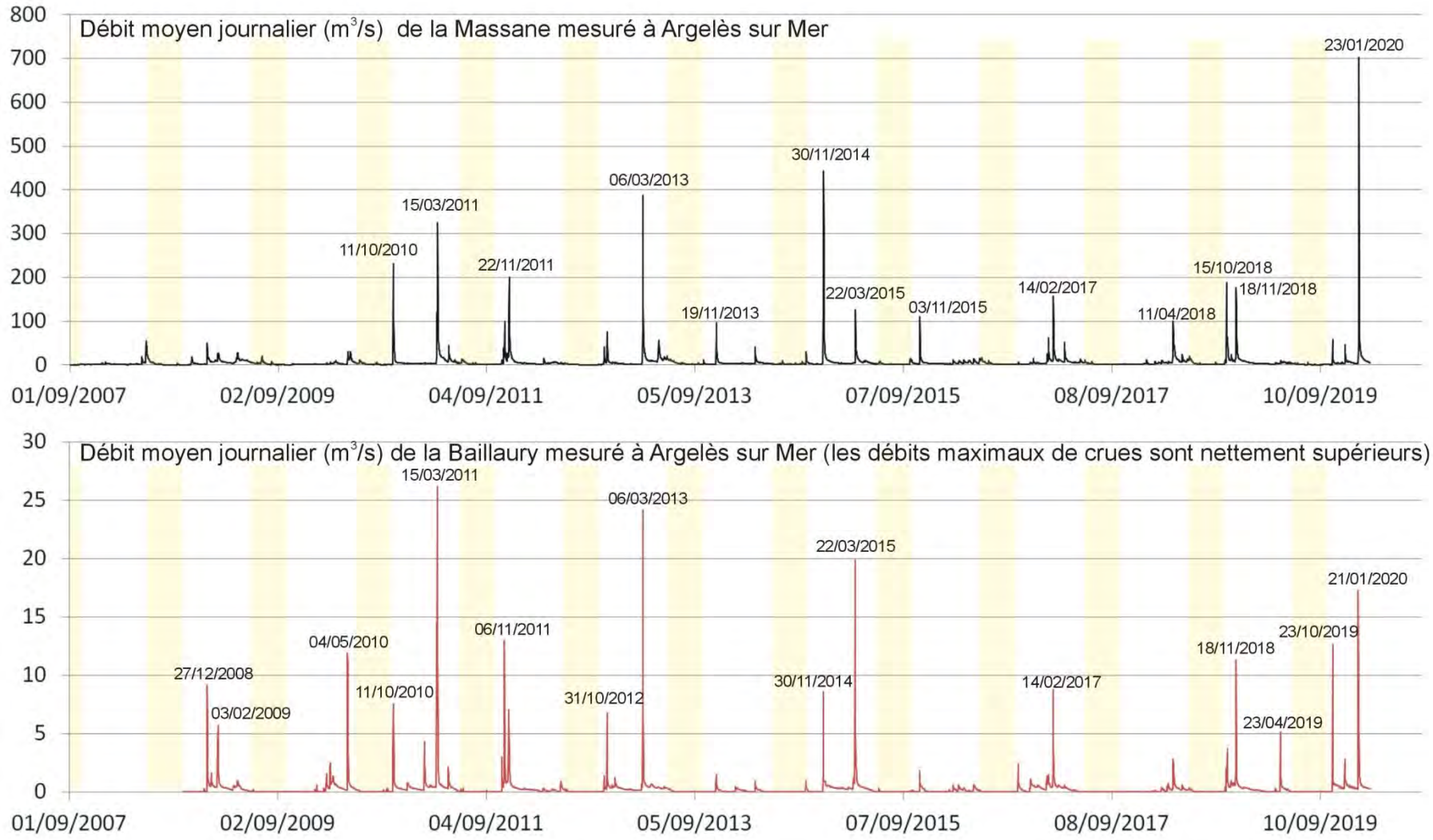


Figure 33 : série temporelle des débits journaliers mesurés pour la Massane (à Argelès) et la Baillaury (à Banyuls) selon "hydro.eaufrance.fr" (site du MEDDE)

Comme pour la relation entre les épisodes de chutes de blocs et les tempêtes marines, il est possible de voir que la très grande majorité des épisodes de forts débits de la Baillaury et de la Massane sont associés à des épisodes de vents marins et de houles importantes sur la côte.

Climat moyen et valeurs extrêmes des vagues sur la zone

Bouée de houle de Banyuls et directions majoritaires des vagues

La bouée de Banyuls fournit l'essentiel des données disponibles de mesures directes de la houle depuis novembre 2007. Elle a fonctionné sans longues périodes de mise hors service, hormis durant les étés 2017 et 2018. Elle se trouve au point GPS : " 042°29,370'N // 003°10,060'E" sur des fonds de -50 m au large de la baie de Banyuls :

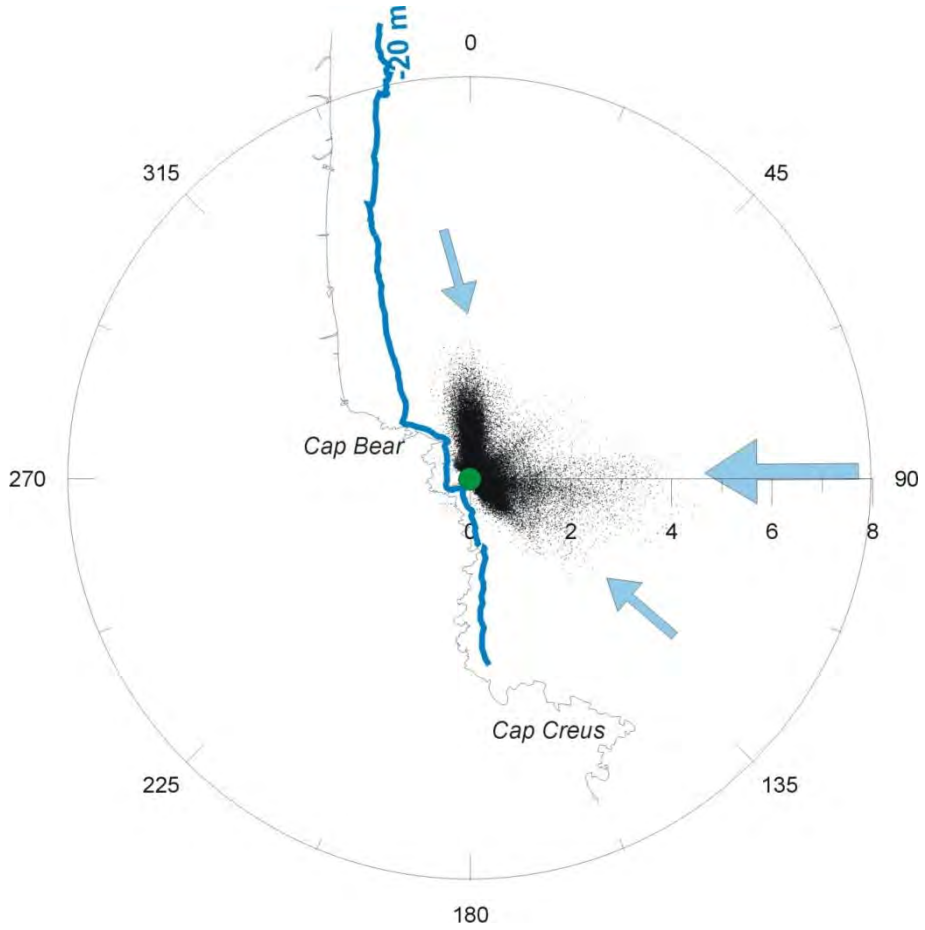


Figure 34 : diagramme polaire représentant les mesures ponctuelles de hauteurs de houle à Banyuls sur les années 2007 à 2015. Chaque point représente une mesure de Hs dont l'importance est représentée par l'éloignement au centre du cercle et la direction d'incidence par la position du point entre 0° et 360 °.

Cette bouée est soumise à la fois aux houles de Tramontane et aux houles marines, ces dernières ayant deux directions dominantes (flèches de la Figure 34 : est et sud-est - dans le second cas les houles viennent souvent du S-SE au large mais elles subissent un effet de réfraction et d'ombre par le Cap Creus). Du point de vue des plus fortes houles de Hs > 3 m, celles-ci proviennent exclusivement du secteur est.

Période de retour statistiques des houles

Statistiquement, d'après les rapports d'études du Cerema (http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr), il est constaté :

- Une vingtaine de jours par an où la houle dépasse une Hs d'1.50 m à la bouée de Banyuls (les houles de Tramontane peuvent parfois atteindre cette hauteur)
- Environ 4 jours par an où la houle (des vents marins) dépasse une Hs de 2.40 m
- 1 épisode de houle de Hs = 4 m tous les ans
- 1 épisode de houle de Hs = 5.20 m tous les 5 ans
- 1 épisode de houle de Hs = 5.80 m tous les 10 ans
- 1 épisode de houle de Hs = 6.30 à 6.40 m environ tous les 20 ans

Saisonnalité des houles

Une analyse complémentaire a montré que les mois les plus propices aux fortes houles liées aux coups de vent de Tramontane venant du nord (à nord-ouest) sont les mois d'hiver (novembre à mars), avec un pic en février, même si la Tramontane est connue pour souffler toute l'année. Les mois qui sont associés aux plus fortes tempêtes de houles d'est (cf. épisodes de "levante" pour les catalans espagnols) sont les mois d'automne-hiver, en particulier de novembre et de mars. Les épisodes de houles de sud-est se produisent là entre octobre et mai (maximum en novembre).

Analyse des tempêtes historiques sur la côte rocheuse

D'après les enregistrements de la bouée de Banyuls depuis 2007 et divers projets de modélisations rétrospectives des vagues (il est difficile d'obtenir des mesures continues lors des tempêtes les plus extrêmes), un classement a été proposé des 10 tempêtes les plus fortes qui se sont produites depuis 1979 sur la côte rocheuse. Notons seulement par précaution que certains facteurs "secondaires" comme la période des vagues et l'intensité du vent marin qui a soufflé pendant la tempête peuvent avoir des effets aggravants en termes d'impacts par l'érosion/submersion marine sur les côtes. Toutefois, de ce classement basé sur les vagues, il ressort que les 4 tempêtes les plus fortes de ces 40 dernières années ont été indéniablement, et chronologiquement, celles de novembre 1999, décembre 2003, février 2004, et décembre 2008.

1	04/12/2003 07:00	8.3		Données de la bouée du laboratoire ARAGO mouillage à -52 m en 2003
2	26/12/2008 18:00	7.2		(Pic principal de houle mesuré avant arrêt houlographe)
3	21/02/2004 03:30	~7.0		Données ADCP de la station au large de la Têt à -28m de fond, décrite dans F. Bourrin, 2007
4	12/11/1999 21:30	6.8		Données de la bouée du laboratoire ARAGO mouillage à -27 m en 1999
5	01/03/1986 16:00	6.1		Sorties de modélisation ANEMOC2 / LHSV- UnivParisEst-CEREMA
6	21/01/2020 03:00	6.0		
7	05/03/2013 11:00	>>4.8		La bouée s'est arrêtée en mars 2013 avant le second pic mais cette tempête est connue comme importante pour la zone (prévision de Hs = 5,3 m par le site marc.ifremer.fr)
8	27/12/1980 19:00	5.8		Sortie de modélisation du labo. DICCA italien, mais c'est potentiellement surestimé
9	01/03/2018 00:00	5.1		
10	13/10/2016 14:00	4.9		
N.B. : selon le projet ANEMOC 2 du laboratoire LHSV, la tempête du 01/03/1986 a été aussi particulièrement forte à Banyuls avec plus de 6 m estimé, mais 5 m a été évalué alors par le laboratoire italien DICCA.				

Tableau 7 : classement des plus fortes tempêtes selon les records de houles depuis 1979

Il est surprenant de voir que la tempête de décembre 1997 ou celle de novembre 1982, les plus fortes observées dans la partie nord du Golfe du Lion, ne sont pas ici représentées dans ce classement, suite aux questions sur l'importance de ces évènements en l'absence de mesure directe à Banyuls. La houle en 1982 a été estimée à 4 m, et en 1997 à 5,30 m selon le DICCA (5,08 et 5,47 m respectivement selon ANEMOC2). Ce point prouve l'extrême importance de la direction des houles liée aux champs de vent du large qui implique une variation importante de l'intensité d'une tempête ressentie en différents endroits de la côte.

Les conditions de vent marin associées à ces tempêtes (valeurs max. à moins de 12 h d'intervalle du pic de houle) et enregistrées par le sémaphore du cap Béar furent :

le vent lors de ces mêmes tempêtes		Vent max. Moyennes (km/h)	Vent max. Rafales (km/h)
1	Tempête du 04/12/2003	83	122
2	Tempête du 26/12/2008	80	104
3	Tempête du 21/02/2004	72	115
4	Tempête du 12/11/1999	97	145
5	Tempête du 01/03/1986	57	91
6	Tempête du 21/01/2020	69	93
7	Tempête du 05/03/2013	80	113
8	Tempête du 27/12/1980	?	91
9	Tempête du 01/03/2018	70	95
10	Tempête du 13/10/2016	70	96

Tableau 8 : intensité des vents lors des 10 tempêtes de plus forte houle classés selon les vagues (

Ce point montre que le classement par la force du vent seul n'est pas toujours un très bon indicateur de l'intensité de l'agitation marine, puisque les records connus par vent marin ont été lors des tempêtes de 1982 et 1997, avec respectivement des rafales mesurées à 144 et 158 km/h, évènements qui ne semblent pas avoir été accompagnés des plus grosses houles connues sur le secteur.

Historiquement, **les épisodes de houle de Tramontane** les plus importants (houles supérieures ou proches de Hs = 3 m modélisé ; ou 2,50 m mesuré) ont été :

- avant l'enregistrement de la bouée, selon les projets de modélisation précités : **27/12/1980 20:00 ; 08/02/1984 22:00 ; 31/01/2003 14:00 ; 22/12/2003 19:00** ;
- sur la période récente, d'après l'enregistrement de la bouée : 05/03/2008 15:00 ; 20/06/2010 13:30 ; 25/10/2010 18:00 ; **06/01/2012 07:00 (record de houle mesuré à 3 m) ; 28/10/2012 17:00 ; 03/02/2013 13:00** ; 14/03/2013 00:30 ; 22/10/2014 11:30 ; 09/12/2014 08:30 ; 16/01/2017 20:00 ; **13/11/2017 13:30 ; 09/01/2019 10:00**.

Lors de ces épisodes, le vent au cap Béar peut atteindre sans grande difficulté 150 km/h en rafales, mais à nouveau le lien de proportionnalité entre la force du vent et la hauteur des vagues n'est pas évident. Les records de vent de ces dernières années datent du 24/01/2009 avec 191 km/h et du 02/12/2017 avec 183 km/h de vent en rafales, alors que ces épisodes ont été suivis de vagues faibles à moyennes.

L'impact des épisodes de Tramontane du point de vue des vagues et de l'agitation marine dépend en réalité beaucoup plus de la direction du vent et de l'importance de sa composante nord qui conditionne l'existence d'un "fetch" (distance de formation des vagues par le vent au large) important. Ainsi, notons que si le vent est orienté N-NO dans le Golfe du Lion, celui-ci produira beaucoup plus de vagues sur la côte rocheuse catalane que s'il est orienté O-NO.

Le cas récent de la tempête Gloria de Janvier 2020

La tempête Gloria du 21-22 janvier 2020 a été un évènement marquant de ces dernières années avec une hauteur de houle qui a atteint Hs = 6 m.

Elle a été particulièrement importante aussi du point de vue de l'ampleur des précipitations qui ont accompagné l'évènement avec 164 mm à Cerbère, 157 à Banuyls-sur-mer, 155 au cap Béar (dont 145 pour la seule journée de lundi, nouveau record mensuel), et 94 mm observés à Perpignan (source site web France Bleu). En réponse à cela, il a été vu que la Massane et la Baillaury ont été le siège d'une **crue historique**.

Plusieurs rafales de vents venant de l'est ont dépassé 90 km/h dans l'après-midi au cap Béar, ce qui n'est pas un record, mais marque tout de même un jalon d'un épisode important lorsque les rafales dépassent les 80 km/h en conditions de vents marins.

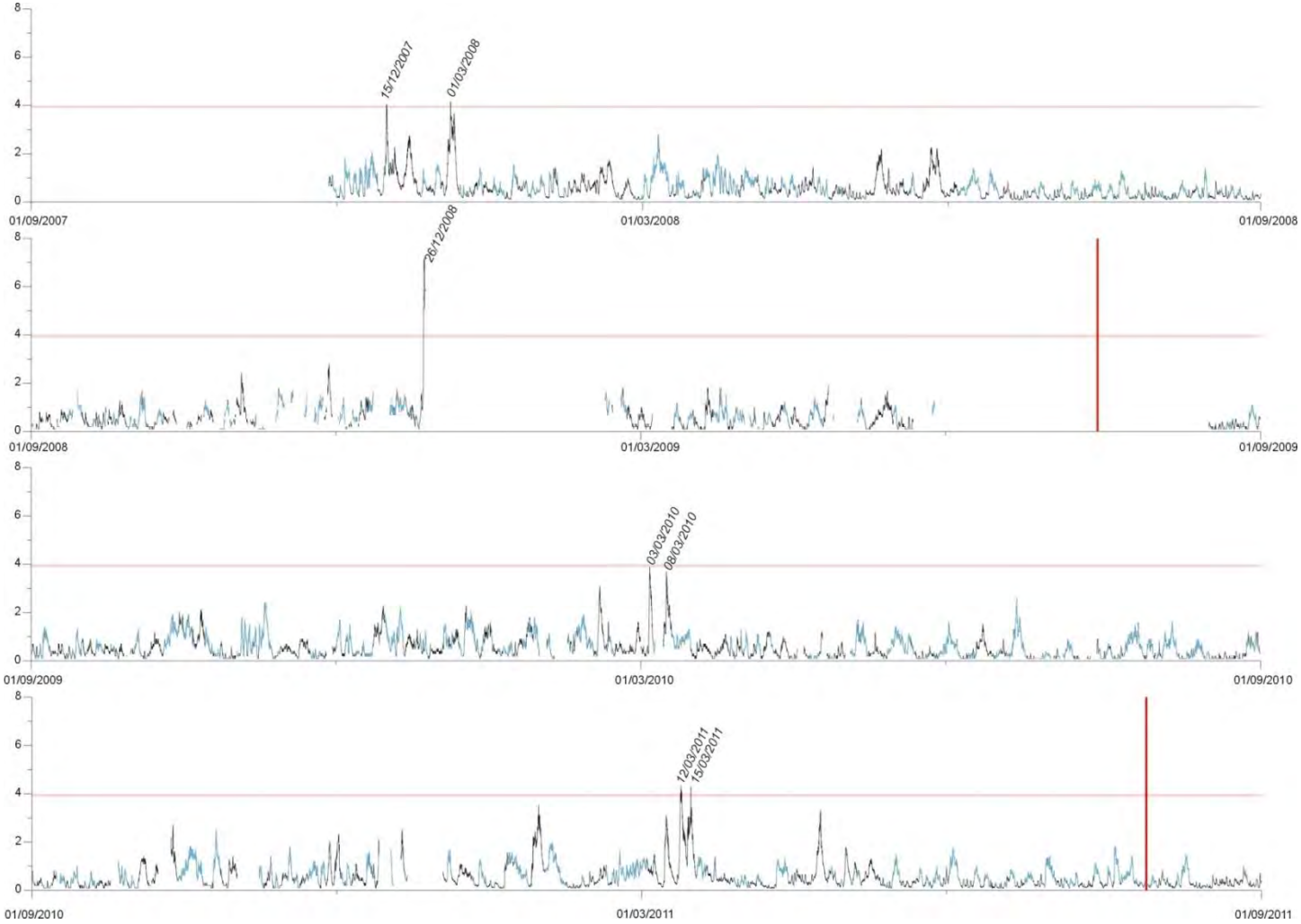
Au Racou, plusieurs maisons ont été inondées par les vagues et 50 habitants ont préféré évacuer leurs maisons le lundi 20 janvier.

Sur les routes, suite à plusieurs éboulements, la D914 a été coupée temporairement entre Banyuls-sur-Mer et Cerbère à hauteur de Peyrefite.



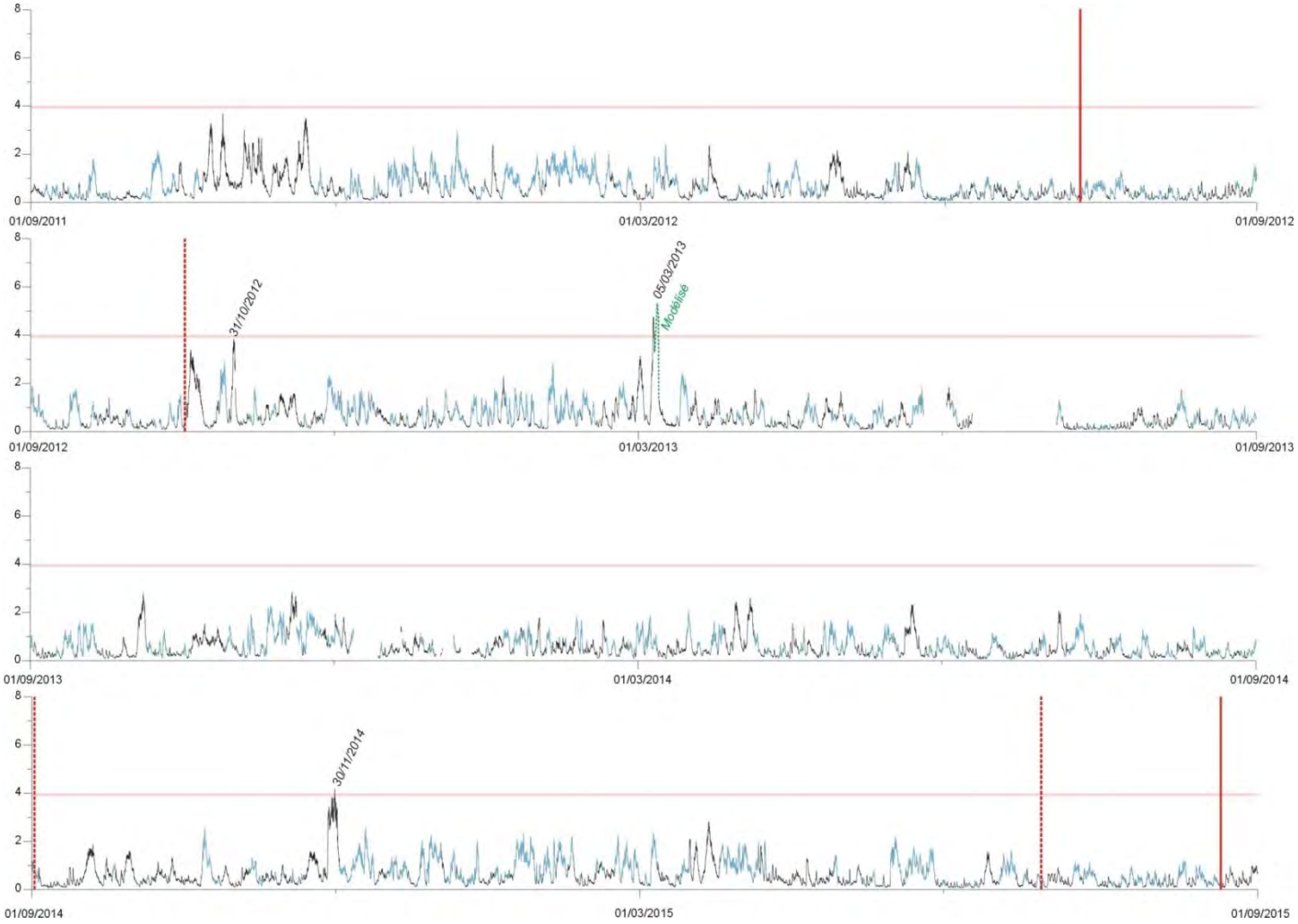
Figure 35 : mer très forte à Banyuls-sur-Mer, le 21 janvier au matin, avec une houle d'est de plus de 5,50 m de Hs au large et une eau largement troublée par la crue de la Baillaury et la mise en suspension des sables par les vagues (© France 3-région / FTV / O. Faissole)

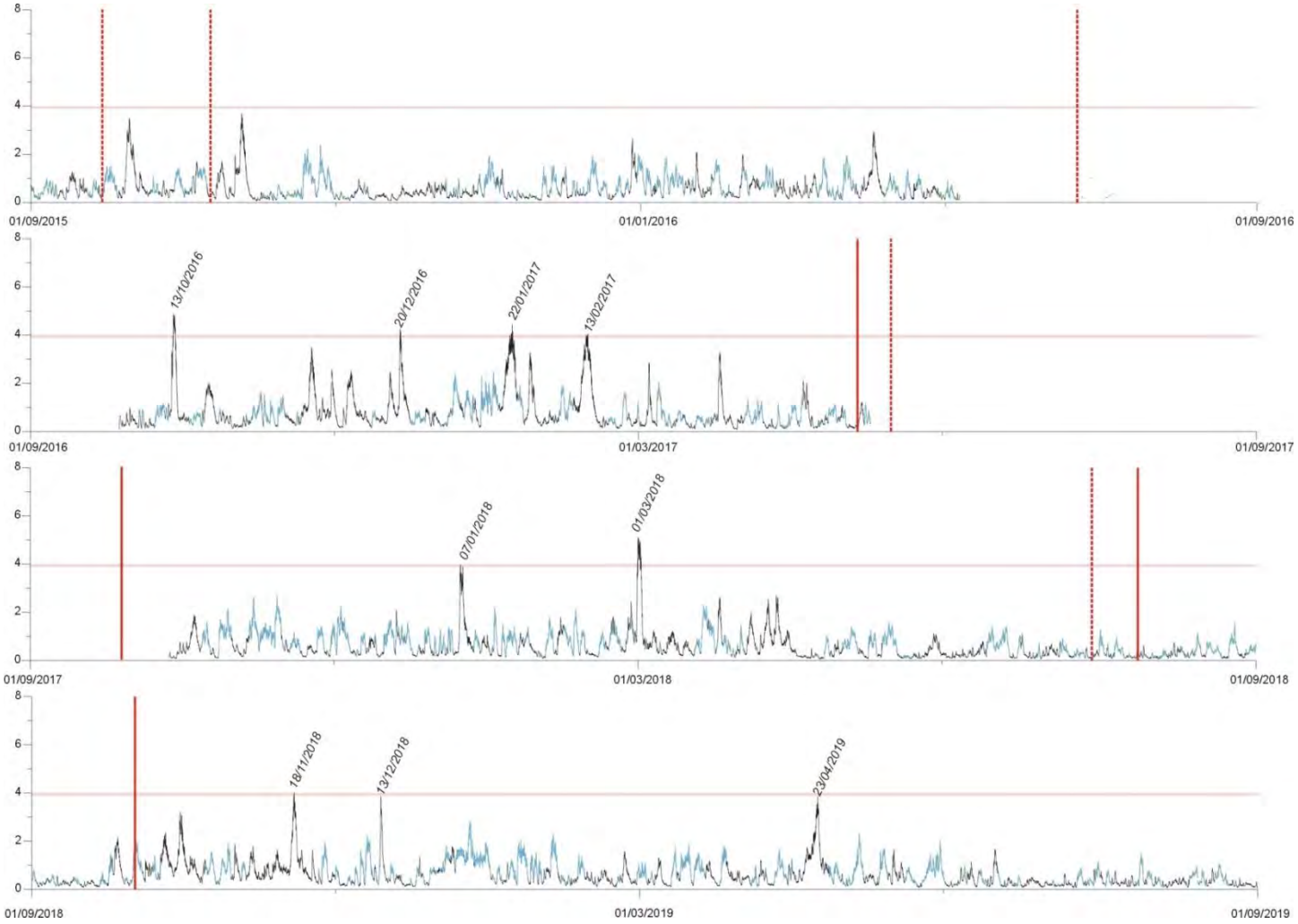
Enregistrement des houles de ces 10 dernières années (houlogramme de Banyuls)



a.

b.


01/09/2011
01/03/2012
01/09/2012
31/10/2012
05/03/2013
Modélisé
01/09/2012
01/03/2013
01/09/2013
01/09/2013
01/03/2014
01/09/2014
30/11/2014
01/09/2014
01/03/2015
01/09/2015


01/09/2015
01/01/2016
01/09/2016
13/10/2016
20/12/2016
22/01/2017
13/02/2017
01/09/2016
01/03/2017
01/09/2017
07/01/2018
01/03/2018
01/09/2017
01/03/2018
01/09/2018
18/11/2018
13/12/2018
23/04/2019
01/09/2018
01/03/2019
01/09/2019

c.

d.

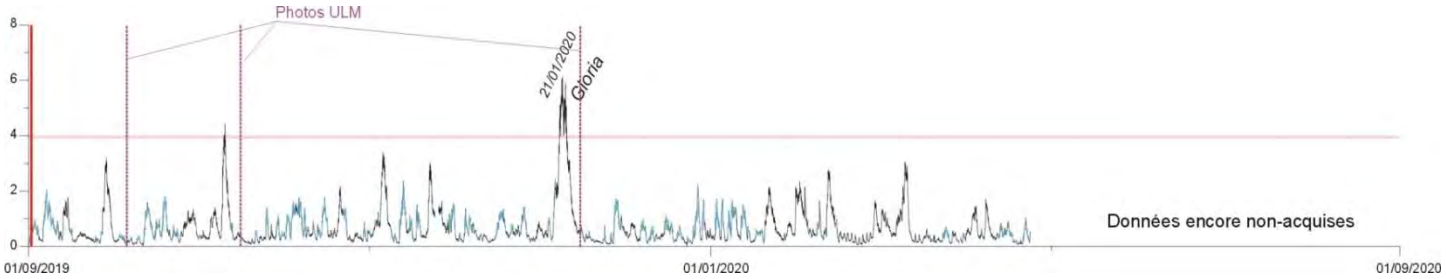


Figure 36 (a-b-c-d) : séries temporelles de hauteurs significatives de houles (Hs) mesurées à la bouée houlographe de Banyuls (les date des évènements importants égaux ou supérieurs à Hs = 4 m sont indiquées au-dessus des principaux pics) ; les épisodes de vagues de Tramontane figurent en bleu sur le houlogramme et les traits rouges verticaux correspondent aux dates des ortho-images utilisées dans cette étude (traits rouge plein = ortho IGN ou images sat. Pléiades couvrant tout le site d'étude ; traits rouges pointillés = ortho-images google earth couvrant partiellement le site d'étude)

Energie par saison hivernale et secteur d'incidence des vagues

Un cumul de l'énergie des vagues (flux d'énergie) a été calculé pour chaque "saison hivernale d'agitation" comprise entre septembre et fin août de l'année suivante. Il est présenté sur le diagramme de la Figure 37. Ce cumul a été fait distinctement selon les 3 directions possibles de provenance des houles : le secteur nord pour les houles de Tramontane, le secteur sud-sud-est pour les coups de marin de cette direction, et le secteur est qui est celui des plus fortes tempêtes de *levante*. Les domaines angulaires concernés sont : 210 à 30 °N ; 30 à 120°N ; 120 à 210 °N.

Les résultats montrent que les saisons hivernales ont été très contrastées d'une année sur l'autre. Pour chacun des domaines angulaires on peut relever les points suivants :

- l'hiver 2016-2017 a été indéniablement sévère du point de vue de l'intensité et de la répétition des épisodes de houles d'est ; aussi, la tempête gloria de la dernière saison 2019-2020 a fortement marqué le cumul d'énergie des houles d'est (à la différence de la forte tempête du 1er mars 2018 qui s'est montrée plus brève).
- les houles de sud-est ont été particulièrement marquées en 2014-2015 et en 2018-2019 ;
- la saison la plus marquée par les houles de Tramontane est indéniablement 2014-2015.

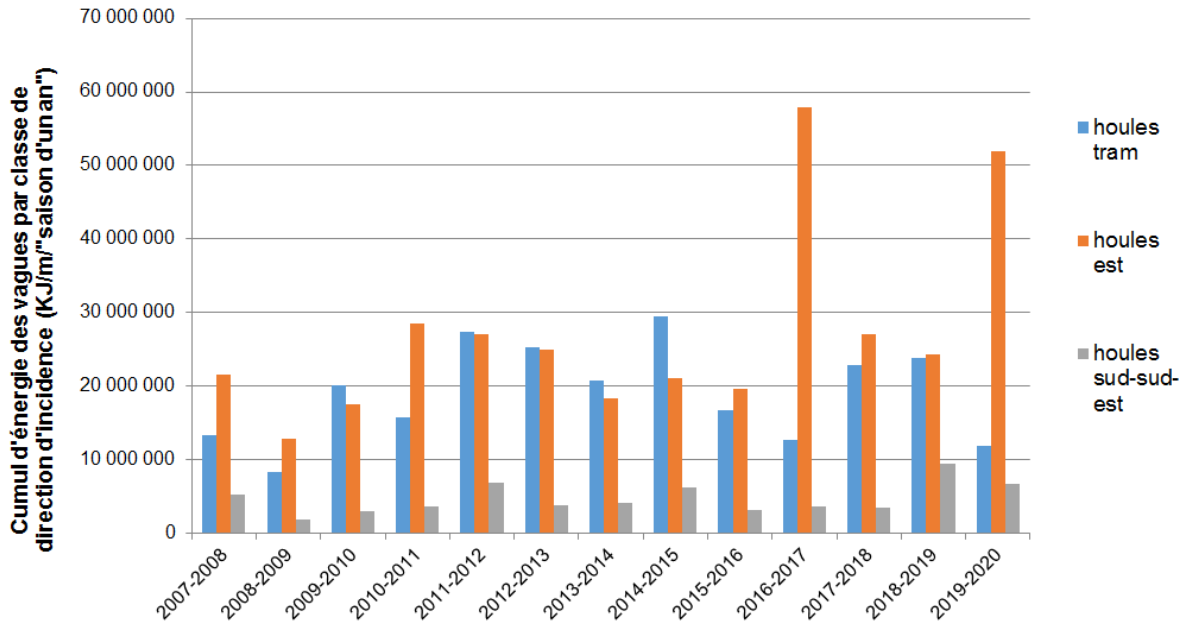


Figure 37 : cumul de l'énergie des vagues par saison hivernale et selon la classe de l'angle d'incidence des vagues (notons que la saison 2019-2020 n'est pas encore terminée malgré la forte signature des houles d'est liée à Gloria)

Problématique initiale de l'étude sur le rôle des forçages

- Les forts débits de crues peuvent-ils encore aujourd'hui recharger les plages en sable ? (ex. sur les plages de Banyuls et de l'Ouille ?)
- Si les plages ne bougent que faiblement à l'échelle pluri-annuelle, du moins pour la position du trait de côte, des contrastes importants en termes d'attaques des houles d'une saison à l'autre (houles perpendiculaire aux plages) aura une incidence détectable sur les surfaces de plages.
- Les variations d'angle des tempêtes favorisent des échanges potentiels entre deux plages voisines (comme supposé par exemple à Paulilles d'après les mesures bathymétriques de l'université de Perpignan ; cf. Figure 21).
- Comment réagissent les plages exposées aux houles marines dans un laps de temps très court (quelques jours) durant et après une très forte tempête telle que Gloria ?

A titre d'exemples, il s'agira de regarder si l'hiver 2016-2017 a eu une incidence particulière sur les plages faisant face à l'est, de même que l'hiver 2014-2015 pour les plages faisant face au nord (ou 2011-2012 qui marque un contraste avec l'hiver précédent). Bien entendu, il s'agira d'évaluer, avec les données existantes aujourd'hui, l'impact de la tempête Gloria de janvier 2020 dont la puissance maximale et le cumul énergétique ont été particulièrement importants, et qui a dû affecter l'ensemble des plages du littoral. De surcroit cette tempête a été accompagnée d'une crue qui a dû modifier les plages des embouchures (ex. la Baillaury à Banyuls).

V) Actualisation des connaissances sur l'érosion des plages de la côte rocheuse

Méthodologie

Données images visibles aériennes/satellites disponibles :

Afin de rassembler le maximum d'informations sur les variations spatio-temporelles du trait de côte, et comprendre les processus en jeu à relative haute fréquence, **des images aériennes et des images satellites de nombreuses sources ont été collectées** :

- des images aériennes anciennes (IGN) datant de 1942 (ou 1944) et 1952 afin de refaire un constat sur l'évolution historique et pluri-décennale des différentes baies de la côte Vermeille et ainsi fiabiliser ou affiner les conclusions de l'étude précédente de l'EID (2014).
- à partir de l'année 2009 de nombreuses images ont été rassemblées afin de travailler sur l'évolution contemporaine et haute fréquence des plages et réfléchir au rôle des tempêtes et des crues. Différents types de données sont utilisés :
  - Les images aériennes (ortho-images) provenant des campagnes estivales de l'IGN © et couvrant souvent tout le littoral de la région Occitanie
  - Les images satellites du capteur Pléiades (© Airbus/CNES/Spatial IGN) qui ont été acquises par l'EID via les partenariats établis avec le consortium Géosud et le pôle Théia, ou celles acquises directement par le Parc Naturel Marin du Golfe du Lion (qui bénéficie d'un accord privilégié avec Airbus pour l'acquisition des images Pléiades).
  - Les images aériennes consultables sur le logiciel © Google Earth (n.b. : images aériennes référencées comme provenant de la © NASA et des programmes Landsat / Copernicus bien que la source soit certainement des images prises d'avion et non de satellites).

Type de données ortho-images	Résolution du pixel (finesse de l'image)	Erreur de projection SIG appréciée en plusieurs points (re-projection par l'EID dans le cas des images Google Earth)
Orthos IGN anciennes	~1 m (photos argentiques en noir et blanc numérisées)	2 m mais erreur possible de 3 à 4 m sur la détection du trait de côte car la limite terre-mer est moins visible selon les conditions qu'avec des images en couleur.
Orthos IGN récentes	1 m en 2009-2011 0,2 m depuis 2015	< 1 m avant 2012 <0,5 m après 2012 (inclus)
Images Satellite Pléiades	0,5 m	~0,3 m
Orthos Google Earth	~0,25 m	< à 2 m sur la plage (sur les zones de bas-relief)

Tableau 9 : types de données ortho-images utilisées dans cette étude

Notons que les images issues des campagnes aériennes de l'IGN sont des vraies "ortho-images", dans le sens où le point de vue se trouve presque parfaitement au zénith de la surface terrestre, ce qui évite des effets de distorsion trop importants en zone de relief escarpé (N.B. : à ce titre des corrections sont apportés par l'IGN d'après ses bases de données topographiques précises). Les images des satellites Pléiades ont un angle de vue plus variable car les capteurs des satellites sont orientables. Certaines images présentent parfois une légère obliquité puisqu'une partie de la façade des bâtiments est visible. Cependant, pour suivre le trait de côte, ce paramètre n'a pas d'effet. Pour ces deux sources de données, les effets les plus contraignants pour l'exploitation des images dans le but de suivre le trait de côte sont les effets d'ombre portée par les falaises côtières proches des plages étudiées (variation de l'angle du soleil en fonction de l'heure du survol), qui assombrissent parfois une partie de la plage, rendant la photo-interprétation moins précise.

Les images issues de Google Earth, après extraction en très haute résolution depuis le logiciel, se sont révélées présenter de légères distorsions, variables en fonction des dates des images. La raison principale de cette distorsion semble provenir de l'angle de vue parfois très oblique des images et de la vue de type "3D" du logiciel, s'accommodant des reliefs particulièrement escarpés de la zone étudiée. Afin de re-projeter "à plat" les images, plusieurs points de référence proche du niveau zéro de la mer (essentiellement des rochers dans l'eau) ont été pris afin que la position du trait de côte présente le moins d'erreur possible lié à la projection.

D'une manière générale, on considère que l'erreur de positionnement du trait de côte liée à la source des images est inférieure à 4 m pour les images aériennes historiques de l'IGN ; inférieure à 2 m pour les images Google Earth ; et enfin, l'erreur est infra-métrique pour les données ortho-images IGN et les images satellites Pléiades. A cette erreur peut s'ajouter une erreur liée aux conditions météorologique due à la présence de vagues (conditions de Tramontane parfois sur les images) ou de surcote/décote (influence de la pression atmosphérique) à la date du jour de l'image. Ce phénomène implique une erreur supplémentaire moyenne d'environ 2 m, mais dans les baies, où la mer est calme, cette erreur est la majorité du temps assez faible.

Chronologiquement, les données suivantes ont pu être rassemblées pour l'étude de l'évolution temporelle des largeurs de plages de la côte rocheuse :

- Orthophotographie (scannées) historique de l'IGN de 1942 (ou 1944)
- Orthophotographie (scannées) historique de l'IGN de 1952
- Orthophotographie IGN de l'été 2009
- Orthophotographie IGN de l'été 2011 (nommée aussi "ortho_littorale_V2")
- Orthophotographie IGN de l'été 2012
- Orthophotographie Google Earth du 16 octobre 2012 entre le Racou et Tallelauque
- Orthophotographie Google Earth du 01 septembre 2014 entre le Racou et Paulilles
- Orthophotographie Google Earth du 29 juin 2015 entre le Racou et Paulilles
- Orthophotographie IGN de l'été 2015
- Orthophotographie Google Earth du 21 septembre 2015 de toute la zone sauf le Racou
- Orthophotographie Google Earth du 23 octobre 2015 de toute la zone sauf plage du Minerai
- Orthophotographie Google Earth du 04 juillet 2016 entre le Racou et Port Vendres
- Image Satellite Pléiades du 05 mai 2017
- Orthophotographie Google Earth du 15 mai 2017 entre le Racou et la fin des plages de Paulilles

- Image Satellite Pléiades du 26 sept 2017 (complétée par une image du 04 octobre)
- Orthophotographie Google Earth du 13 juillet 2018 entre le Racou et l'anse de Paulilles
- Orthophotographie IGN de l'été 2018 (nommée aussi "ortho express")
- Image Satellite Pléiades du 02 octobre 2018
- Image satellite Pléiades du 04 septembre 2019

Enfin, **pour compléter l'analyse**, les effets de la dernière tempête **Gloria** sont étudiés de manière plus "qualitative" grâce à des images aériennes obliques prises en **ULM** pour le compte du Parc Naturel Marin du Golfe du Lion (© photos-hedelin.com). Trois survols successifs ont couvert, avec des images très hautes résolutions, l'ensemble de la zone d'étude. Ils ont été effectués aux dates :

- 26 septembre 2019
- 26 octobre 2019
- 28 janvier 2020

Ces images prises en ULM ont été orthorectifiées (déformation selon une méthode "projective") sur les principales baies de la zone d'étude : le Racou, les 3 plages du centre de Collioure, les 3 anses de Paulilles, les 3 plages principales de Banyuls, l'anse de Peyrefite, et enfin la plage du centre-ville de Cerbère. L'erreur de géoréférencement est de 5 m au maximum, mais on estime qu'en moyenne cette erreur est moindre, de l'ordre de 3 mètres. Lors de la projection de ces photos très obliques, il est complexe d'extraire une orthophotographie correcte de la zone des reliefs à terre. En revanche, nous nous attachons ici à ce que la projection s'avère correcte sur les parties de la plage proches du niveau de la mer. De cette façon, le trait de côte peut-être positionné.





Figure 38 : exemple d'une image aérienne oblique prise en ULM et de sa projection dans un référentiel géographique (© photos-hedelin.com, photo ici du 26/10/2019 du Racou pour le compte du PNMGL).

Numérisation des surfaces de plage et conversion en variation transversale moyenne du trait de côte

Afin d'extraire une information quantitative sur la variation du trait de côte entre les images, **la méthode a consisté à numériser les SURFACES DE PLAGE.** L'étendue de la zone mobile de la plage a été numérisée sous forme de polygones, d'après une photo-interprétation en SIG. La limite du haut de plage, qui n'est pas toujours visible sur les images en raison de l'ombre des reliefs des escarpements côtiers, a été choisie comme une zone fixe d'après les orthophotos aériennes de référence des étés 2012 et 2015 (le découvrement des rochers en haut de plage n'est ici pas pris en compte). Ainsi, entre les dates, seule la position du trait de côte, interface de la plage émergée et immergée, varie sur les polygones.

Afin de rendre compte des variations chronologiques sur des plages de taille très différente, les variations diachroniques de surfaces sont pondérées par la longueur du linéaire côtier de la plage en question. De cette manière les variations de surface sont **converties en distance transversale de variation moyenne du trait de côte,** qui sera positive vers la mer (ici interprétée comme de l'accrétion), et négative vers la terre (érosion). Comme pour la surface, cette distance est à chaque fois exprimée par rapport à la situation de référence (position = 0 m) de l'été 2015 (ortho-image IGN datée d'août 2015) :

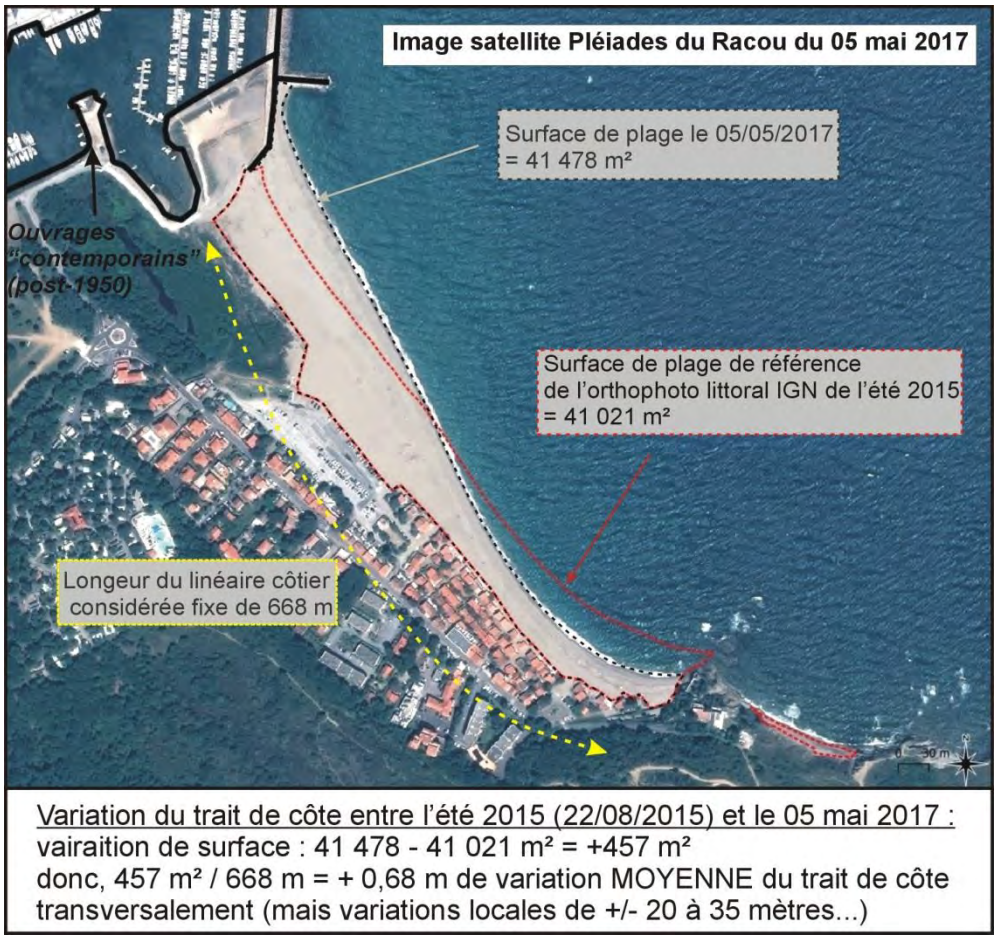


Figure 39 : méthodologie de conversion de variation de surface de plage en mouvement moyen du trait de côte représentatif de la totalité de la plage.

Résultats généraux sur l'ensemble du site d'étude

Table des surfaces et des variations transversales du trait de côte par rapport à l'été 2015

La surface de plage et la position absolue du trait de côte est donnée par rapport à la référence du trait de côte de l'été 2015 (

Tableau 10). D'après ce tableau, la variation spatiale et temporelle du phénomène d'accrétion est importante. Toutefois la variation moyenne du trait de côte sur chaque site (attention, très localement ce ne sera pas le cas) est en générale assez faible et proche de la marge d'erreur des mesures.

En première interprétation, il semblerait que l'érosion domine ces 2-3 dernières années sur les plages du sud de la zone d'étude, et particulièrement sur les plages proches de Banyuls.

SURFACE_SABLE	surface vraie sable été 2015 IGN	delta correction surface sable	linéaire sabeux /galets trait de côte plage	01/06/1942	01/06/1952	15/07/2009	01/08/2011	10/07/2012	16/10/2012	01/09/2014	29/06/2015	22/08/2015	21/09/2015	23/10/2015	04/07/2016	05/05/2017	15/05/2017	26/09/2017	04/10/2017	13/07/2018	01/08/2018	02/10/2018	04/09/2019	26/10/2019	28/01/2020
01_Racou	41 021	1 706	668	47 251	50 657	41 109	41 628	41 649	39 869	41 613	41 660	41 021		41 206	40 981	41 478	41 005	41 230	41 687	40 597	40 817	39 350	39 750	42 580	45 708
02_Porteils	2 727	617	167	2 347	2 620	2 765	2 889	2 885		2 484	2 868	2 727	2 669	2 554	2 971	3 198	2 976	3 098	3 119	2 758	2 973	2 852	2 798		
03_Ouille	6 346	-1 620	143	6 991	6 079	5 479	5 660	5 450	5 431	5 259	6 726	6 346	6 243	5 911	6 505	6 263	6 021	6 156		5 853	6 023	5 609	5 922		
04_SaintVincent_nord	2 275	-292	93	2 207	1 931	2 507	2 508	2 560	2 497	2 473	2 621	2 275	2 272	2 384	2 487	2 663	2 473	2 402		2 477	2 389	2 548	2 445	2 553	2 400
05_SaintVincent_sud	2 436	-107	114	3 164	3 272	2 861	2 780	2 775	2 710	2 716	2 704	2 436	2 646	2 716	2 715	2 774	2 578	2 372		2 641	2 618	2 524	2 538	2 635	2 604
06_Collioure_centre	2 993	-105	221	2 411	2 523	3 245	2 901	3 309	3 308	2 664	3 351	2 993	2 985	3 057	3 470	3 534	2 795	3 111		2 932	3 035	2 778	2 799	3 254	2 403
06bis_collioure est 3 mas	532	23	60		795	644	495	591	647	617	626	532		536	613	633	490	562		502	554	522	530		
07_Batteries	771	-2 105	90		412	707	653	851	853	703	871	771	756	630	858	935	811	906		750	761	722	731		
08_Oli	1 577	-1 187	76		807	1 543	1 685	1 672	1 661	1 483	1 594	1 577	1 531	1 461	1 620	1 714	1 654	1 657		1 624	1 576	1 615	1 532		
09_En_Baux	1 160	-793	90			1 118	1 138	1 176	1 066	1 026	1 298	1 160	1 201	1 115	1 111	1 399	1 164	1 197		1 181	1 108	1 317	975		
10_Port_Vendres	1 723	-4 151	144		1 516	1 834	1 739	1 993	1 953	1 861	1 806	1 723	1 669	1 599	1 924	1 928	1 833	1 977		1 712	1 676	1 577	1 689		
11_Bernardi	3 359	-5 260	207	4 802	3 767	3 687	3 651	3 740	3 574	3 617	3 801	3 359	3 488	3 101		4 035	3 496	3 457		3 495	3 644	3 845	3 220	3 372	2 569
12_Paulilles	7 147	-12 623	294	5 831	6 101	6 556	6 802	6 931	6 541	6 772	7 889	7 147	6 998	6 812		7 497	7 117	7 055		6 917	6 829	6 263	6 569	7 394	7 265
13_Forat	4 100	-5 767	278	4 133	4 805	3 863	3 935	4 079	3 953			4 100	3 883	3 734		4 610	3 800	4 352			4 199	4 348	3 787	4 183	4 197
14_Sanatorium	4 955	-6 556	169	4 433	4 694	4 862	4 977	5 095	4 722			4 955	4 809	4 899		5 138		4 751			4 727	4 773	4 658	4 688	4 923
15_Elmes	5 366	-9 128	154	4 417	4 755	5 552	5 432	5 511	5 267			5 366	5 138	5 245		5 494		5 056			5 251	5 128	5 167	4 823	5 171
16_Banyuls_centre	21 616	-14 778	394	9 844	14 512	19 810	21 002	21 009	20 885			21 616	21 070	22 317		22 374		21 346			21 180	20 763	20 914	22 341	19 732
17_Peyrefite	6 636	-6 631	200	8 644	9 106	7 026	6 671	7 233				6 636	6 534	6 449		7 152		6 539			6 504	6 505	6 165	7 034	7 165
18_Terrimbo	955	-1 806	125	1 456	1 595	1 276	1 050	1 193				955	1 098	42		1 356		994			1 093	1 078	631		
19_Cerbère	2 468	-3 290	188	3 497	2 992	2 878	3 025	2 856				2 468	2 519	2 107		3 042		2 713			2 729	2 630	2 570	2 849	2 822

position TDC	01/06/1942	01/06/1952	15/07/2009	01/08/2011	10/07/2012	16/10/2012	01/09/2014	29/06/2015	22/08/2015	21/09/2015	23/10/2015	04/07/2016	05/05/2017	15/05/2017	26/09/2017	04/10/2017	13/07/2018	01/08/2018	02/10/2018	04/09/2019	26/10/2019	28/01/2020
01_Racou	9.3	14.4	0.1	0.9	0.9	-1.7	0.9	1.0	0.0		0.3	-0.1	0.7	0.0	0.3	1.0	-0.6	-0.3	-2.5	-1.9	2.3	7.0
02_Porteils	-2.3	-0.6	0.2	1.0	0.9		-1.5	0.8	0.0	-0.3	-1.0	1.5	2.8	1.5	2.2	2.3	0.2	1.5	0.7	0.4		
03_Ouille	4.5	-1.9	-6.1	-4.8	-6.3	-6.4	-7.6	2.7	0.0	-0.7	-3.0	1.1	-0.6	-2.3	-1.3		-3.4	-2.3	-5.2	-3.0		
04_SaintVincent_nord	-0.7	-3.7	2.5	2.5	3.1	2.4	2.1	3.7	0.0	0.0	1.2	2.3	4.2	2.1	1.4		2.2	1.2	2.9	1.8	3.0	1.3
05_SaintVincent_sud	6.4	7.3	3.7	3.0	3.0	2.4	2.5	2.3	0.0	1.8	2.5	2.4	3.0	1.2	-0.6		1.8	1.6	0.8	0.9	1.7	1.5
06_Collioure_centre	-2.6	-2.1	1.1	-0.4	1.4	1.4	-1.5	1.6	0.0	0.0	0.3	2.2	2.5	-0.9	0.5		-0.3	0.2	-1.0	-0.9	1.2	-2.7
06bis_collioure est 3 mas		4.4	1.9	-0.6	1.0	1.9	1.4	1.6	0.0		0.1	1.3	1.7	-0.7	0.5		-0.5	0.4	-0.2	0.0		
07_Batteries		-4.0	-0.7	-1.3	0.9	0.9	-0.8	1.1	0.0	-0.2	-1.6	1.0	1.8	0.4	1.5		-0.2	-0.1	-0.5	-0.4		
08_Oli		-10.1	-0.4	1.4	1.3	1.1	-1.2	0.2	0.0	-0.6	-1.5	0.6	1.8	1.0	1.1		0.6	0.0	0.5	-0.6		
09_En_Baux			-0.5	-0.3	0.2	-1.0	-1.5	1.5	0.0	0.5	-0.5	-0.6	2.7	0.0	0.4		0.2	-0.6	1.7	-2.1		
10_Port_Vendres		-1.4	0.8	0.1	1.9	1.6	1.0	0.6	0.0	-0.4	-0.9	1.4	1.4	0.8	1.8		-0.1	-0.3	-1.0	-0.2		
11_Bernardi	7.0	2.0	1.6	1.4	1.8	1.0	1.2	2.1	0.0	0.6	-1.2		3.3	0.7	0.5		0.7	1.4	2.3	-0.7	0.1	-3.8
12_Paulilles	-4.5	-3.6	-2.0	-1.2	-0.7	-2.1	-1.3	2.5	0.0	-0.5	-1.1		1.2	-0.1	-0.3		-0.8	-1.1	-3.0	-2.0	0.8	0.4
13_Forat	0.1	2.5	-0.9	-0.6	-0.1	-0.5			0.0	-0.8	-1.3		1.8	-1.1	0.9			0.4	0.9	-1.1	0.3	0.3
14_Sanatorium	-3.1	-1.5	-0.5	0.1	0.8	-1.4			0.0	-0.9	-0.3		1.1		-1.2			-1.3	-1.1	-1.8	-1.6	-0.2
15_Elmes	-6.2	-4.0	1.2	0.4	0.9	-0.6			0.0	-1.5	-0.8		0.8		-2.0			-0.7	-1.5	-1.3	-3.5	-1.3
16_Banyuls_centre	-29.9	-18.0	-4.6	-1.6	-1.5	-1.9			0.0	-1.4	1.8		1.9		-0.7			-1.1	-2.2	-1.8	1.8	-4.8
17_Peyrefite	10.0	12.3	1.9	0.2	3.0				0.0	-0.5	-0.9		2.6		-0.5			-0.7	-0.7	-2.4	2.0	2.6
18_Terrimbo	4.0	5.1	2.6	0.8	1.9				0.0	1.1	-7.3		3.2		0.3			1.1	1.0	-2.6		
19_Cerbère	5.5	2.8	2.2	3.0	2.1				0.0	0.3	-1.9		3.1		1.3			1.4	0.9	0.5	2.0	1.9

Tableau 10 : extrait de la table des surfaces des 20 plages étudiées. La partie basse du tableau montre la position moyenne du trait de côte par rapport à la date de référence (orthophoto du 22 aout 2015), avec en vert les situations de plage plus large et en rouge les situations de plage plus étroite. Les dates écrites en bleu foncé correspondent aux orthophotos historiques, celles en rouge correspondent aux orthos récentes de l'IGN, celles en noir aux orthoimages de Google-Earth, et celles en vert aux images satellites Pléiades.

Une véritable tendance érosive généralisée sur le long-terme ?

Les données ne montrent pas une tendance historique générale à une réduction des surfaces de plage, cela depuis les premières images aériennes de l'IGN de 1944 et 1952.

La surface totale des plages principales, les "grandes plages" de la zone, à savoir : le Racou ; les plages de Collioure ; les 3 anses de Paulilles ; les 3 plages principales de Banyuls (Sanatorium, Elmes et Fontaulé) ; Peyrefite ; et enfin Cerbère, qui représentent à elles seules 90 % des surfaces de sables/graviers mobiles de la zone, **n'a varié que faiblement dans l'histoire** :

	1942	1952	2015
SURFACE TOTALE DES 20 plages étudiées	Couverture non complète dans nos analyses	122 937 m²	120 163 m² (n.b. : écart de +/- 7 000 m² sur tous les levés récents de 2009-2020 selon les années)
Surface cumulée sableuse (ou graviers/galets) des principales plages de la zone	100 634 m²	109 114 m²	104 372 m² (n.b. : écart de +/- 5 000 m² sur tous les levés récents de 2009-2020 selon les années)

Attention, ce résultat ne signifie pas que le trait de côte ne se déplace pas dans le temps et d'une saison à l'autre, mais que la tendance sur le long-terme n'est pas significative, comme soulevé par les études précédentes (EID, 2014). A l'inverse, à moyen et court terme, on voit bien ici que la surface de plage augmente entre 1942 et 1952, certainement en raison de conditions météo-marines plus favorables les mois/années précédant la campagne de 1952.

En définitive, on peut supposer que les plages de la côte rocheuse sont constamment et naturellement rechargées en sable, et montrent donc une certaine résilience. Autrement dit, les pertes de sable de l'avant-côte vers le large lors des plus fortes tempêtes sont compensées à un certain moment par la dégradation des roches environnantes présentes sur les petits fonds (< à 10 m) et le long des falaises avoisinant les baies (attaques des roches par le martellement des vagues). Dans ce processus, des fragments de roches sont expulsés à proximité du trait de côte par les vagues, le roulement et les collisions de cette fraction du sédiment à chaque tempête dans les rouleaux des vagues permettent la formation des grains de sable.

Par ailleurs, il est inexact de penser que la stabilité des plages est uniquement due à des interventions externes de l'Homme, au cours d'opérations de rechargements par exemple, car les plages qui se trouvent être le plus en érosion, sont aussi des plages urbaines telles celles de Collioure ou de Banyuls. A l'inverse, des plages naturelles où la présence de rechargement dans l'Histoire est peu probable, telles que les anses de Paulilles, ne montrent pas de tendances érosives particulières.

Un signal interannuel en lien avec les forçages par les vagues ?

La Figure 40 permet de voir que la surface générale des plages augmente entre les étés 2009 et 2012, puis diminue légèrement entre les étés 2012 et 2015 ; puis ré-augmente ensuite pour atteindre un paroxysme à la fin du printemps 2017, et enfin diminue entre l'été 2017 et l'été 2019.

Ce point est valable à la fois pour la totalité des plages, pour la somme des surfaces des plages principales (les baies faisant souvent face à l'est et aux houles marines), ainsi que celle de l'ensemble des plages sans comptabiliser le Racou (plage de très grande taille qui compte environ 1/3 de la surface totale en sable de la côte Vermeille, et qui pourrait influencer à elle seule les résultats de toute la zone).

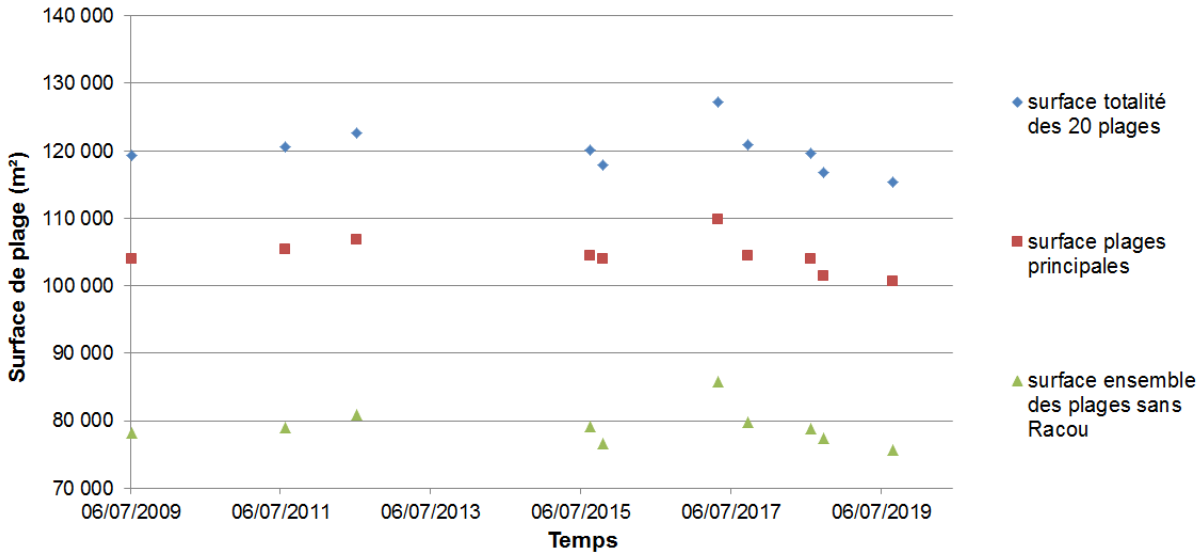


Figure 40 : variation temporelle des surfaces de plage cumulées sur tout le site d'étude, ou presque, entre 2009 et 2019

Comme le montre le graphique suivant (Figure 41), la majorité des grandes baies ou groupes de baies qui peuvent être rassemblées semblent avoir suivi simultanément ces 4 grandes phases de comportement entre les étés 2009 et 2019, avec cependant de légères disparités.

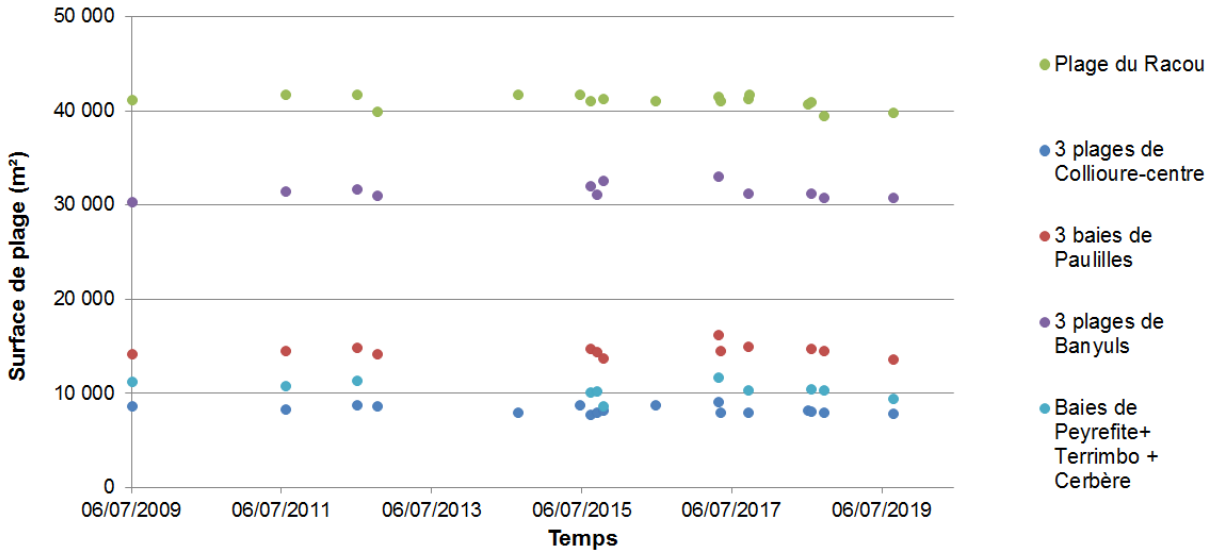


Figure 41 : variation temporelle des surfaces de plage sur les principaux groupes de baies entre 2009 et 2019

Interprétation des tendances 2009-2019

D'après la description précédente des climats de vagues, il est possible de préjuger que :

- L'accroissement de surface de plage entre 2009 et 2012 est à relier à une situation de la plage en retrait en 2009 suite à la tempête très puissante (bien que brève) de décembre 2008, suivie d'une phase de 3 hivers normalement énergétiques (cumul des évènements ; cf. Figure 37) mais ne présentant pas de cas de hauteurs de vagues exceptionnelles. Dans ce contexte, le sable évacué en profondeur en décembre 2008, lors d'une phase exceptionnelle avec plus de 7 m de hauteur significative de vagues au large, serait par la suite remonté progressivement vers la plage émergée (certainement par étape lors des épisodes de houle modérés).
- La décroissance de surface de plage entre l'été 2012 et 2015 est plus difficile à interpréter car d'une part on observe une baisse rapide entre début juillet et fin septembre 2012 en l'absence de coup de mer, d'autre part les cumuls énergétiques de houle sont modérés sur les 3 hivers concernés et la plage reste stable (cf. Figure 37). Toutefois des tempêtes ont eu lieu dont celle du 5 mars 2013 qui fut très forte, mais qui a eu lieu au début de la période. Les phases hivernales sont ensuite calmes ou modérées, ce point laisse donc penser que la marque d'une tempête majeure n'est pas toujours importante et/ou assez rapidement contrebalancée par des phases de moindre agitation.
- La progradation (avancée vers la mer ou accrétion) du trait de côte entre 2015 et 2017 semble liée à l'hiver 2016-2017, d'après les données de 2016 du Racou à Port-Vendres. Cet hiver est pourtant marqué par une répétition importante d'épisodes de houle de taille moyenne à forte. Toutefois, il peut être remarqué que l'importance de la taille des vagues au pic d'agitation diminue tour à tour à chacun de ces évènements (la première tempête de l'hiver du 13 octobre 2016 est la plus forte, la puissance maximale des épisodes de houle décroit ensuite). Ce point explique certainement une situation favorable à l'accrétion sur la plage émergée.

- La dernière phase (printemps 2017 - été 2019) est nettement érosive. Cette situation semble due principalement à la tempête de mars 2018, mais une érosion forte est notée également l'hiver suivant, qui ne comporte pas de fortes tempêtes (3 épisodes de Hs = 4m)

Il est donc difficile de conclure, en première analyse, que les plus fortes tempêtes, ou les hivers les plus énergétiques, sont systématiquement synonymes de recul du trait de côte à l'échelle de la saison.

Il semblerait plutôt que le trait de côte varie à très grande vitesse sur les plages de la côte rocheuse, et qu'une érosion forte (ex. : tempête) est potentiellement rapidement compensée.

Le recul du trait de côte est parfois significatif en période estivale, en l'absence de coups de mer.

Une forte mobilité du trait de côte l'été ?

Plusieurs points de questionnement sont soulevés par les données, dont le rôle des houles de Tramontane, celui des embouchures et l'impact de la tempête Gloria.

Globalement, le point principal d'interrogation concerne la variabilité du tait de côte relevée ici par des levés qui encadrent une période estivale. On note par exemple une diminution des surfaces de plage sur la Figure 41 durant l'été 2017 (entre le 5 mai et le 26 septembre), avec un recul moyen du trait de côte de 1,60 m en moyenne (à l'exception de la plage du Racou). En été les plages sont censées être moins dynamiques car presque exclusivement soumises à des vagues de Tramontane ou des houles courtes de très petite taille (venant des vents thermiques de sud-est en Catalogne Espagnole, ce qui fut le cas lors de l'été 2017 d'après le site marc.ifremer.fr). Même si un recul du trait de côte est possible l'été en lien avec le changement de conditions de houle, il est plus probable que ce recul doive être attribué à la marge d'erreur sur la donnée. Comme décrit au début du chapitre concernant les données et leurs marges d'erreur, il est important de vérifier dans ce travail que les érosions observées à une date donnée sont ensuite vérifiées sur plusieurs images ultérieures, ce qui conforte alors de manière indéniable la tendance si l'érosion concernée n'excède pas un recul du trait de côte de 2 m (au-delà, peu de doutes sont possibles).

A ce titre :

- L'érosion légère de -1,50 m en moyenne que l'on observe entre le 29/06/2015 et le 21/09/2015 est en partie due aux conditions météorologiques lors des levés, donc à la marge d'erreur de +/-2 m, mais que toutefois, l'érosion observée par exemple à Paulilles (de -3 m entre les dates) est avérée et liée au remodelage du profil sableux par les petites vagues estivales.
- De même, le recul de -1,60 m en moyenne entre le 05/05/2017 et le 26/09/2017 serait lié en partie aux conditions lors des levés, mais le recul reste avéré sur les plages de Collioure (Collioure centre et Saint-Vincent), mais aussi sur la plage de Bernardi, et de la totalité des plages étudiées entre Banyuls (Sanatorium) et Cerbère.

Au regard des images, le trait de côte bouge effectivement lors de la période estivale sur les plages de la côte rocheuse, et cela au-delà de la marge d'erreur. Toutefois, on constate souvent en zoomant sur les images que les changements sont relativement faibles, et liés au remaniement du profil de bas de plage, très mobile en fonction des conditions de vagues (modification d'un régime de houles marines au début de l'été vers une dominance de clapots houles/courtes obliques, telles que celles générées par la Tramontane).

Le rôle de la Tramontane sur les petites plages tournées vers le nord

Si l'on considère uniquement les plages du Portell, de l'Ouille, ainsi que la plage des Batteries, d'Oli et d'en-Baux (entre Collioure et Port Vendres), où il est évident que les forts épisodes de Tramontane participent activement à la dynamique sédimentaire de la plage, les comportements semblent légèrement différents des autres plages de la côte.

La Figure 42 montre que la surface de ces plages a augmenté significativement durant les printemps et étés 2015, 2016 et 2017, par rapport aux autres étés ou autres périodes de l'année (la surface de plage diminue au début de l'automne 2015, suite à un coup de mer, pour ré-augmenter ensuite). Cette largeur diminue ensuite à la fin de l'hiver 2018, possiblement avec la tempête de début mars 2018. L'augmentation soudaine des largeurs de plage entre les étés 2014 et 2015, visible sur la Figure 42, pourrait s'expliquer par le cumul très important des épisodes de forte Tramontane avec des houles supérieures à 2 m de Hs à la bouée (cumul de plus de 15 épisodes de Tramontane de cette puissance entre septembre 2014 et juin 2015).

La houle de Tramontane serait donc un facteur favorisant l'accrétion sur la plage émergée de ces baies tournées vers le nord, à l'inverse des houles marines qui semblent néfastes sur ces sites quand elles sont fortes. Ce point méritera cependant d'être vérifié par plusieurs observations ultérieures. Notons par ailleurs que les houles de l'hiver 2014-2015 ont aussi favorisé l'accrétion d'autres types de plages, faisant face à l'est, comme celles de la baie de Paulilles (anses de Bernardi et Paulilles).

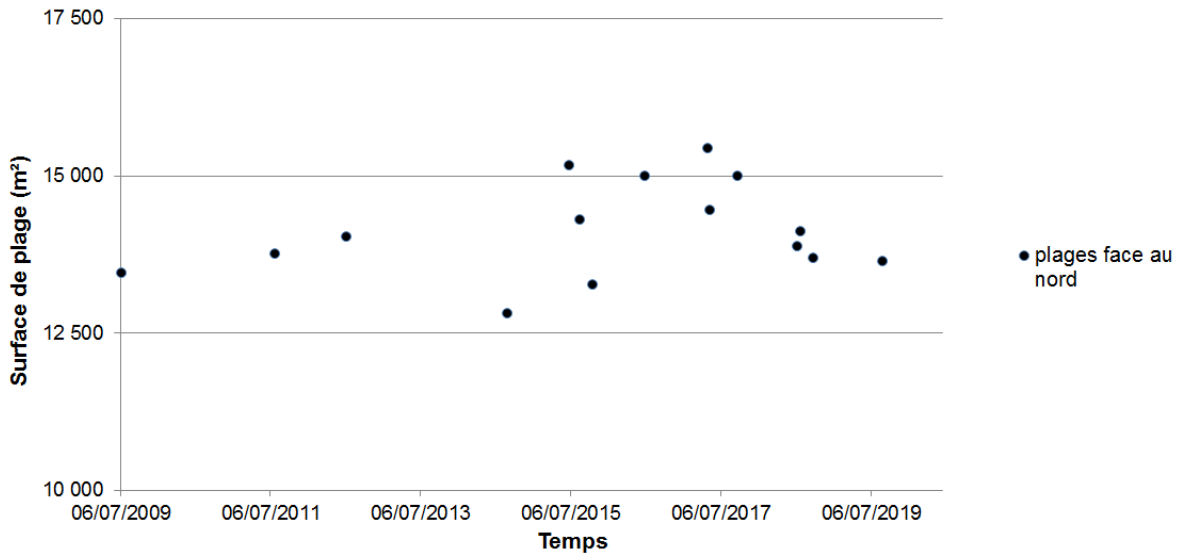


Figure 42 : variation temporelle des surfaces de plage pour l'ensemble des plages tournées vers le nord entre 2009 et 2019

Les houles de Tramontane , si elles sont très fortes et répétées durant l'hiver et le printemps, semblent favoriser l'élargissement des plages, en particulier sur les sites exposés à la Tramontane au nord du cap Béar.

Le rôle des petits fleuves côtiers ?

S'il est évident que les zones d'embouchures bougent beaucoup plus que les autres, et que des mouvements importants de sable sont avérés lors des crues, une analyse sur la plage centrale de Banyuls, ou sur la plage de l'Ouille, ne permet pas de relier de manière significative les épisodes de crues à des effets de rechargement généralisés de la plage émergée. Seule l'augmentation de la plage devant l'embouchure à de rares dates (octobre 2019 ou janvier 2020 à Banyuls, novembre 2014 sur la plage de l'Ouille) permet de relier la dynamique de la plage indéniablement à celle du fleuve.

Il est difficile de déterminer si la construction visible d'un delta d'embouchure sur les images est due à un effet de chasse du stock déjà présent sur la plage, ou bien d'un apport nouveau en sédiments par le fleuve.

En comparant de nombreux cas (avec et sans embouchure), il apparait que **le rôle des fleuves/torrents est secondaire** dans le rechargement en sable des plages face aux houles. Toutefois, il est évident que si la crue de 1940 se reproduisait aujourd'hui, des quantités importantes de sédiments seraient charriées jusqu'en mer.

Résultats par cellule sédimentaire et par plage

La zone de terminaison des dérives du Racou

Evolution historique et contemporaine du Racou (cellule partiellement isolée)

La plage du Racou a subi une modification importante avec la construction du port d'Argelès en 1976 (Mission d'aménagement du littoral "Racine"). Depuis, la largeur de plage n'a cessé de diminuer, au vu des données disponibles. Cette érosion existait déjà depuis 1895 comme l'indiquent des traits de côte historiques plus anciens (données DREAL-Occitanie mesurées par Sabatier et Hanot, 2012 ; résultats non présentés ici).

Lors de la crue exceptionnelle de 1940 ("Grand Aïguat") l'apport solide de la Massane a manifestement été responsable de l'avancée d'un delta sableux en mer, visible encore sur les images historiques de 1944 et 1952 (voir la petite proéminence du trait de côte vers la mer face à l'embouchure, Figure 43). Depuis, il est peu probable qu'une des crues répertoriées, de puissance bien moindre, ait pu recharger la plage de manière comparable. De plus, depuis 1976 la Massane termine sa course dans le port.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
01_Racou	41 021 m²	668 m	47 251 m² (+9,3 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015	50 657 m² (+14,4 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015

Les photos de 1944 et 1952 (Figure 43) montrent une situation initiale plus favorable qu'aujourd'hui du point de vue du stock sédimentaire, et une embouchure qui était encore naturelle.

Sur les images, la petite flèche sableuse (cordon de sable) qui barre l'embouchure alterne entre une déviation du chenal vers le nord en 1944, et une terminaison plus directe en 1952, ce qui montre que la direction de la dérive sédimentaire littorale (courant créé par l'obliquité des vagues) alterne à haute fréquence entre une direction nord-sud et sud-nord. Toutefois, il est évident que la dérive long-terme du sable est dirigée vers le sud puisque la plage au nord de la marina est sujette à l'accrétion depuis la construction du port en 1976, ce qui justifie aussi que la plage du Racou s'érode davantage ces dernières décennies. En marge du site, les criques de Porteils semblent reculer à moins grande vitesse.

Aujourd'hui, le stock de sable du Racou peut donc difficilement se renouveler. L'apport en sable depuis les plages plus à l'est (criques de Porteils) reste certainement très modéré et limité aux épisodes de houle venant du sud-est, ce qui reste à préciser dans une étude de la propagation de la houle et de sa réfraction. Du fait du platier rocheux, un effet de contre-dérive local est possible.

A.



B.



Figure 43 (a, b) : situation de la plage du Racou en 1944 (a) et en 1952 (b) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015, présentées par des contours rouges, et aux traits épais noirs montrant le contour du port et de ces digues.

En ce qui concerne l'évolution récente du site, depuis 2009 la plage alterne entre des courtes phases d'érosion et d'accrétion. Aucun lien évident n'est ici relevé avec les tempêtes puisque les observations de terrain indiquent que la forme du profil et la pente de cette plage, d'ordinaire très raide, change fréquemment sous l'action du jet de rive et des vagues des vents marins ou de Tramontane (le relief de la berme, plus ou moins haut et abrupt, est constamment remanié par le battement des vagues).

La phase de plus forte d'érosion fut celle de la fin de l'été et du début de l'automne 2012, en l'absence pourtant de coup de mer conséquent. Par la suite la plage recule fortement entre le milieu de l'été et le début de l'automne 2018. Un comportement plus attendu est relevé avec un recul de la plage lors de l'hiver 2017-2018 (rôle supposé de la forte tempête de mars 2018) ; puis une récupération l'hiver suivant, qui comparativement fut moins extrême en termes de Hs des vagues.

L'hiver 2019-2020 paraît exceptionnel ; les images obliques prises en ULM indiquent un gain de sable sans précédent, localisé au nord de la plage, en réponse aux deux tempêtes, dont l'épisode Gloria (dernière phase relevée).

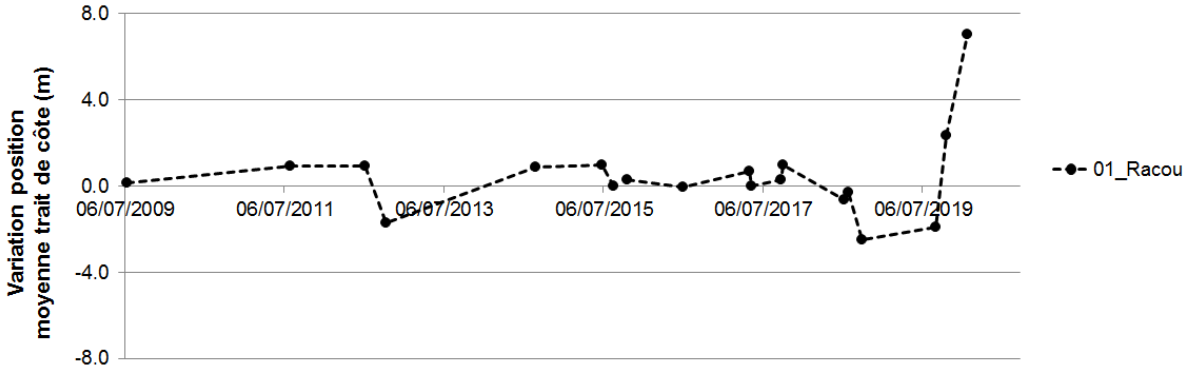


Figure 44 : évolution de la position moyenne du trait de côte au Racou entre 2009 et fin janvier 2020 (post-Gloria) d'après les images aériennes et satellites disponibles

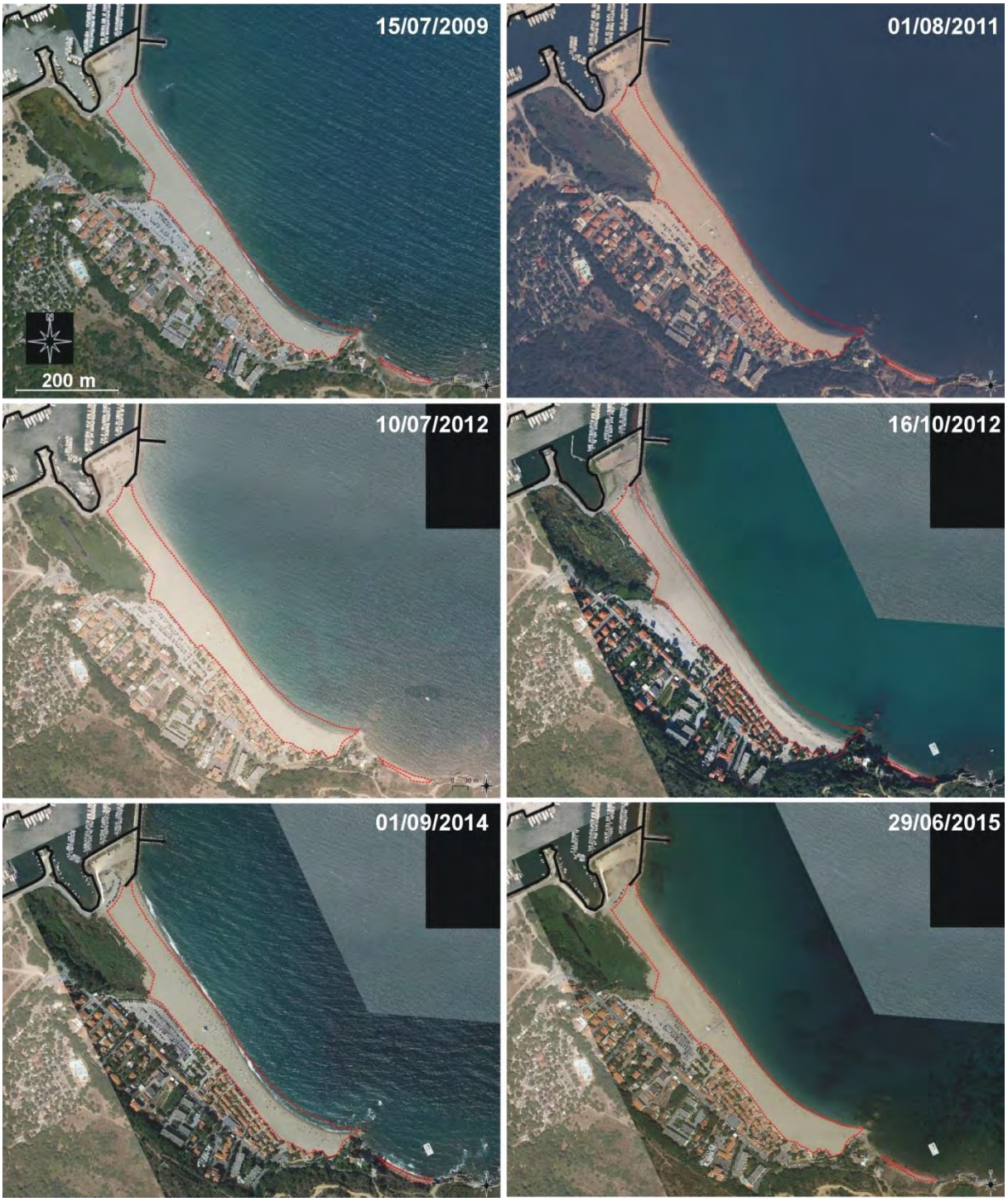
Le facteur le plus important de la dynamique sédimentaire court-terme de la plage du Racou est certainement **sa capacité de "rotation"**. En effet, la séquence complète des images aériennes indique que le trait de côte, de forme concave, peut pivoter autour d'un axe de rotation central proche de l'accès principal à la plage (juste au nord de la limite entre le parking et les maisons).

Sur les ortho-images de la Figure 45 suivante, le trait de côte tourne par rapport à l'état de référence de l'été 2015. Il est fréquent, comme en 2011-2012, 2017 puis 2020, que la plage s'élargisse sur sa moitié nord en se creusant dans sa moitié sud. Ce creusement après Gloria semble important, et seules les dates de l'été 2017, après l'hiver 2016-2017, montrent un creusement aussi prononcé.

Cette rotation peut s'expliquer facilement par le climat de vagues qui a opéré les semaines/mois précédant l'image, et plus particulièrement la direction des houles. Pour rendre compte de la direction dominante de la dérive littorale, le cumul d'énergie de la composante longitudinale au trait de côte du flux d'énergie des vagues a été calculé entre chaque image (en considérant un trait de côte d'orientation générale 150-330°N au Racou ; et un flux d'énergie donné par les paramètres de vagues mesurés à la bouée de Banyuls). On constate ainsi un cumul de de 1 835 835 KJ/m d'énergie dirigé vers le S-SE entre le 01/09/2014 et le 29/06/2015, tandis qu'on peut calculer un cumul de près de 20 749 515 KJ/m d'énergie dirigé vers le N-NO entre le 04/07/2016 et le 05/05/2017. Ces valeurs

signifient que dans le premier cas, les houles ont été dominées par la Tramontane, et dans le second cas par les houles marines. Ce point explique que le trait de côte du Racou ait pivoté dans le sens anti-horaire entre le 01/09/2014 et le 29/06/2015, puis fortement dans le sens horaire entre le 04/07/2016 et le 05/05/.

A.



B.


22/08/2015
200 m
21/09/2015
Image non disponible
23/10/2015
04/07/2016
05/05/2017
15/05/2017

C.


26/09/2017
04/10/2017
200 m
13/07/2018
01/08/2018
02/10/2018
04/09/2019

D.

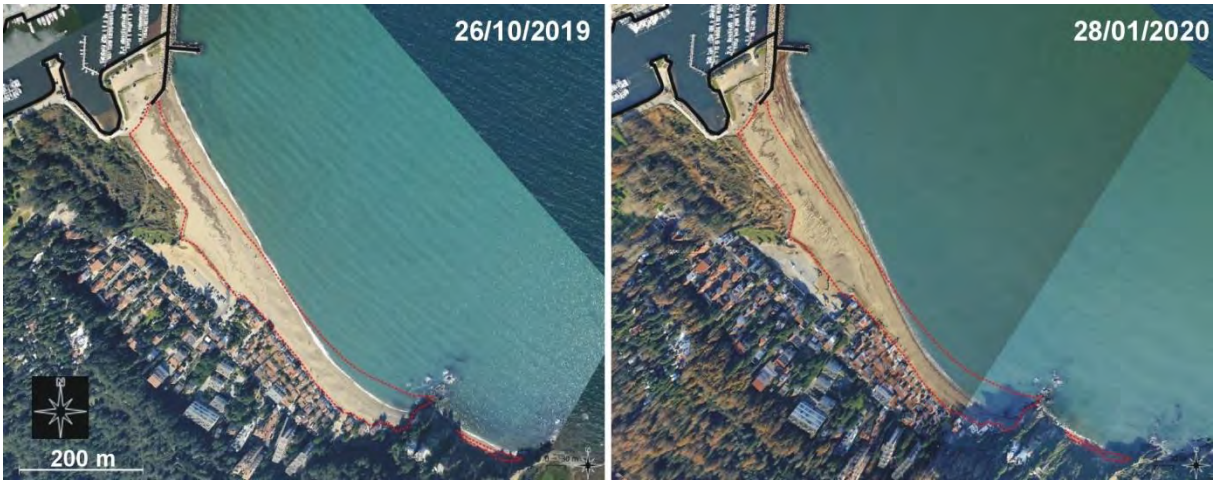


Figure 45 (a,b,c,d) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site du Racou entre 2009 et fin janvier 2020

La cellule sédimentaire des plages de Porteils à l'Ouille

On regroupe ici la plage d'en Sourre, l'anse du Portell et les petites criques de Porteils. Sur ce secteur la dérive sédimentaire se fait principalement d'est en ouest sous l'action des houles marines. Ici le sable transite sur les platiers que l'on peut qualifier de sablo-rocheux devant les plages, et il n'est pas impossible que lors des fortes houles marines, du sable fin du bas de la zone immergée (-5 à -15 m) puisse être transporté de la plage de l'Ouille vers les plages de Porteils.

Sur le plateau rocheux est présent un herbier de posidonies peu profond. Il participe de manière légère à la dissipation de la houle, mais fournit surtout un matériel de banquette via les laisses de mer sur la plage émergée, qui aide à protéger les criques de Porteils de l'érosion et de l'assaut des vagues, en complément du cordon de sables/graviers/galets existant.

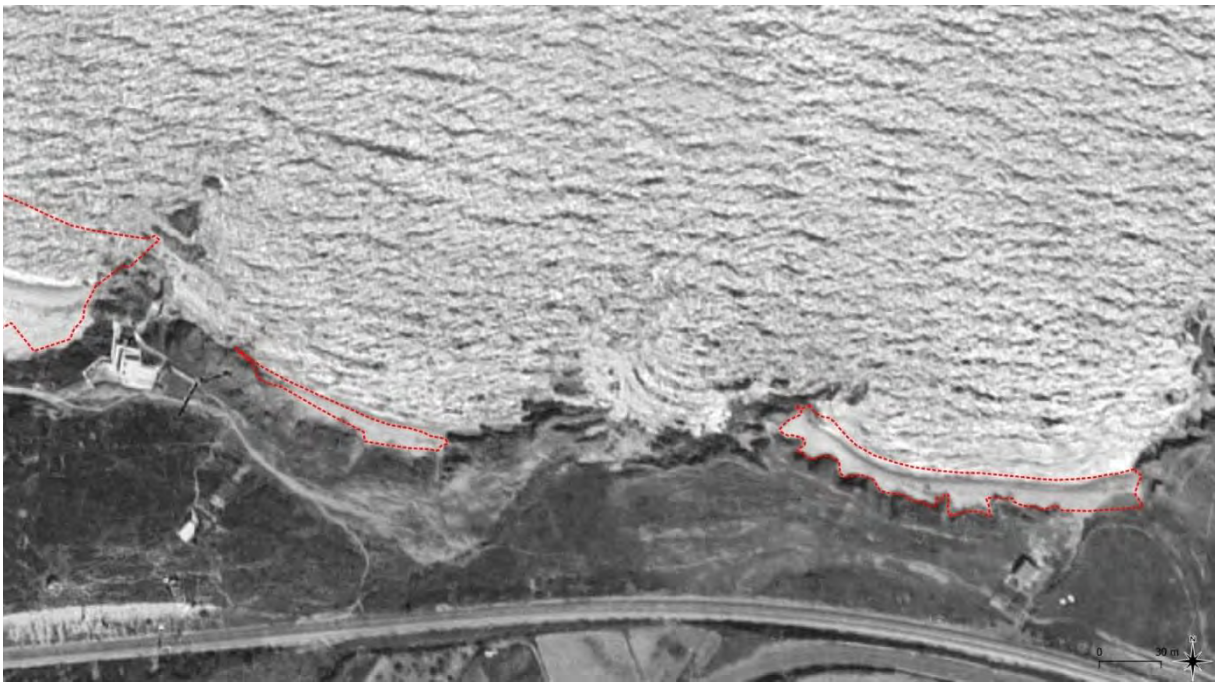
Evolution historique et contemporaine des plages de Porteils

Dans ce travail, seule la grande plage de l'anse du Portell a été sujette à l'étude quantitative des mouvements de son trait de côte.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
02_Portell (anse principale)	2 727 m²	167 m	2 347 m² (-2,3 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015	2 620 m² (-0,6 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)

Dans l'ensemble, ces plages n'ont pas fait l'objet depuis 1944 d'une tendance érosive aussi forte qu'au Racou, et à première vue, elles sont plutôt même sujettes à l'accrétion (notons qu'il en est de même pour les criques de Porteils, en pied de falaise du camping).

A.



B.

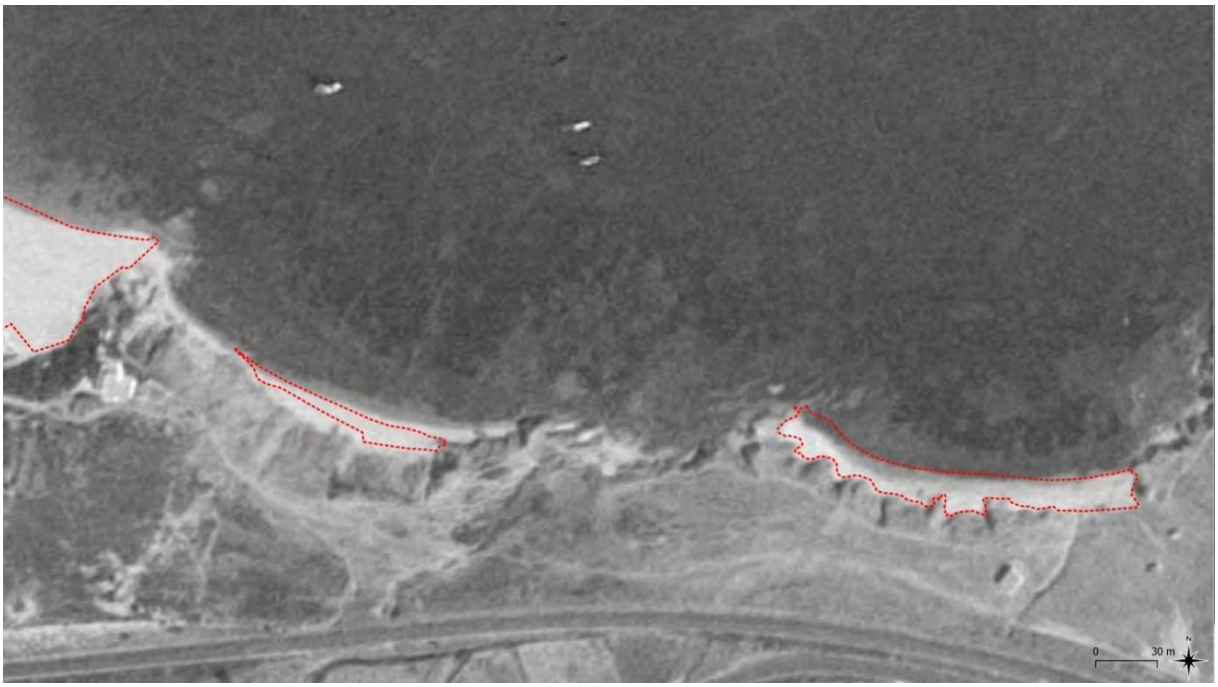


Figure 46 (a, b) : situation des plages du Portell (à droite) et d'en Sourre (à gauche) en 1944 (A) et en 1952 (B) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 présentées par des contours rouges.

Sur la période récente, il s'avère à nouveau que le trait de côte oscille à haute fréquence vers la terre et la mer (à l'échelle de quelques jours à quelques mois ; cf. Figure 47), et que les phases décrites

précédemment sont en majorité analogues : entre 2009 et 2012 la plage s'élargit, elle s'érode avant la fin de l'été 2014, s'élargit à nouveau avant l'été 2015 ; re-diminue temporairement, surtout après le premier coup de mer de l'automne 2015 ; la plage profite ensuite de conditions d'accumulation pendant les saisons hivernales 2015-2016 et 2016-2017. Après un retrait du trait de côte en 2017-2018 (tempête majeure de mars ?), la tendance générale semble être récemment à la diminution de la largeur de la plage.

Malgré toutes ces variations, la largeur de plage est au final équivalente lors des étés 2009, 2015 et 2019. On peut donc constater que le "prisme sableux" maintient sa position d'accroche au support rocheux et conserve pour l'essentiel son stock émergé, malgré des conditions de submersion totale par les vagues et une réflexion des brisants sur la falaise lors des plus fortes tempêtes venant de l'est.

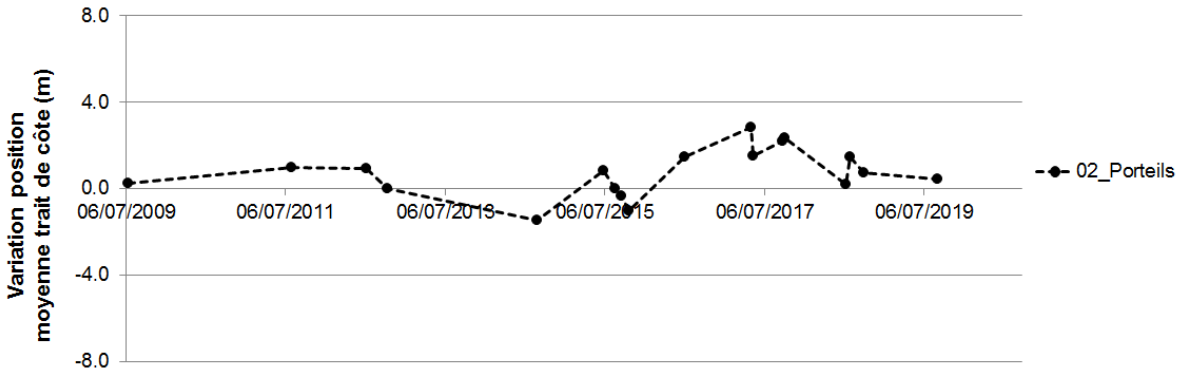
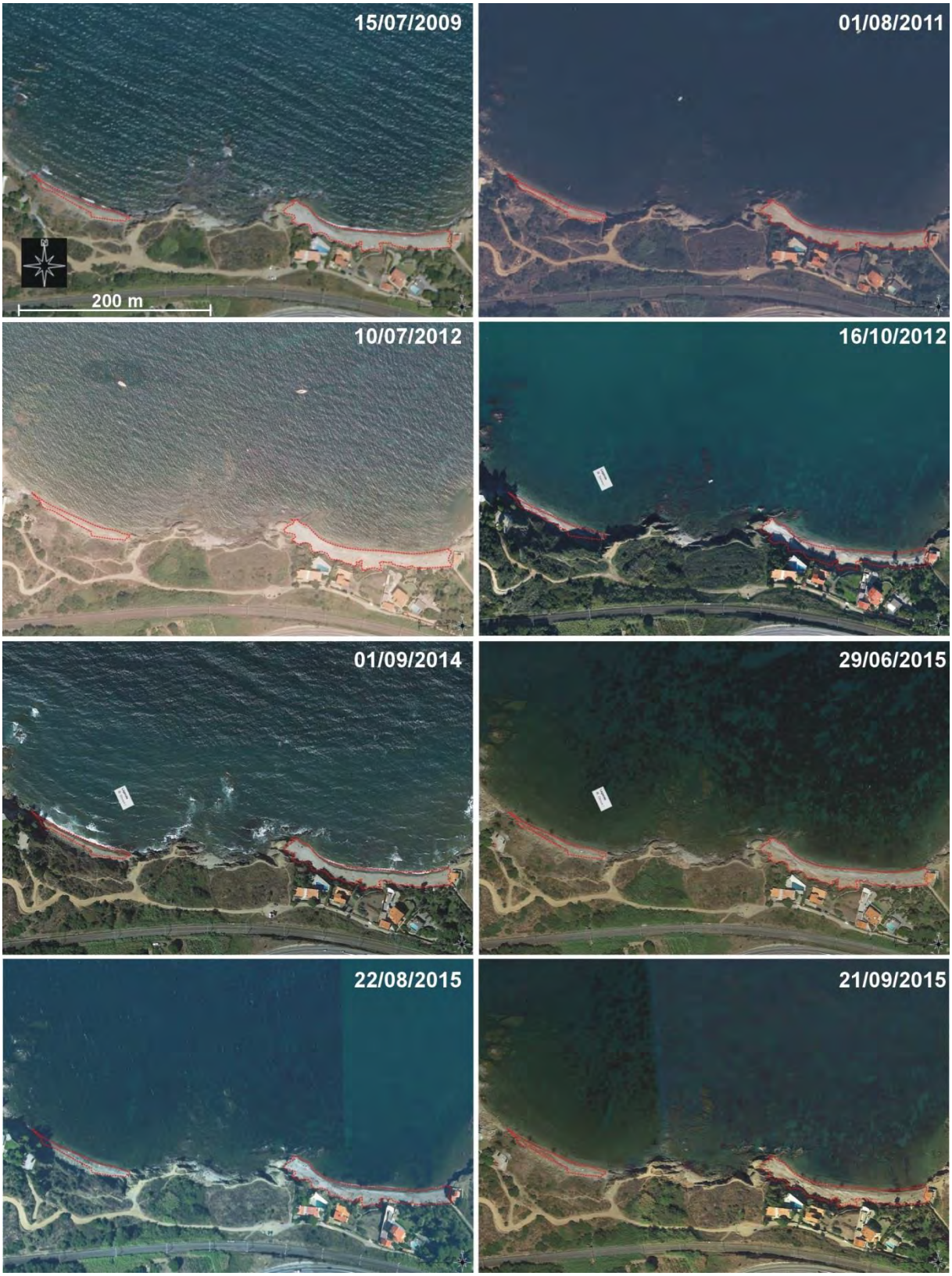


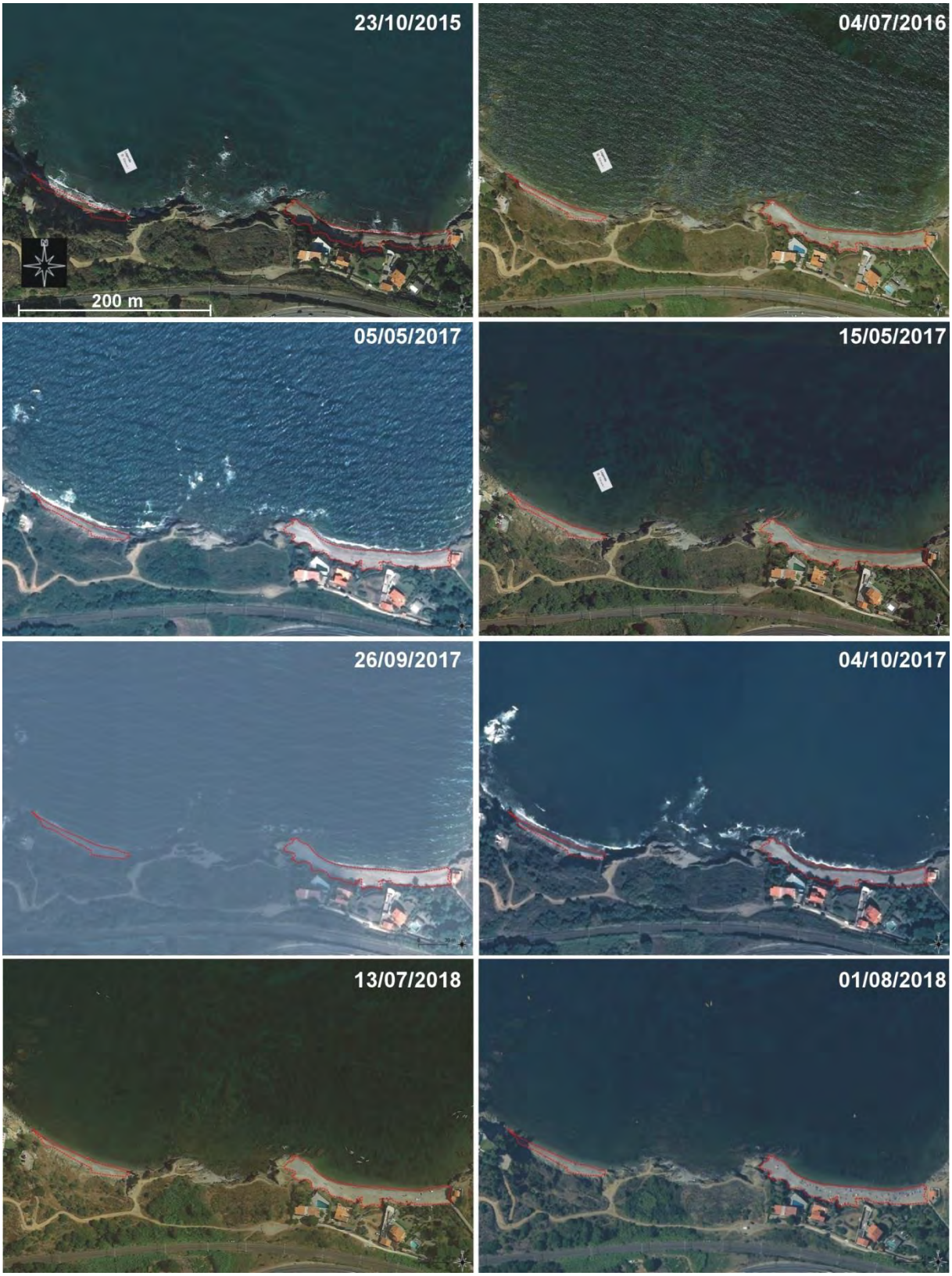
Figure 47 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage du Portell, entre l'été 2009 et l'été 2019 d'après les images aériennes et satellites disponibles

Richard (1993) décrit des mouvements longitudinaux importants sur la plage d'en-Sourre et du Portell avec des bancs de galets et sables différenciés qui se déplacent en banc et migrent d'un côté ou l'autre de la plage, ensevelissant plus ou moins le pied de la falaise selon les cas. Sur le trait de côte des ortho-images et données utilisées, à la différence du Racou, des rotations sont plus difficilement décelables.

A.


15/07/2009
200 m
01/08/2011
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
22/08/2015
21/09/2015

B.


23/10/2015
200 m
04/07/2016
05/05/2017
15/05/2017
26/09/2017
04/10/2017
13/07/2018
01/08/2018

C.



Figure 48 (a, b ,c) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site de Porteils entre l'été 2009 et 2019

La tempête Gloria n'a pas provoqué une érosion aussi forte que sur la portion sud de la plage du Racou. D'après les images prises en ULM avant et après l'évènement, le maximum d'érosion se serait localisé sur la plage à l'ouest de la plage principale étudiée.



Figure 49 : photographies prises en ULM des plages du Portell et d'en Sourre après les tempêtes d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL.

Evolution historique et contemporaine de la plage de l'Ouille

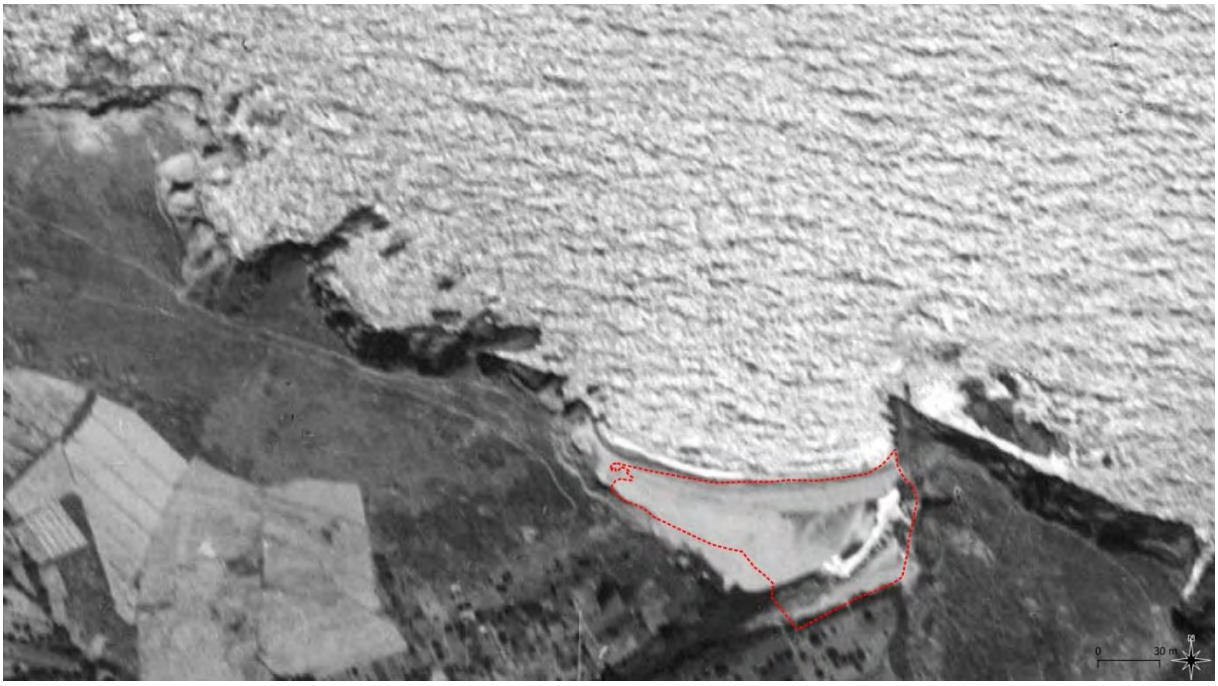
La plage de l'Ouille a la particularité d'être située dans une crique au débouché d'un fleuve, le Ravaner. Elle présente donc une plage large avec une embouchure dynamique à l'échelle interannuelle, mais presque toujours fermée durant l'année par un bourrelet de sable (flèche sableuse et de graviers / petits galets < 10 cm selon Richard, 1993), qui ne s'ouvre que lors des phases de crues, presque toujours concomitantes des épisodes de tempêtes marines.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sableux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
03_Ouille	6 346 m²	143 m	6 991 m² (+4,5 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015	6 079 m² (-1,9 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)

Par conséquent, la dynamique du trait de côte sur ce site est différente, et plus forte que la moyenne des autres plages de la côte rocheuse.

A l'échelle long-terme, la plage varie beaucoup, mais reste là-aussi stable (Figure 50), ce qui signifie que les potentiels départs de sable certaines saisons sont compensés par des apports les saisons suivantes.

A.



B.

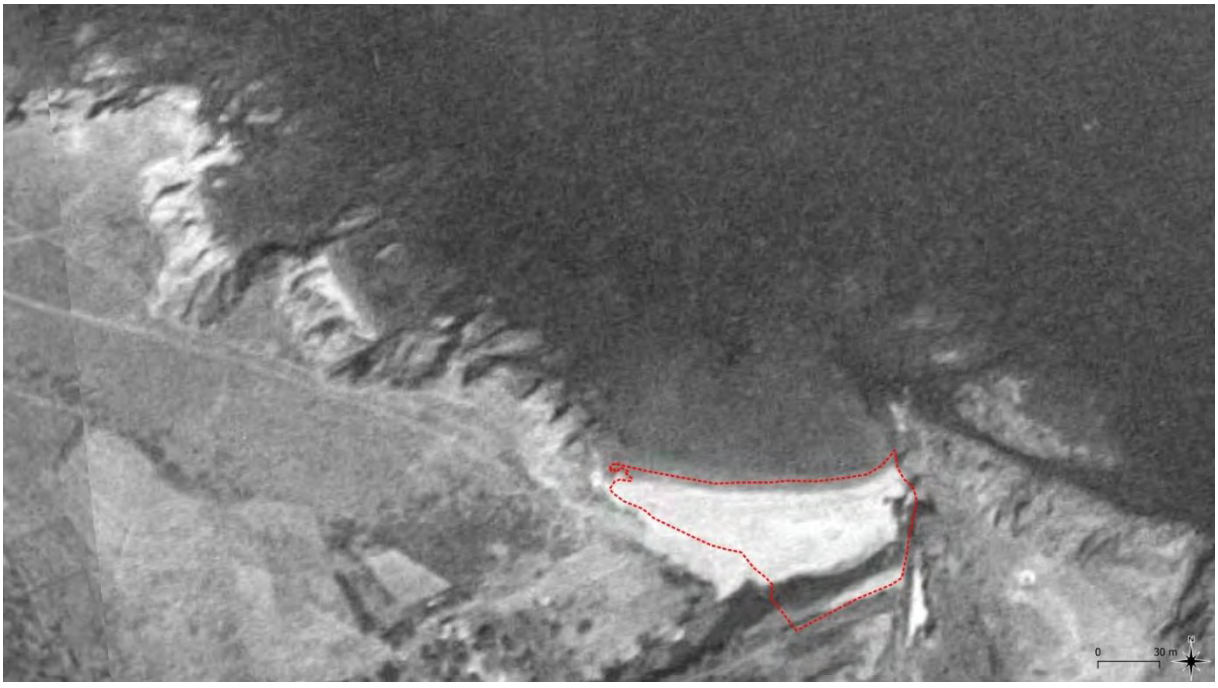


Figure 50 (a, b) : situation de la plage de l'Ouille en 1944 (a) et en 1952 (b) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 présentées par des contours rouges.

A l'échelle de la dernière décennie (Figure 51), le trait de côte était plus en retrait entre 2009 et 2014, puis a avancé de près de 10 m durant l'hiver 2014-2015. On suppose que les fortes crues de fin novembre 2014 et mars 2015 observés sur la Baillaury voisine ont été fortes aussi pour le Ravaner, comme le montre la modification importante de la forme du chenal vers la mer. Ces crues et les probables nouveaux apports solides (graviers…) pourraient être responsables, en accompagnement d'une année particulièrement riche en épisodes de Tramontane (supposée favoriser des apports

depuis l'avant-côte d'après l'analyse précédente) de cette avancée nette du trait de côte. Toutefois, l'impact de la crue de mars 2013, d'ampleur comparable, n'a apparemment pas eu le même effet, mais nous manquons en cela d'ortho-images pour le prouver, ce qui privilégie à nouveau l'hypothèse d'un rôle dominant du transport par les vagues et les courants du sable émergé/immergé de la plage et le remodelage du profil.

Depuis les étés 2015 et 2018, la largeur de la plage de l'Ouille ne cesse de diminuer, certainement en raison des départs de sable sous l'action des tempêtes marines, particulièrement fortes durant l'automne-hiver 2016-2017 et 2017-2018 (ex. forte tempête de mars 2018). La dernière saison 2018-2019, comparativement plus calme en termes de houles marines et plus riche en Tramontane, a provoqué un retour du sable sur la plage émergée.

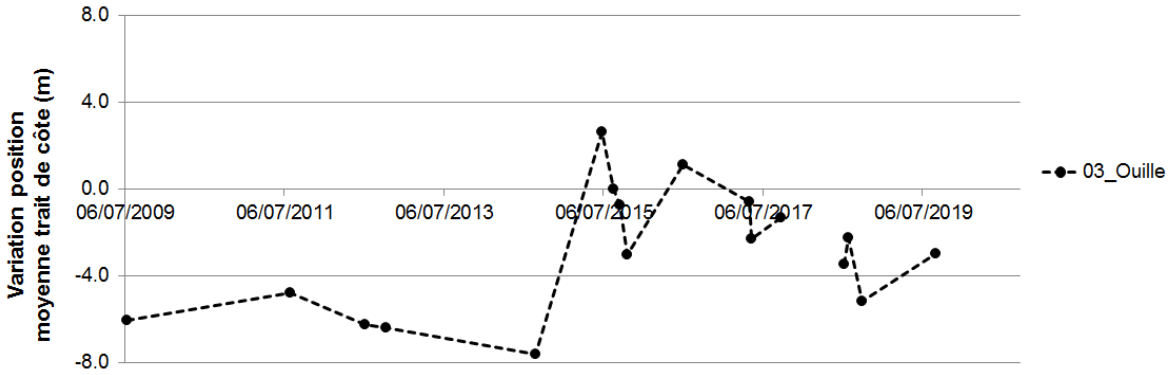


Figure 51 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage de l'Ouille entre l'été 2009 et l'été 2019 d'après les images aériennes et satellites disponibles

Une certaine rotation de la plage est visible à nouveau avec une dualité détectée entre les épisodes de Tramontane et de houles marines. On assiste par exemple à un creusement de la partie est de la plage (contre la pointe) durant l'hiver 2012. Cette érosion est compensée ensuite durant l'été, probablement à cause des houles de Tramontane. A nouveau la plage se creuse durant l'hiver énergétique 2016-2017, et on note que seule la partie ouest de la plage, placée en aval dérive, ne recule pas.

Les dernières images obliques prises en ULM (Figure 53) indiquent indéniablement la présence d'un delta sous-marin devant l'embouchure après la tempête d'octobre 2019, divulguant un effet "de chasse" du sable de l'embouchure (sable du lit de la rivière et du cordon de plage) sous l'action du débit de la crue du 23 octobre 2019. La tempête Gloria provoque ensuite un nouveau remodelage intense de l'embouchure, qui reste ouverte encore 7 jours après la tempête. Du point de vue de l'érosion, il semble que la tempête ait ramené du sable sur la plage comme au Racou, en particulier sur la partie ouest (aval-dérive) de l'anse.

A.


15/07/2009
200 m
01/08/2011
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
22/08/2015
21/09/2015

B.


23/10/2015
200 m
04/07/2016
05/05/2017
15/05/2017
26/09/2017
04/10/2017
IMAGE NON DISPONIBLE
13/07/2018
01/08/2018

C.



Figure 52 (a, b ,c) : évolution chronologique des ortho-images sur le site de l'Ouille entre l'été 2009 et 2019



Figure 53 : photographies prises en ULM des plages de l'Ouille après les tempêtes d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL.

La cellule sédimentaire de la baie de Collioure et de ses plages à l'est

Cette cellule comporte de nombreuses plages en enfilade, en quittant dans le sens de la dérive la plage d'en Baux (sur la commune de Port-Vendres, anciennement purement rocheuse), en passant par les plages de l'Oli, des Batteries, jusqu'aux plages du centre-ville et du fond de la baie de Collioure (la Balette, du centre dite du "Faubourg", Boramar et Saint Vincent). Si ces plages peuvent être regroupées dans une même cellule, Il est toutefois peu probable que lors des tempêtes des échanges importants de sable puissent se faire entre les plages à l'est et celles du centre-ville. Seul le stock de sable le plus fin présent vers -10 m a la possibilité de rester en suspension dans les courants et éventuellement connecter les différentes anses (via des courants d'arrachements et de dérive générés par les brisants). Les plages du centre-ville sont indéniablement en connexion sédimentaire par un fond sableux assez plat dans la baie, montrant également un banc de sable liant le phare du bout de la jetée à l'anse de la Balette. Les plages du centre sont séparées par des pointements rocheux sur lesquels sont construits les monuments historiques de la chapelle Saint-Vincent, l'Eglise Notre-Dame des Anges, et le château royal de Collioure. Ces obstacles limitent les possibilités d'échanges des sédiments les plus grossiers de la plage émergée lors des tempêtes.

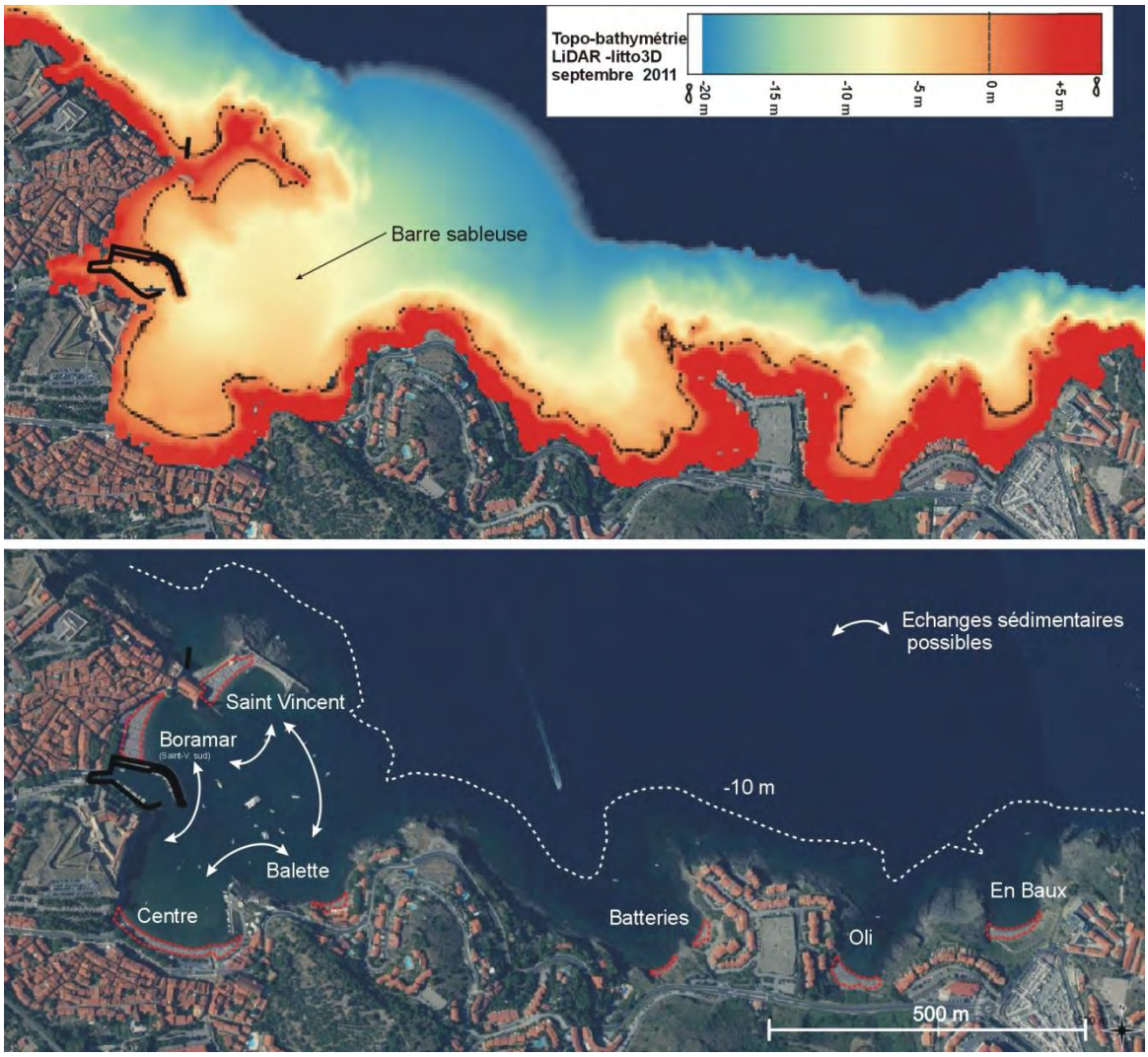


Figure 54 : carte bathymétrique et descriptive des plages et caps rocheux de la cellule de Collioure à Port-Vendres et des échanges sédimentaires possibles

Richard (1993) décrit dans son mémoire d'étude qu'à Collioure, chaque plage est "entretenue" avec de nombreuses interventions : brûlage des laisses de mer (beaucoup de cannes de Provence) à la fin de l'hiver ; étalement des galets de haut de plage et reprofilage avant l'été ; **rechargement avec les alluvions du Tech** (depuis les "sablières d'Ortaffa") et ses graviers (2-3 cm) mélangés à des limons. On ne sait pas aujourd'hui si ces pratiques existent encore.

Comme il a été relevé sur les images d'archives, Richard (1993) souligne fortement que les plages des Batteries, de l'Oli et d'en-Baux présentent peu de matériel et que la plage est constituée de nombreux remaniements des remblais de gravats qui surplombent chaque petite anse.

Evolution historique et contemporaine des plages de Saint-Vincent sud et Boramar à Collioure

Ces plages ont fortement changé dans le temps avec la construction du port entre 1962 et 1970, au débouché d'un petit cours d'eau au sud de la plage de Boramar et au nord du Château : le "Ravin du Douy". Afin de construire le port, du sable a été dragué. Ce sable a apparemment servi à créer artificiellement une nouvelle plage, au nord de l'église, de l'autre côté de la plage Saint-Vincent, dans une crique rocheuse à l'origine, au nord-ouest du mur de la jetée. Le sable de cette plage disparait chaque année après l'été, et selon P.Richard (1993), des interventions récurrentes avant chaque été, remplacent les nombreux déchets accumulés et autres éléments naturels de la laisse de mer par du matériel sableux.

Richard (1993) indique que la plage de Saint-Vincent sud, qui relie l'îlot Saint-Vincent à la pointe rocheuse de l'Eglise n'est en fait pas naturelle mais artificielle. Cette plage a été édifiée consécutivement à la construction de la jetée sur un banc de sable existant (mais basé sur un substratum schisteux proche), cela vers 1886.

A.



B.

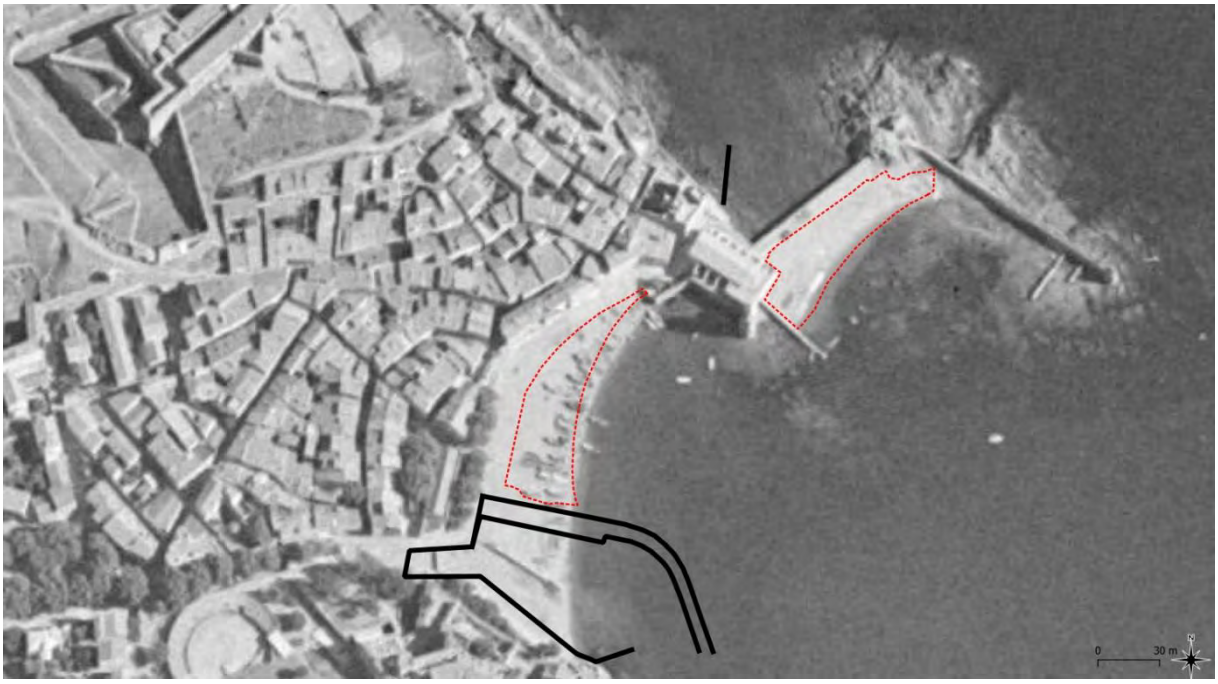


Figure 55 (a, b) : situation des plages de Saint Vincent sud et Boramar en 1944 (a) et en 1952 (b) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 (contours rouges). Les traits noirs montrent les ouvrages et le port réalisés dans les années 60.

Historiquement, Saint-Vincent se montre stable, tandis que Boramar s'érode, certainement en réaction aux aménagements du port.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
04_Saint Vincent sud	2 275 m²	93 m	2 207 m² (-0,7 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015	1 931 m² (-3,7 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)
05_plage Boramar	2 436 m²	114 m	3 164 m² (+6,4 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015	3 272 m² (+7,3 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)

Lors de la dernière décennie (Figure 56 et Figure 57), la réaction des deux plages fut assez similaire avec une phase de relative stabilité (ou lente érosion) entre 2009 et 2014, puis une "crise d'érosion" au début de l'été 2015 (entre fin juin et fin aout), rapidement rétablie à Boramar, mais plus difficilement cicatrisée à Saint Vincent nord où 2 années furent nécessaires. Un nouvel épisode d'érosion intervient entre le printemps et la fin de l'été 2017. Par la suite les fortes tempêtes de mars 2018 et de fin 2019 / début 2020 (Gloria) ne paraissent pas, malgré leurs impacts temporaires incontestables en termes de submersion, avoir engendré beaucoup d'érosion.

La plage de Boramar est sujette à de petites rotations de son trait de côte avec par exemple une érosion très visible de la partie nord à la fin de l'été 2012 (cf. Figure 58a).

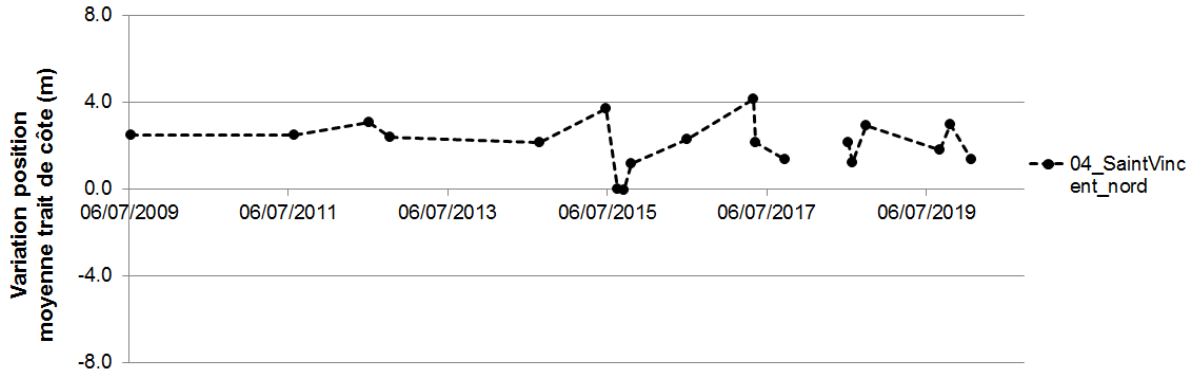


Figure 56 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage de Saint-Vincent nord entre l'été 2009 et l'été 2019 d'après les images aériennes et satellites disponibles

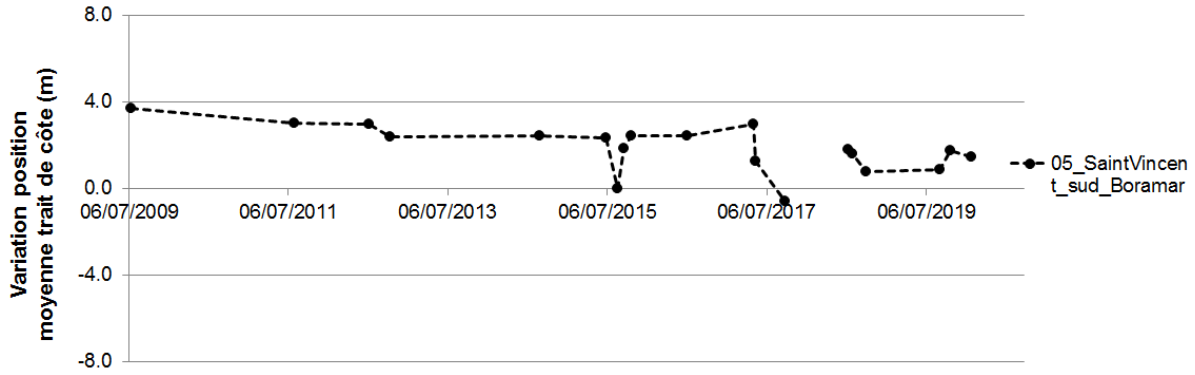
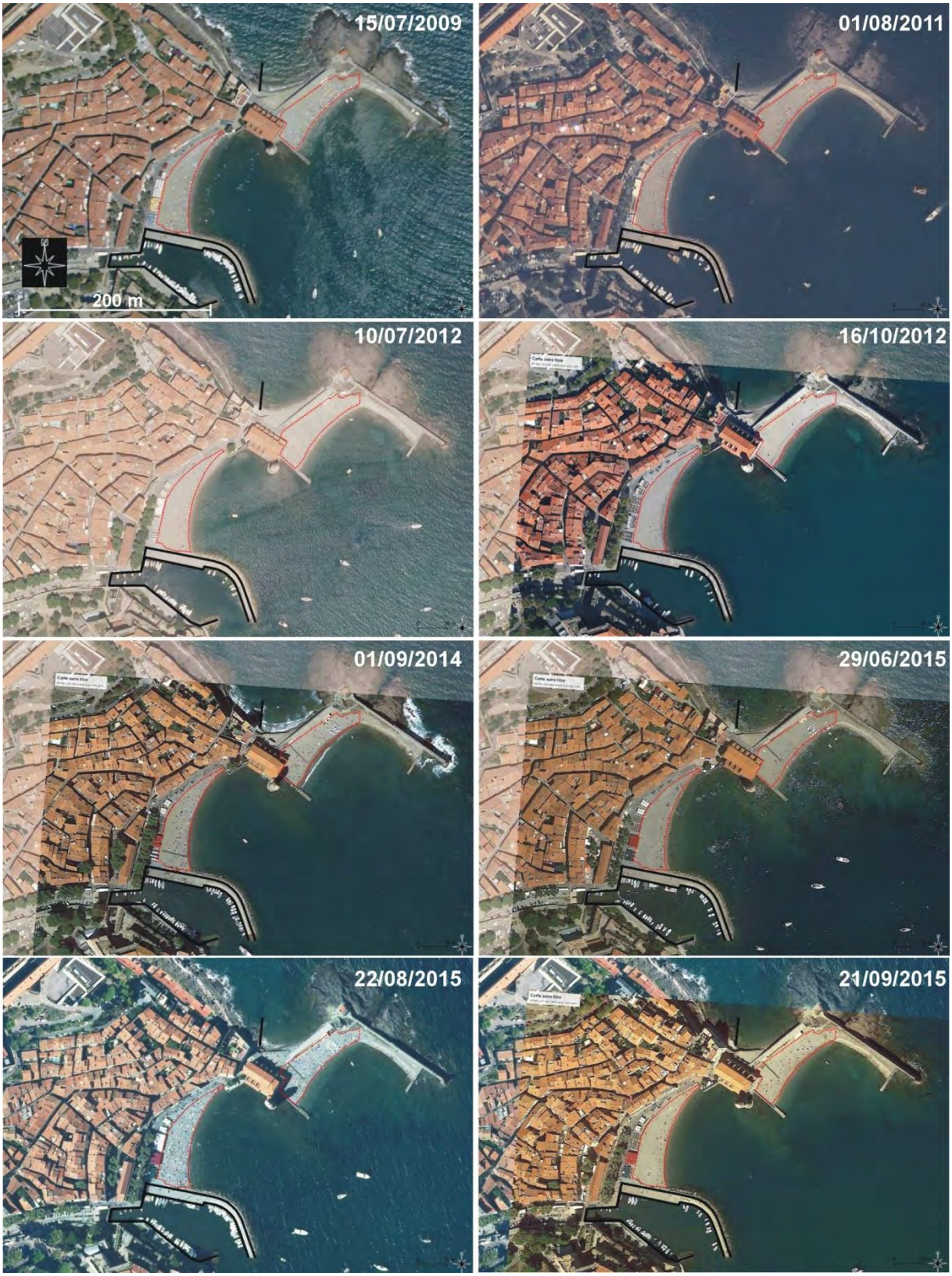
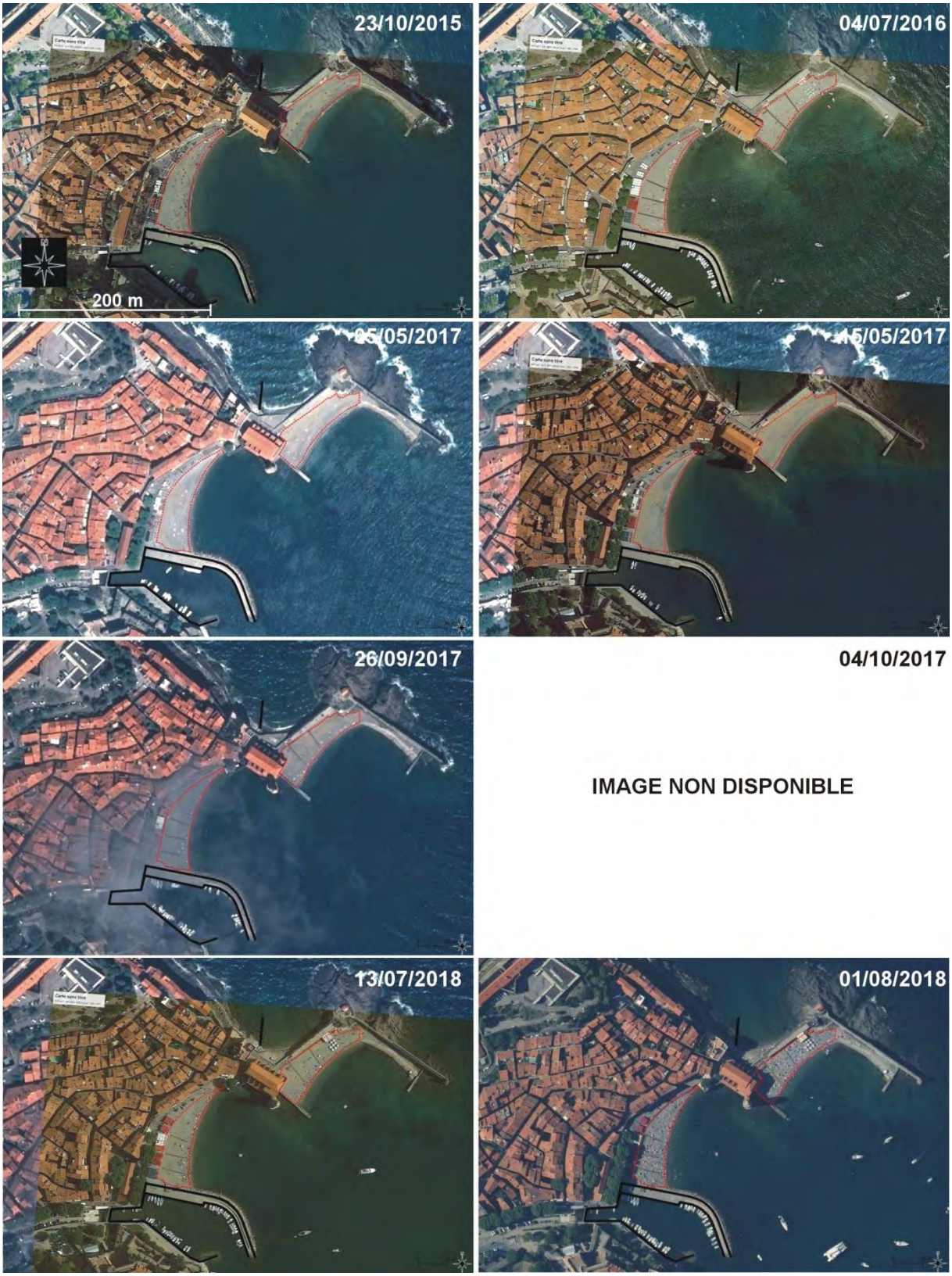


Figure 57 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage de Saint-Vincent sud / Boramar entre l'été 2009 et l'été 2019 d'après les images aériennes et satellites disponibles

A.


15/07/2009
200 m
01/08/2011
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
22/08/2015
21/09/2015

B.


23/10/2015
200 m
04/07/2016
05/05/2017
15/05/2017
26/09/2017
04/10/2017
IMAGE NON DISPONIBLE
13/07/2018
01/08/2018

C.



Figure 58 (a,b,c) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site de Collioure Saint Vincent entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria)

Evolution historique et contemporaine des plages de Collioure Centre et de la Balette

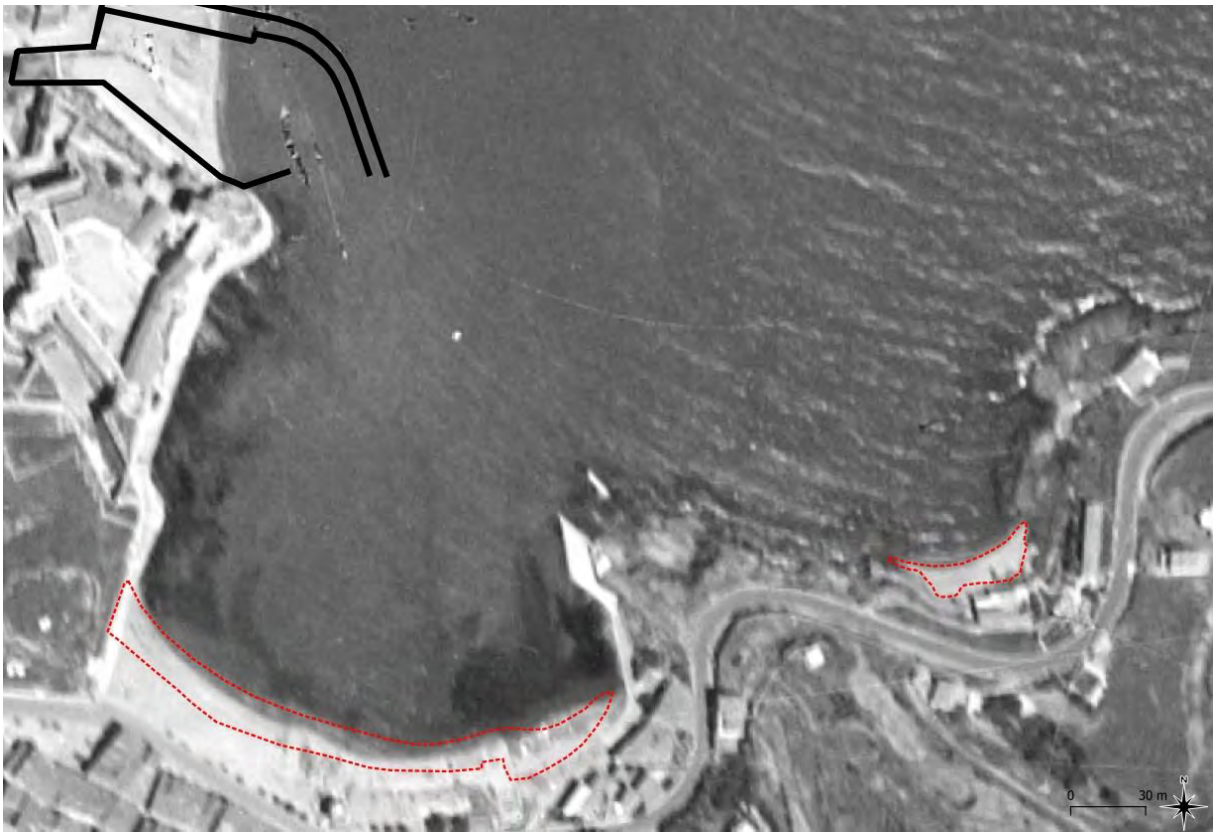
La plage du centre (dite plage du Port d'Avall ou du Faubourg) est séparée de celle de la Balette par un petit cap rocheux dans le repli duquel existe depuis de nombreuses décennies un quai d'amarrage pour les navires. Néanmoins les fonds sableux qui séparent les plages sont situés entre -4 et -7 m ce qui laisse envisager certains échanges de sable sur la partie immergée du profil.

Ces plages peuvent aussi être considérées comme stables depuis 1940, mais là encore de nombreuses interventions de l'Homme sont soupçonnées. La grande plage du centre aurait même une largeur légèrement supérieure aujourd'hui. Celle-ci peut être divisée en deux à cause de la digue-émissaire qui sépare la plage du Port d'Avall de la plage dite "du Boutigué". Cette digue canalise le torrent "Coma Chéric" (eaux de ruissellement de la ville essentiellement).

Il peut être observé qu'à l'inverse des plages comme celles de l'Ouille, de Paulilles, de Banyuls ou de Peyrefite, où l'apport par le torrent en sable est resté significatif jusque récemment, les plages urbaines de Collioure sont peu larges et moins "nourries" en sable. De nombreux fragments de remblais sont d'ailleurs présents (galets de briques) sur la plage de la Ballette, témoignant d'un apport en gravier assez faible.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
06_Collioure plage du centre	2 993 m²	221 m	2 411 m² (-2,6 m en moyenne de recul du trait de côte par rapport à 2015	2 507 m² (-2,1 m en moyenne de recul du trait de côte par rapport à 2015)
06bis_Saint Vincent sud (plage Boramar)	532 m²	60 m	Impossibilité de réaliser une mesure précise (image peu nette)	795 m² (+4,4 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)

A.



B.

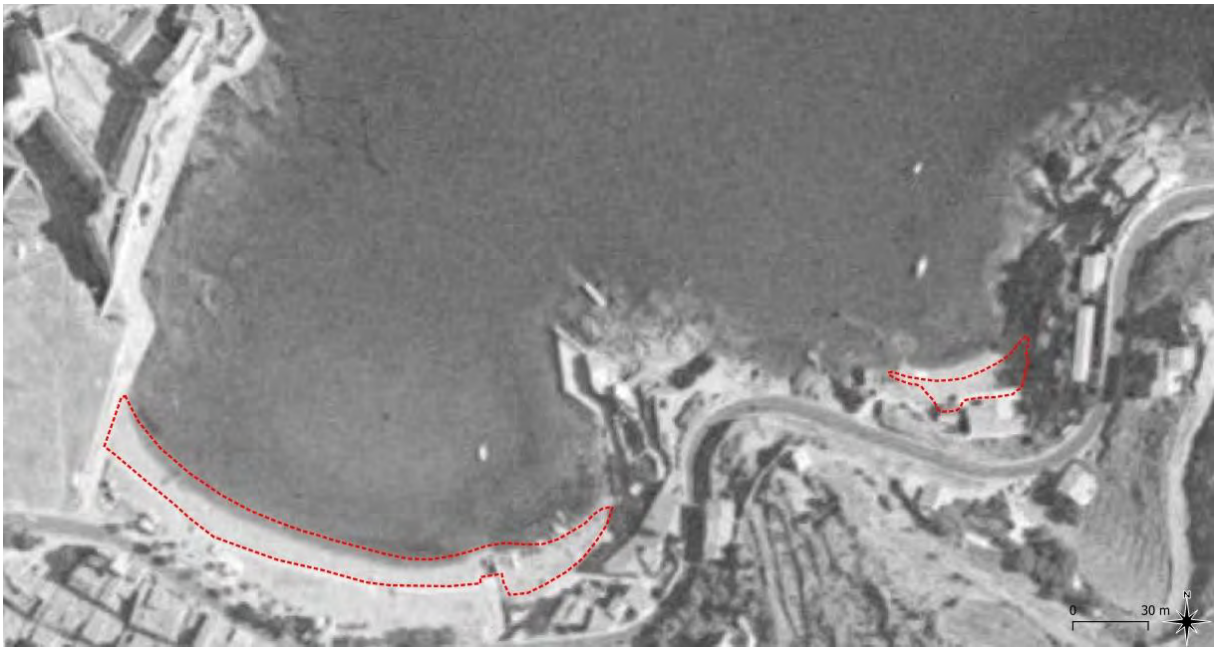


Figure 59 (a, b) : situation de la plage de Collioure en 1942 (a) et en 1952 (b) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 présentées par des contours rouges.

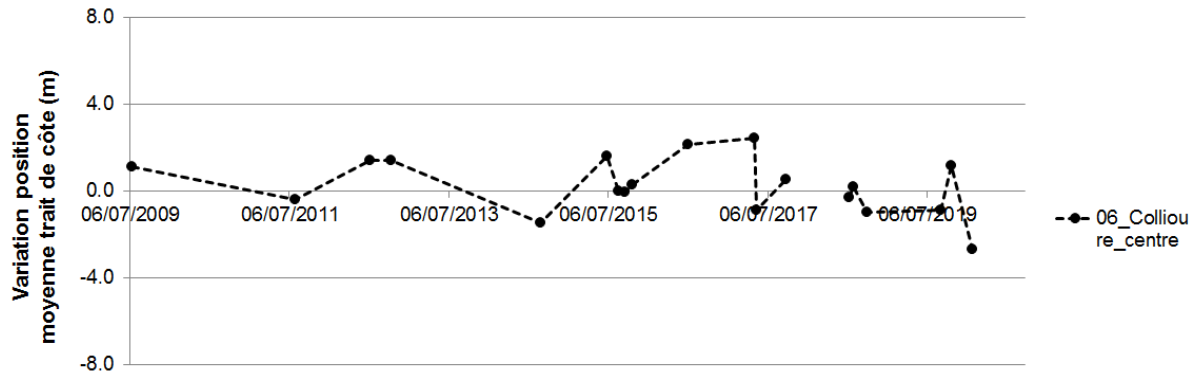


Figure 60 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage du centre de Collioure entre l'été 2009 et l'été 2019 d'après les images aériennes et satellites disponibles

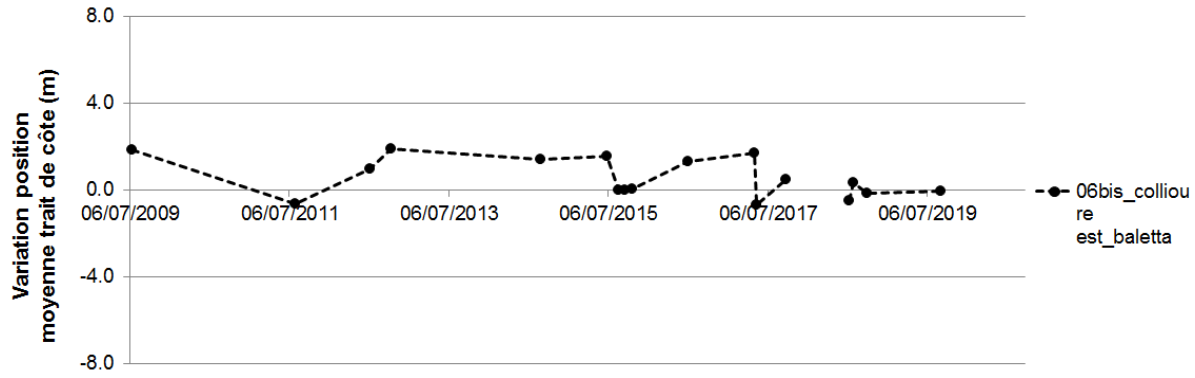


Figure 61 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage de Baletta (est de Collioure) entre l'été 2009 et l'été 2019 d'après les images aériennes et satellites disponibles

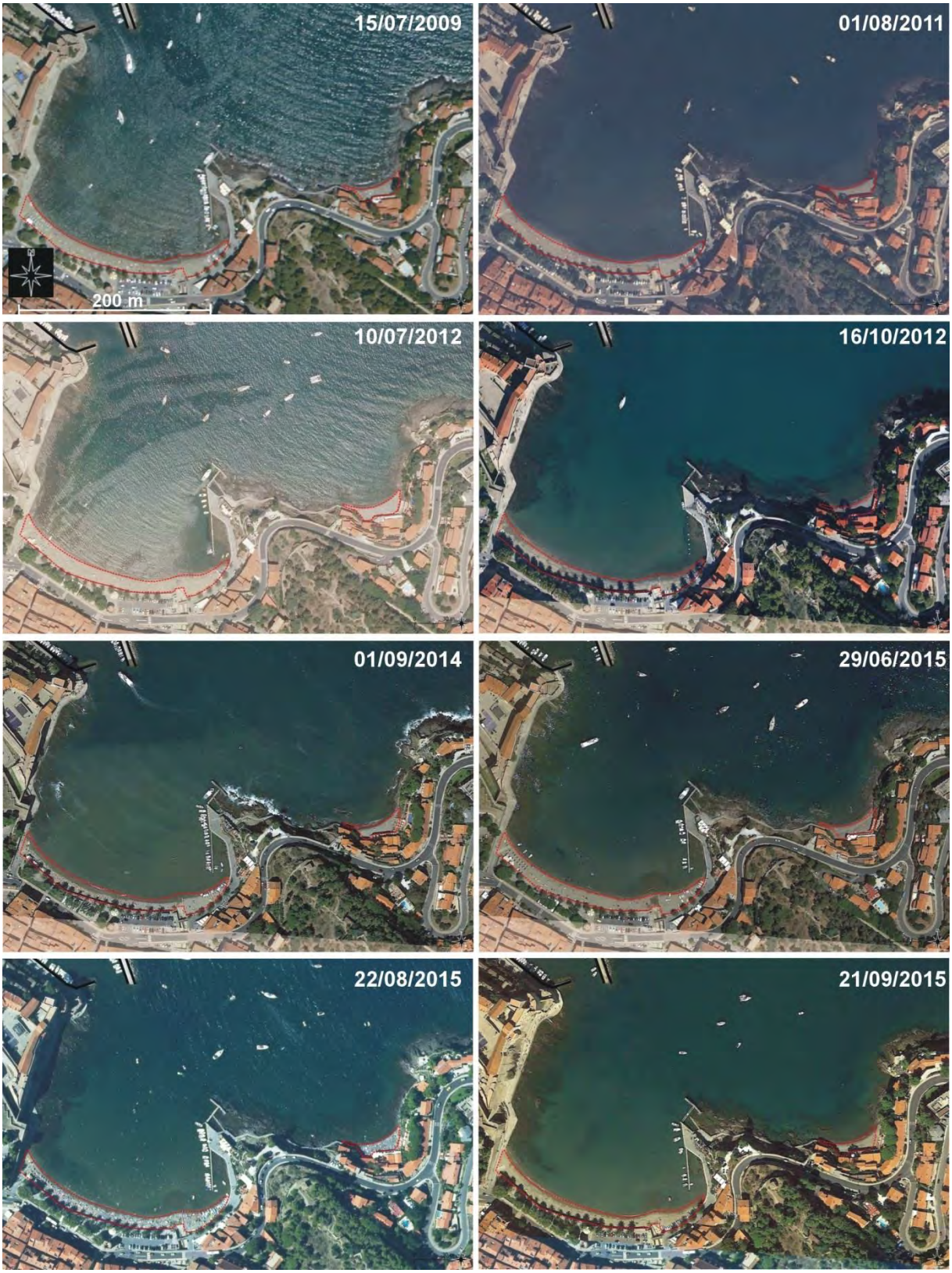
Là encore, les deux plages suivent une chronique d'avancées et reculs du trait de côte assez similaire sur les 10 dernières années (Figure 60 et Figure 61). Il peut être relevé une érosion importante entre les étés 2012 et 2014 sur la plage principale, de même que suite à Gloria. Le torrent qui débouche à l'est de la grande plage contribue à la formation d'un petit delta lobé visible sur la zone sous-marine entre 2015 et 2017, potentiellement créé suite aux fortes crues de novembre 2014 et mars 2015. Les deux "ruptures" érosives durant les étés 2015 et 2017 sont certainement en lien avec de légères modifications de profil et se trouvent en partie dans la marge d'erreur de la méthode.

L'accrétion claire entre 2011 et 2012 sur les deux plages peut être relié à une forte répétition et un cumul important d'épisodes de fortes houles de N-NO (Tramontane) durant l'hiver 2011-2012.

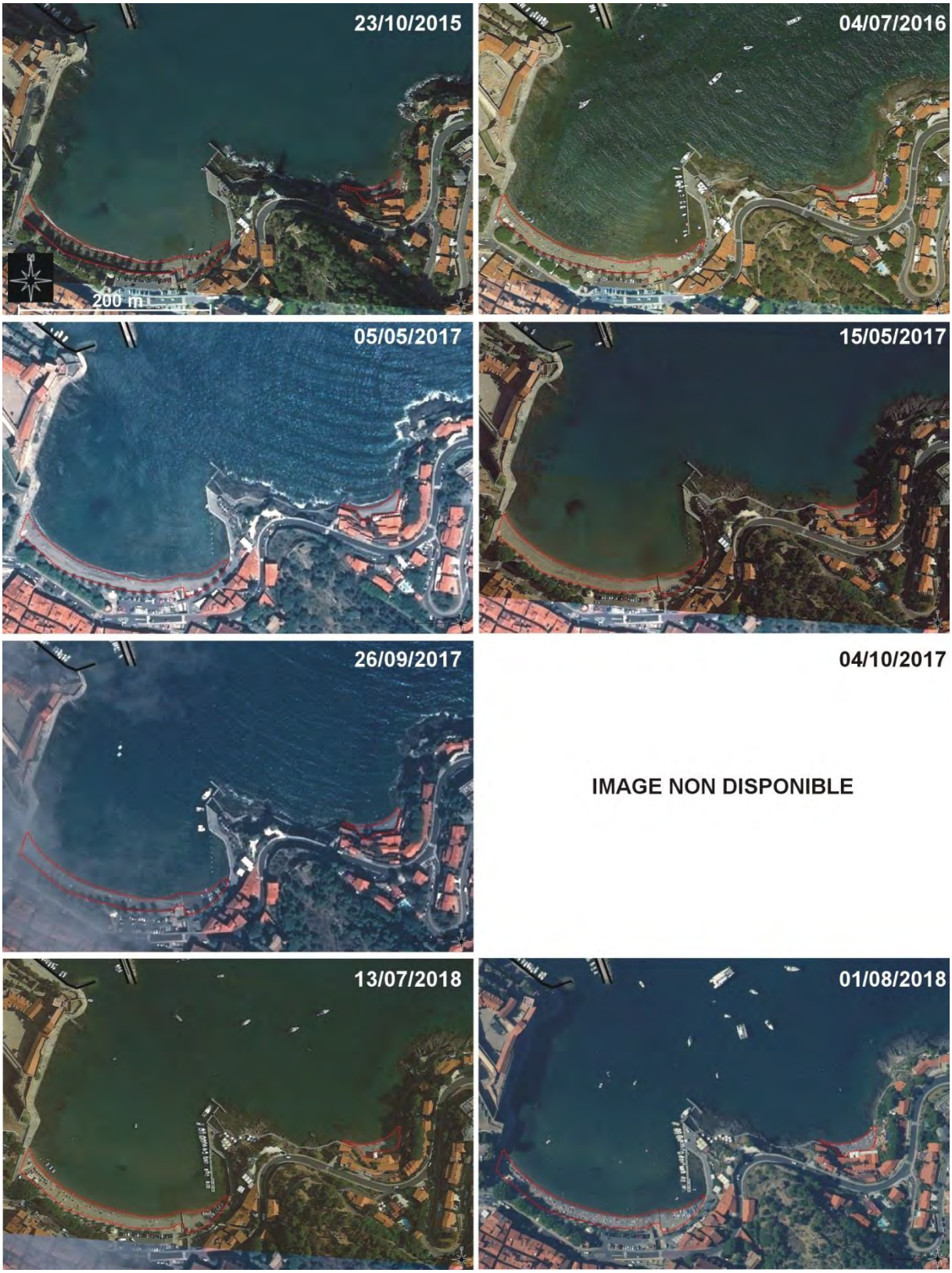


Figure 62 : impact de la tempête de mars 2018 sur le baladoir de Collioure (photo L. Montel, DREAL-Occitanie)

A.


15/07/2009
200 m
01/08/2011
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
22/08/2015
21/09/2015

B.


23/10/2015
200 m
04/07/2016
05/05/2017
15/05/2017
26/09/2017
04/10/2017
IMAGE NON DISPONIBLE
13/07/2018
01/08/2018

C.



Figure 63 (a, b, c) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site de Collioure-Centre et Balletta entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria ; images obliques ULM)

Les 3 plages indépendantes à l'est de Collioure (Batteries, Oli, En-Baux)

D'une manière générale ces plages subissent des variations ténues du trait de côte, et ont répondu lors de la dernière décennie de manière relativement comparable, en particulier lors de la phase de 2014 à 2017 avec un gain de sable entre l'été 2014 et le printemps 2015, puis une chute brusque de la largeur de plage au début de l'été 2015. Ensuite, le trait de côte progresse vers la mer durant les deux saisons 2015-2016 et 2016-2017. Enfin, un épisode d'érosion se fait ressentir durant l'été 2017.

La plage d'en-Baux se différencie avec une érosion assez prononcée durant l'hiver 2018, puis entre l'été 2018 et l'été 2019.

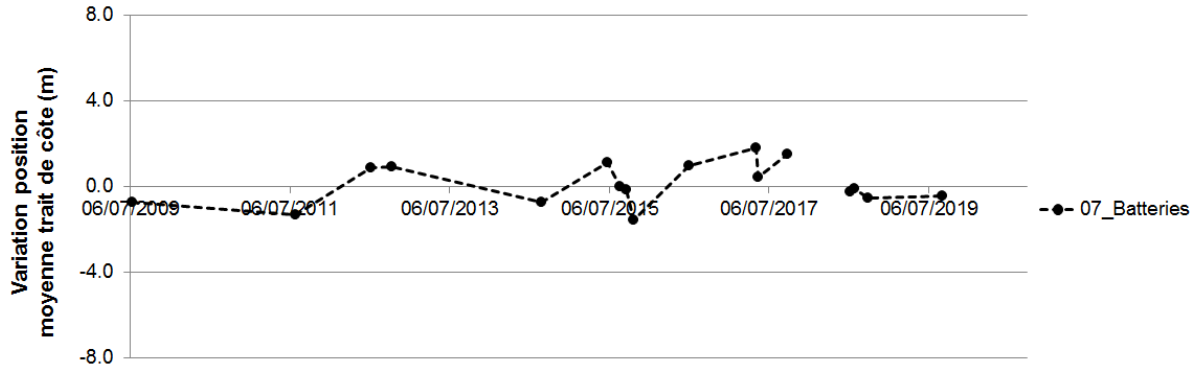


Figure 64 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage des Batteries entre l'été 2009 et l'été 2019 d'après les images aériennes et satellites disponibles

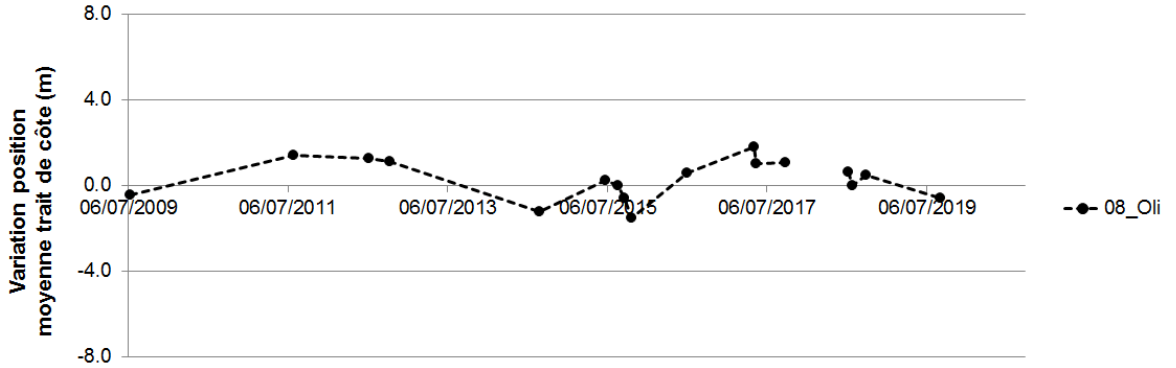


Figure 65 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage de l'Oli entre l'été 2009 et l'été 2019 d'après les images aériennes et satellites disponibles

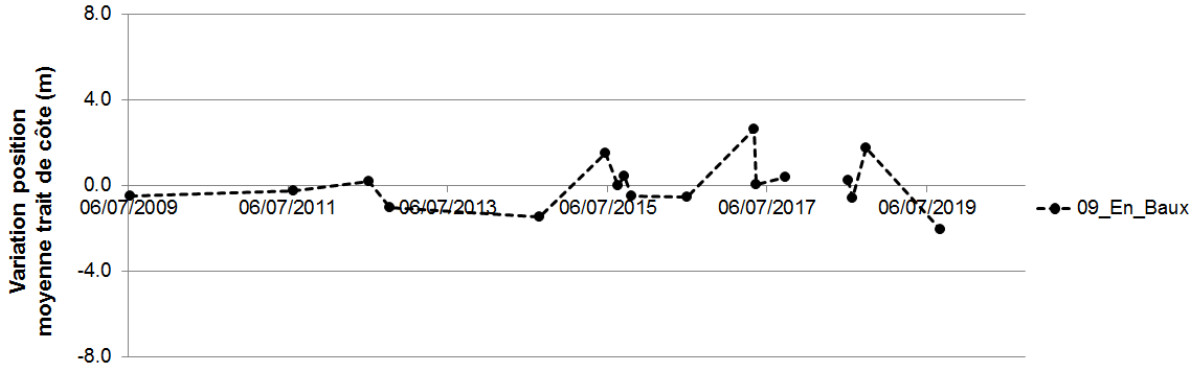


Figure 66 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage d'En-Baux entre l'été 2009 et l'été 2019 d'après les images aériennes et satellites disponibles

Evolution historique et contemporaine de la plage des batteries

La plage des Batteries, située dans l'anse del Raguès, a subi des travaux entre 1972 et 1977, puisque la crique au nord-est apparait avant 1977 sur les ortho-images d'archives de l'IGN comme en grande majorité rocheuse. Il est envisagé que cette plage ait pu subir un rechargement artificiel.

Richard (1993) indique que cette plage s'appuie sur des versants mi-rocheux / mi-terreux, ainsi que des remblais qui ont comblé le court ravin pour installer les immeubles des Batteries. La nature des fonds se compose de gros galets (schistes/quartz) mais aussi de nombreux débris de construction "tombés" sur le haut de plage et repris par la mer. Un muret soutient aujourd'hui partiellement le talus au nord-est du site



Figure 67 : comparaison d'ortho-photographies historiques de l'IGN de 1972 et 1977 montrant un potentiel rechargement de sable sur la plage rocheuse au nord-est des Batteries

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
07_ plage des Batteries	771 m²	90 m	Impossibilité de réaliser une mesure précise	412 m² (-4 m en moyenne de recul du trait de côte par rapport à 2015)

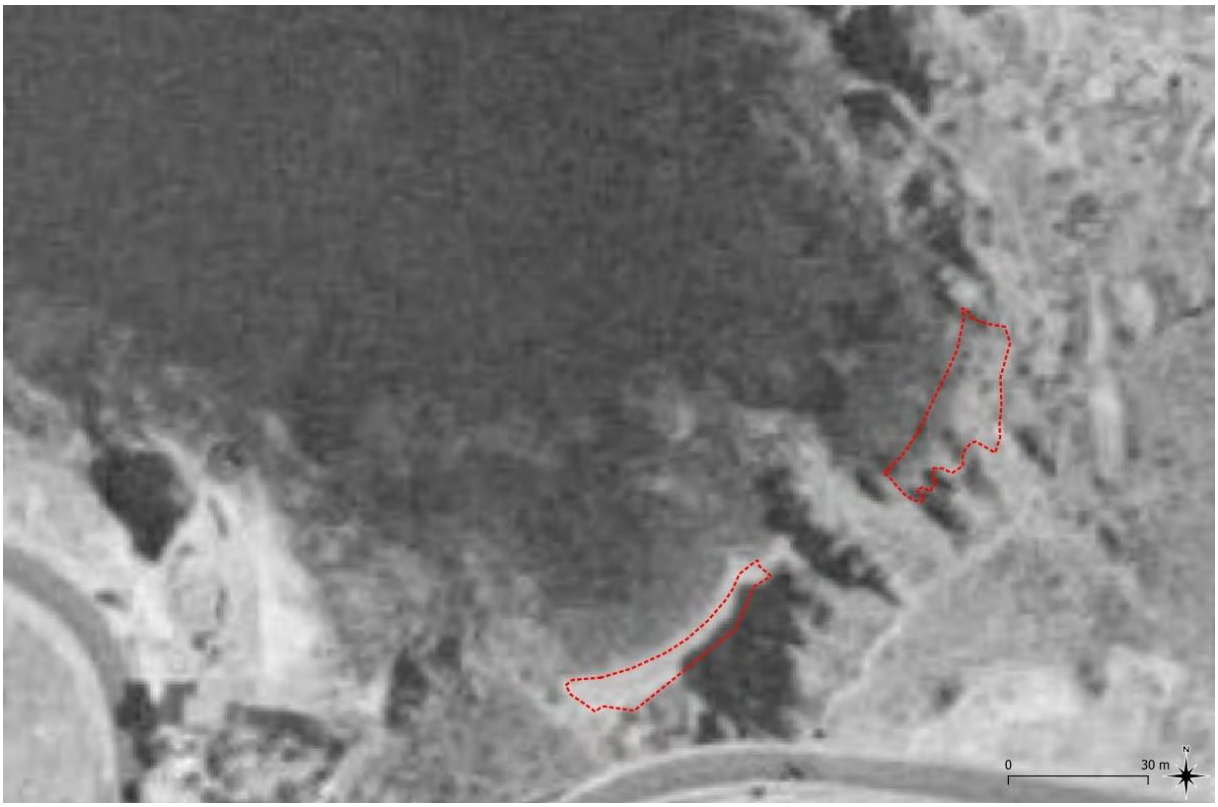


Figure 68 : situation de la plage des Batteries en 1952 par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 présentées par des contours rouges. La plage au nord-est apparait à cette époque comme essentiellement rocheuse.

Sur la période récente (Figure 69) l'été 2012 marque un dépôt assez fort sur la plage au nord-est, puis une érosion de cette plage entre 2012 et 2014. Cette moitié nord-est de la plage semble plus dynamique que l'autre.

A.


15/07/2009
100 m
01/08/2011
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
22/08/2015
21/09/2015

B.


23/10/2015
100 m
04/07/2016
05/05/2017
15/05/2017
26/09/2017
04/10/2017
IMAGE NON DISPONIBLE
13/07/2018
01/08/2018

C.



Figure 69 (a, b, c) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site des plages des Batteries entre l'été 2009 et 2019.

La plage des Batteries semble modérément impactée par la tempête Gloria (Figure 70), même si la moitié nord-est recule significativement.

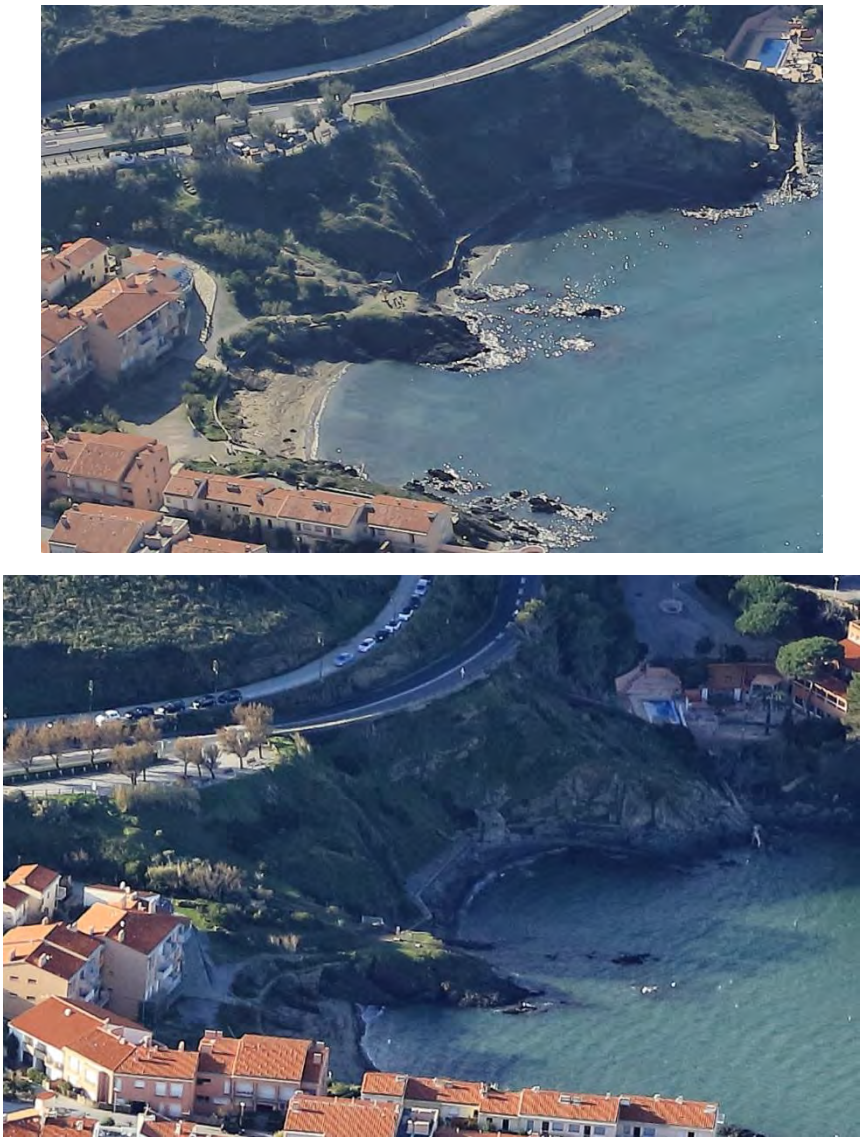


Figure 70 : photographies prises en ULM des plages des Batteries après les tempêtes d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL.

Evolution historique et contemporaine de la plage de l'Oli

La plage de l'Oli (ou de l'Huile) était nettement plus reculée par le passé qu'aujourd'hui. Le trait de côte pourrait là aussi avoir avancé sur la mer naturellement, mais plus certainement suite à l'intervention de l'Homme (rechargements ?) et aux terrassements pour construire la route. Richard (1993) indique que cette plage avait été rechargée en sable en 1990.

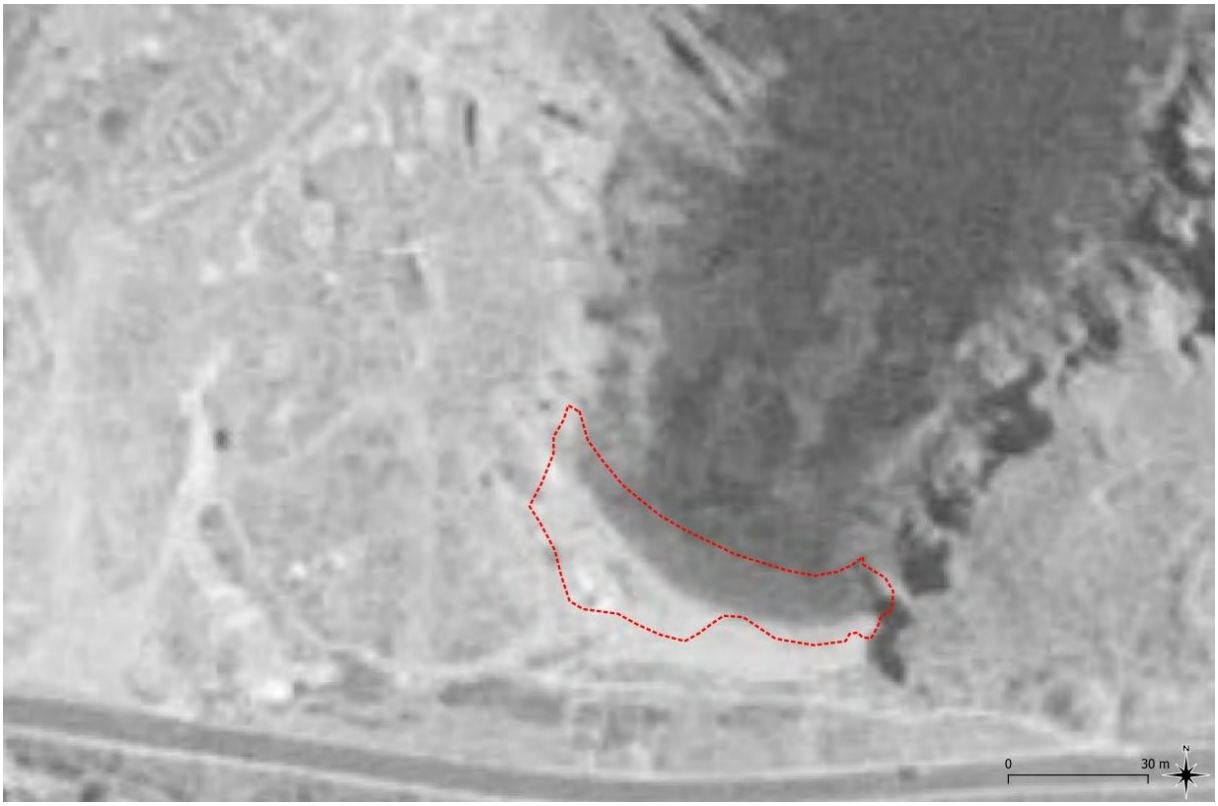


Figure 71 : situation de la plage de l'Oli en 1952 par rapport à la surface de plage de référence mesurée en 2015 présentée par des contours rouges. La plage apparait à cette époque beaucoup plus maigre en sédiments.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
08_ plage de l'Oli	1 577 m²	76 m	Impossibilité de réaliser une mesure précise	412 m² (-10,1 m en moyenne de recul du trait de côte par rapport à 2015)

Sur la période récente en revanche, cette plage se montre assez stable entre les différents levés (Figure 72), malgré de possibles variations de profils et modifications de la zone mouillée de jet-de-rive bien visibles sur les images.

A.


15/07/2009
01/08/2011
100 m
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
22/08/2015
21/09/2015

B.


23/10/2015
100 m
04/07/2016
05/05/2017
15/05/2017
26/09/2017
04/10/2017
IMAGE NON DISPONIBLE
13/07/2018
01/08/2018

C.



Figure 72 (a, b, c) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site des plages de l'Oli entre l'été 2009 et 2019.

Entre 2012 et 2015 et entre 2015 et 2017-2018, la tache sableuse immergée varie sur les images impliquant un découvrement/recouvrement des roches du substratum.

La tempête Gloria semble avoir sensiblement impacté la plage de l'Oli au vu des photos aériennes (Figure 73) :

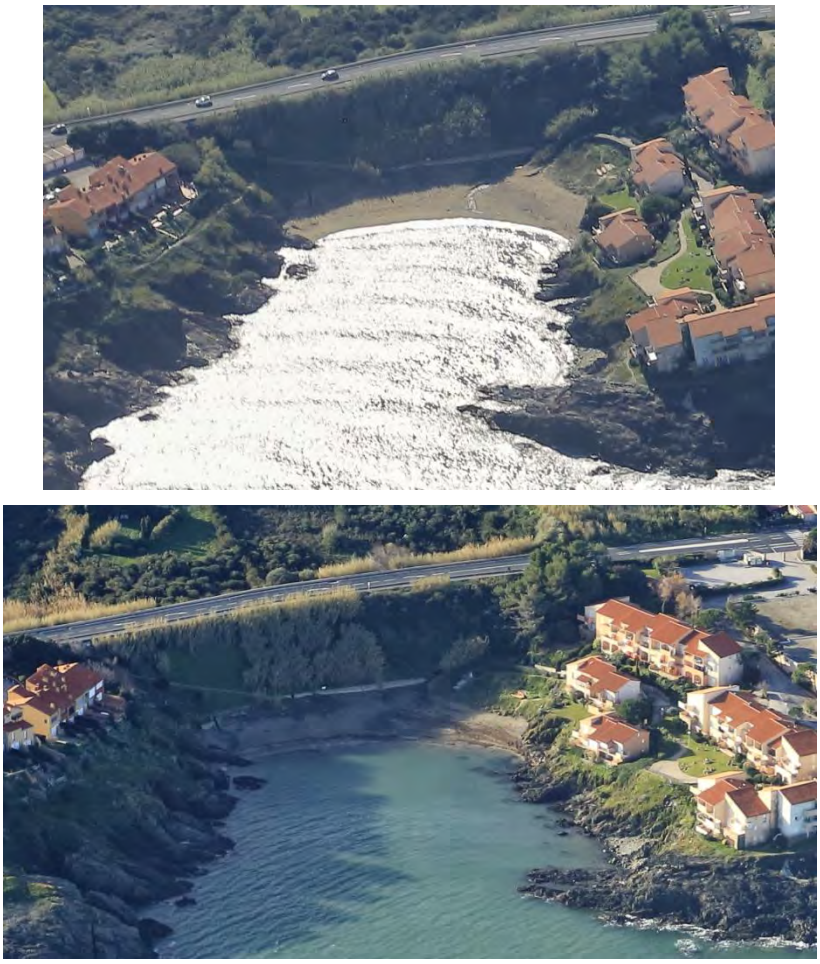


Figure 73 : photographie prise en ULM des plages de l'Oli après la tempête d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL.

Evolution historique et contemporaine de la plage d'En Baux

Cette crique, très indentée dans les escarpements rocheux n'était pas originellement sableuse. Il semble que des travaux aient été effectués pour modifier l'aspect du site et créer une plage en rajoutant du sable entre 1962 et 1970 (Figure 74). Il semble aussi que le talus qui mène à la plage a été remanié ou s'est effondré à cette époque (glissement de terrain ?)

La plage est donc nettement plus avancée aujourd'hui, d'environ 10 à 30 m, qu'avant les années 60.



Figure 74 : image historique de l'IGN montrant très vraisemblablement un rechargement par l'Homme de la plage dans les années 1960

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
09_ plage d'En-Baux	1 160 m²	90 m	Impossibilité de réaliser une mesure précise	0 m² !!! Plage purement rocheuse avant 1977 (trait de côte -10 à -30 m plus en retrait)



Figure 75 : situation de la plage d'en-Baux en 1952 par rapport à la surface de la plage de référence mesurée en 2015, représentée par un contour rouge. La crique apparait à cette époque purement rocheuse.

Sur la période récente, la plage subit des variations légères mais un léger creusement dernièrement en 2018-2019 (Figure 76).

A.


15/07/2009
100 m
01/08/2011
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
22/08/2015
21/09/2015

B.


23/10/2015
100 m
04/07/2016
05/05/2017
15/05/2017
26/09/2017
04/10/2017
IMAGE NON DISPONIBLE
13/07/2018
01/08/2018

C.



Figure 76 (a,b,c) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site des plages d'En-Baux entre l'été 2009 et 2019

La plage d'en-Baux se montre fortement érodée quelques jours après la tempête Gloria (Figure 77).

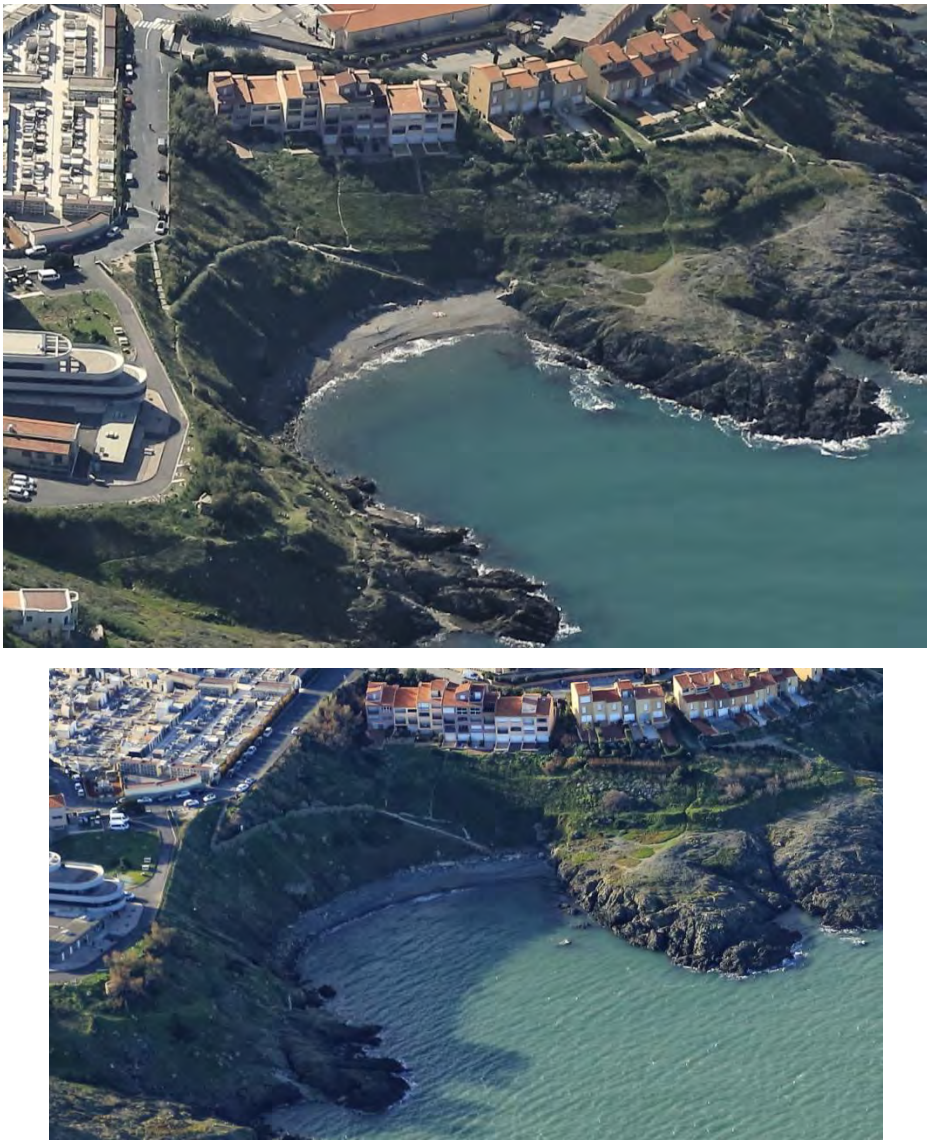


Figure 77 : photographie prise en ULM des plages d'En-Baux après les tempêtes d'octobre 2019 et de janvier 2020 (Gloria) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL.

Les plages de la calanque/Ria de Port-Vendres

Evolution historique et contemporaine de la plage contre la digue marine de Port-Vendres

La plage à la sortie de la baie de Port-Vendres est nettement protégée des houles marines, mais exposée aux houles de Tramontane. Elle se divise en deux parties, la plage de Mailly et celle de la jetée (Môle). Cette plage est naturelle et est présente sur toutes les images d'archives. Pourtant, Richard (1993) décrit que cette plage, comme ses voisines plus loin dans la ria, ont été rechargées massivement lors du re-creusement (curage) du port d'Argelès-sur-Mer à la fin des années 1980, puis de manière assez régulière pendant sa période d'étude au début des années 1990 car le sable amené descend lentement vers l'avant-côte. Ces plages seraient aussi à cette époque régulièrement nettoyées de leurs déchets et étaient en 1993 interdites à la baignade en raison de la mauvaise qualité de l'eau. Aujourd'hui, elles semblent toujours interdites mais en raison du passage des bateaux de commerce et d'une navigation très dense l'été.

A l'échelle pluri-décennale et historique cette plage serait stable ou aurait même avancé de quelques mètres, surtout dans sa partie nord, depuis 1952.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
10_ plage de Port-Vendres (2 plages contre la digue)	1 723 m²	144 m	Impossibilité de réaliser une mesure précise	1 516 m² (-1,4 m en moyenne de recul du trait de côte par rapport à 2015 ; surtout au nord)



Figure 78 : situation de la plage de la digue de Port-Vendres en 1952 par rapport à la surface de la plage de référence mesurée en 2015, représentée par un contour rouge.

Au cours de la décennie passée, les mouvements du trait de côte sur cette plage ont été faibles dans l'ensemble, excepté à l'extrémité nord de la plage au contact de la digue et du platier rocheux qui la supporte, avec certaines rotations légères du trait de côte.

On note néanmoins certains évènements d'intérêt (Figure 79), dont une accrétion durant la saison 2011-2012, riche en cumul de forts coups de Tramontane ; puis une érosion après l'hiver 2017-2018, où il est probable que l'évènement de début mars 2018 ait eu une influence négative.

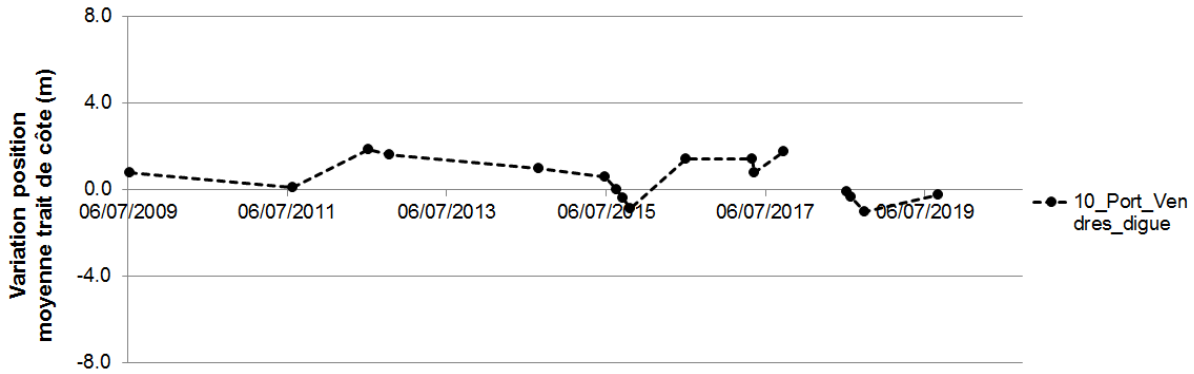


Figure 79 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage de la digue de Port-Vendres entre l'été 2009 et l'été 2019 d'après les images aériennes et satellites disponibles

A.


15/07/2009
100 m
01/08/2011
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
22/08/2015
21/09/2015

B.


23/10/2015
100 m
04/07/2016
05/05/2017
15/05/2017
26/09/2017
04/10/2017
IMAGE NON DISPONIBLE
13/07/2018
01/08/2018

C.



Figure 80 (a, b, c) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site des plages de la digue de Port-Vendres entre l'été 2009 et 2019

Au vu des images aériennes obliques, la tempête Gloria n'a pas eu d'effet très érosif sur ce site.



Figure 81 : photographie prise en ULM des plages de la digue de Port-Vendres après les tempêtes d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL.

La cellule sédimentaire des anses de Paulilles

Sur ces 3 plages, la revue bibliographique réalisée permet de penser que des échanges sédimentaires significatifs se font entre les 3 plages de Bernardi, Paulilles et el Forat. Des pertes et des gains de volumes sédimentaires se font sentir de manière inégale sur chaque plage : il arrive qu'une s'érode tandis que l'autre présente de l'accrétion, ce qui laisse penser que le sable pourrait contourner les petites pointes et dalles rocheuses qui les séparent.

Bernardi est certainement la plage, du moins l'avant-côte, la plus exposée aux houles marines, exposition qui décroit en allant vers le sud-est, en raison des dalles et pointes rocheuses des plages. Les houles de Tramontane ne touchent pas significativement les plages de Paulilles en raison de la présence du cap Béar. Une dalle profonde située vers -7 m protège des houles les plus extrêmes (Hs > 4 m au large) les anses de Bernardi et Paulilles (Figure 82).

On relève de nombreux fonds sableux entre les roches, et une barre d'avant-côte à Bernardi.

Richard (1993) décrit l'impact des torrents sur la dynamique de la plage à Bernardi et Paulilles, et les nombreux apports de sable et de galets supposés avoir historiquement "bien nourri" ces plages, qui se trouvent d'ailleurs à l'extrémité de terrasses alluviales quaternaires (pour Bernardi et Paulilles). Sur ces plages s'accumulent des banquettes de Posidonies après tempête.

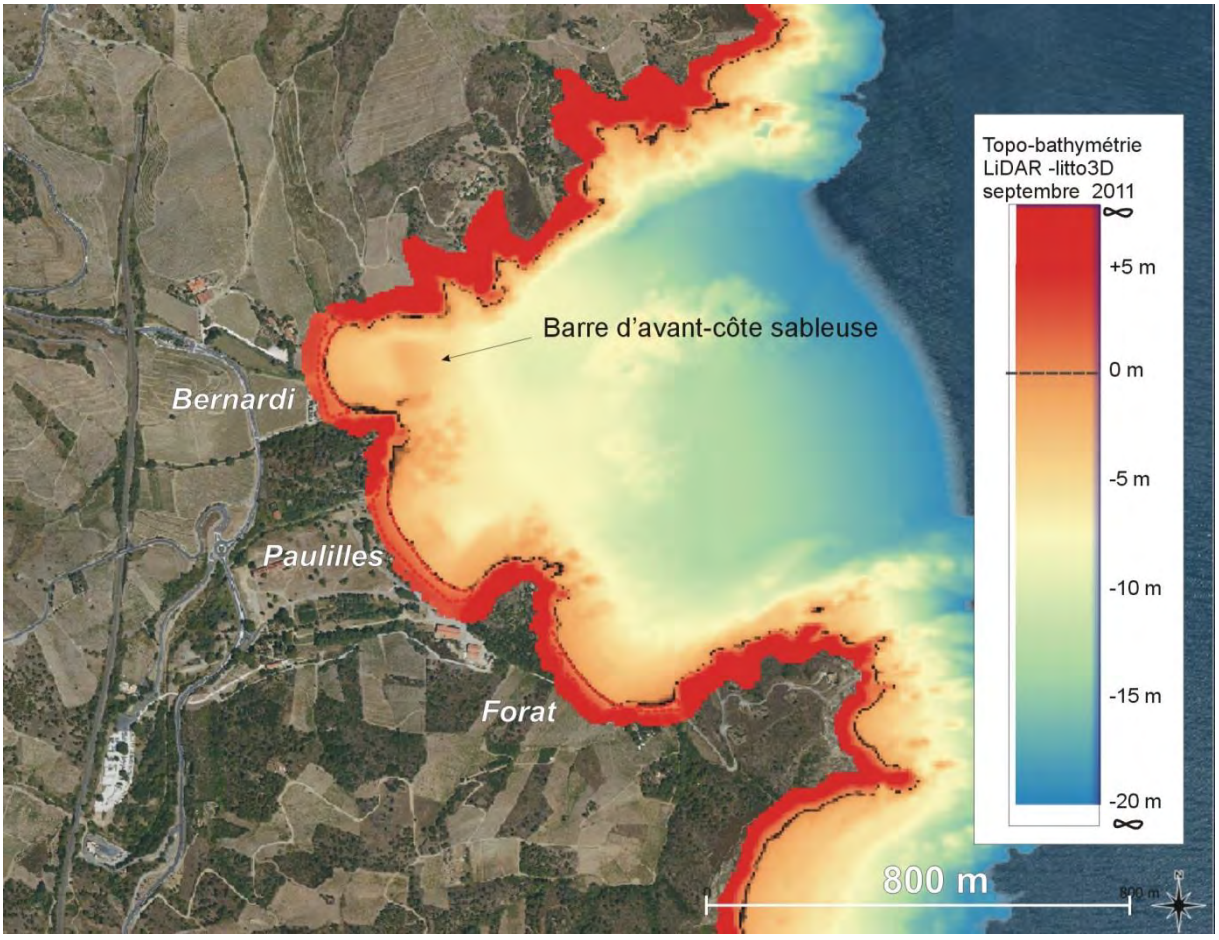


Figure 82 : bathymétrie des plages de Paulilles d'après le levé lidar de l'été 2011, montrant une barre sableuse devant Bernardi, et des fonds sableux intercalés entre les dalles de roches devant les 3 anses.

D'après nos analyses du trait de côte depuis 2009 (Figure 83, Figure 84, Figure 85), les déplacements de la ligne de rivage sont restés assez modérés, même si des phases d'érosions fortes sont à noter, par exemple après la tempête Gloria à Bernardi (certainement temporaire à l'instar de ce qui a déjà été observé en 2015-2017).

Bien que l'on relève une dominance de murets réflectifs de haut de plage sur ces 3 anses, les nombreuses tempêtes où la houle a dépassé 4 m depuis 2009 n'ont pas provoqué de recul massif à cicatrisation lente du trait de côte. Ces plages de sable grossier/gravier apparaissent résilientes aux fortes houles qui les affectent.

Les sens et intensités des déplacements du trait de côte sont parfois similaires sur les 3 plages comme observé entre juillet et octobre 2012, ou entre juin et fin octobre 2015, mais des différences importantes apparaissent entre les 3 unités, comme depuis 2017.

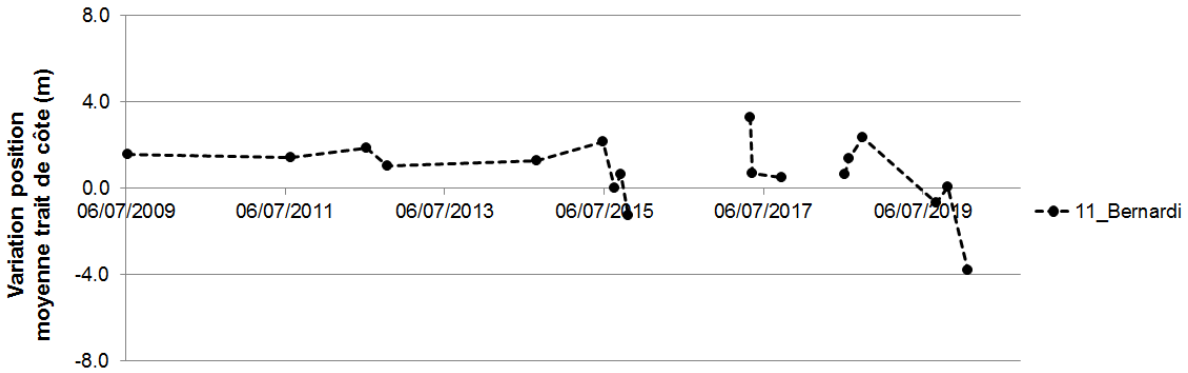


Figure 83 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage de Bernardi entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria) d'après les images aériennes et satellites disponibles

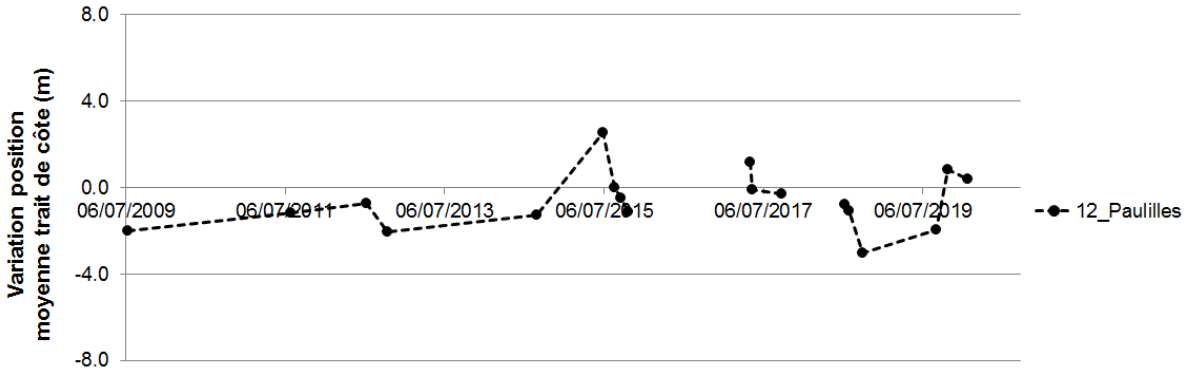


Figure 84 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage de Paulilles entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria) d'après les images aériennes et satellites disponibles

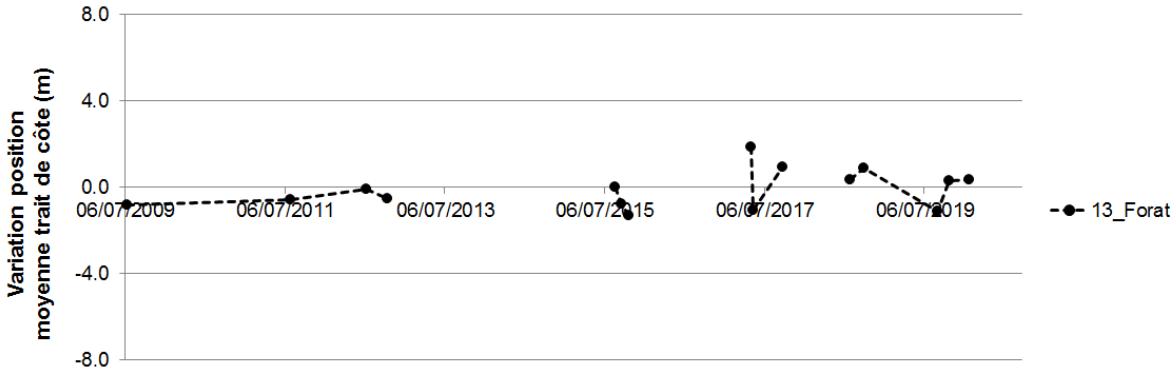


Figure 85 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage de Forat entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria) d'après les images aériennes et satellites disponibles

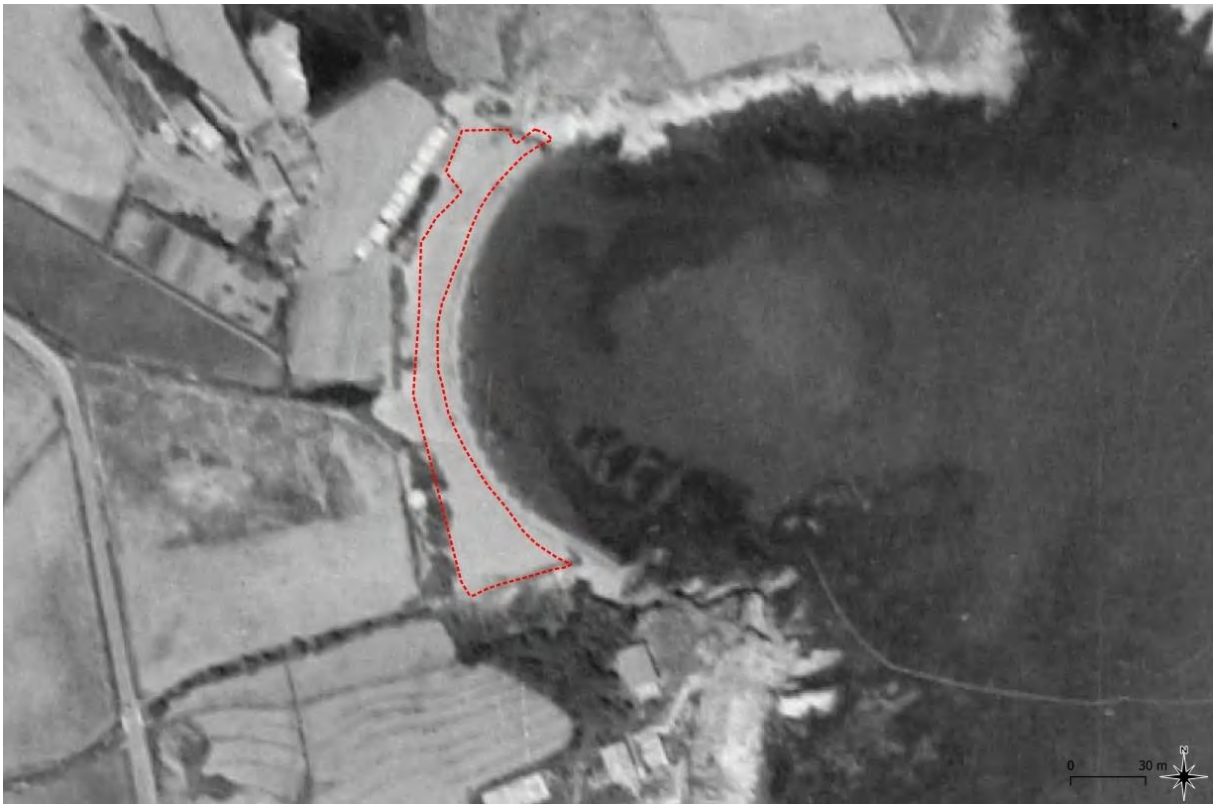
Evolution historique et contemporaine de la plage de Bernardi

De manière identique à ce qui est observé sur la période récente (graphiques précédents), Bernardi semble depuis toujours assez dynamique et l'on observe une situation de plage plus large en 1942, puis une plage comparable à aujourd'hui en 1952 (Figure 86).

Comme il est décrit par le CEFREM (université de Perpignan) dans la bibliographie, on remarque que le trait de côte à Bernardi répond avec des rotations importantes. De la même manière, on suppose que la dynamique de la plage est influencée, comme sur les grandes plages sableuses, par la dynamique de sa barre sédimentaire d'avant-côte (banc de sable immergé) qui apparaît de taille imposante.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
11_Bernardi	3 359 m²	207 m	4 802 m² (+7 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)	3 767 m² (+2 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)

A.



B.

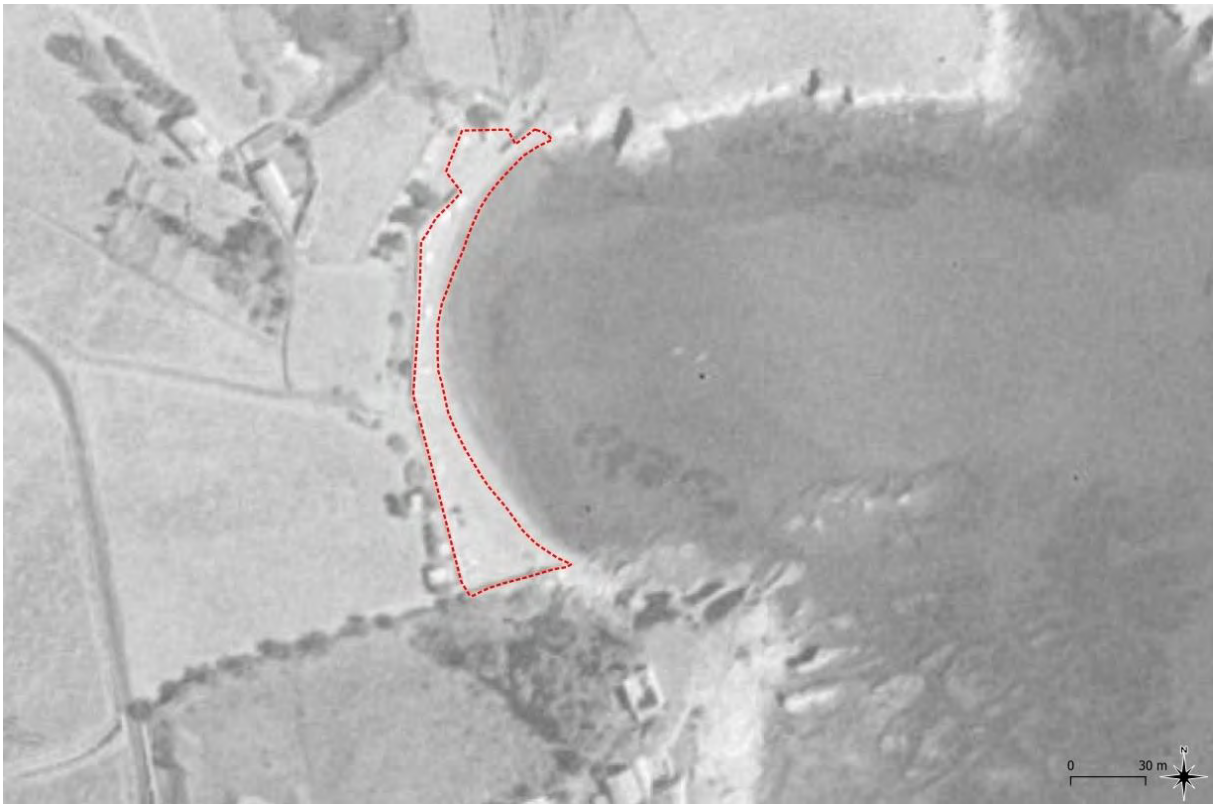


Figure 86 : situation de la plage de Bernardi en 1942 (a) et en 1952 (b) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 présentées par des contours rouges.

Au sujet de la dynamique de la barre d'avant-côte, on observe que celle-ci varie en distance depuis la côte (Figure 87). Elle se déplace sur un lit d'apparence rocailleuse visible sur certaines images, qu'elle recouvre plus ou moins selon les saisons. Une modification importante de la barre d'avant-côte apparait entre 2012 et 2014, certainement en réponse à la forte tempête du 6 mars 2013. Cette forte tempête avec de grandes hauteurs de vagues est connue ailleurs comme le moteur de bouleversement de la configuration sous-marine des barres ainsi que leur distance à la plage (suivant une certaine cyclicité sur une échelle décennale ; cf. Aleman et al., 2013).

La plage subit sur la période récente des phases d'érosion ou d'accrétion généralisée de tout son trait de côte, mais il est fréquent d'observer une rotation horaire de la plage, comme entre 2012 et 2014 ou en 2018 et 2019 ; ou à l'inverse une rotation anti-horaire, comme en 2014-2015.

A.


15/07/2009
01/08/2011
200 m
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
22/08/2015
21/09/2015

B.


23/10/2015
200 m
04/07/2016
05/05/2017
15/05/2017
26/09/2017
04/10/2017
IMAGE NON DISPONIBLE
13/07/2018
01/08/2018

C.



Figure 87 (a,b,c) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site de Bernardi entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria)

La tempête d'octobre 2019, accompagnée d'une forte crue, a incisé la plage de deux chenaux à l'embouchure des torrents : celui sortant au milieu de la plage et celui de l'extrémité nord. Un petit delta sous-marin est même visible au nord le 26 octobre 2019. Le mouvement du trait de côte reste toutefois limité lors de cet évènement (légère accrétion).

La tempête Gloria a été nettement plus consommatrice du stock de la plage avec un recul important du trait de côte sur ses 2/3 nord et un désensablement de tout le haut de plage, faisant découvrir davantage le muret. Les embouchures changent aussi significativement.



Figure 88 : photographies prises en ULM des plages de Bernardi après la tempête d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL

Evolution historique et contemporaine de la plage de Paulilles

Paulilles est une plage bien exposée à la houle mais protégée partiellement du déferlement direct par ses deux grandes dalles de roches présentent dans les fonds proches de part et d'autre de l'anse. De surcroît, un banc rocheux jouxte également la plage en son milieu, avec un effet de brise-lame : ce haut fond provoque un tombolo d'accrétion et un pointement du trait de côte concave généralisé de la baie vers la mer, juste derrière le récif.

La plage de Paulilles semble dynamique à l'échelle interannuelle, mais "stable" sur le long-terme : on observe historiquement une légère avancée du trait de côte de 3-5 m depuis les années 40-50.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
12_Paulilles	7 147 m²	294 m	5 831 m² (-4,5 m en moyenne de retrait de côte par rapport à 2015	6 101 m² (-3,6 m en moyenne de retrait du trait de côte par rapport à 2015)

A.



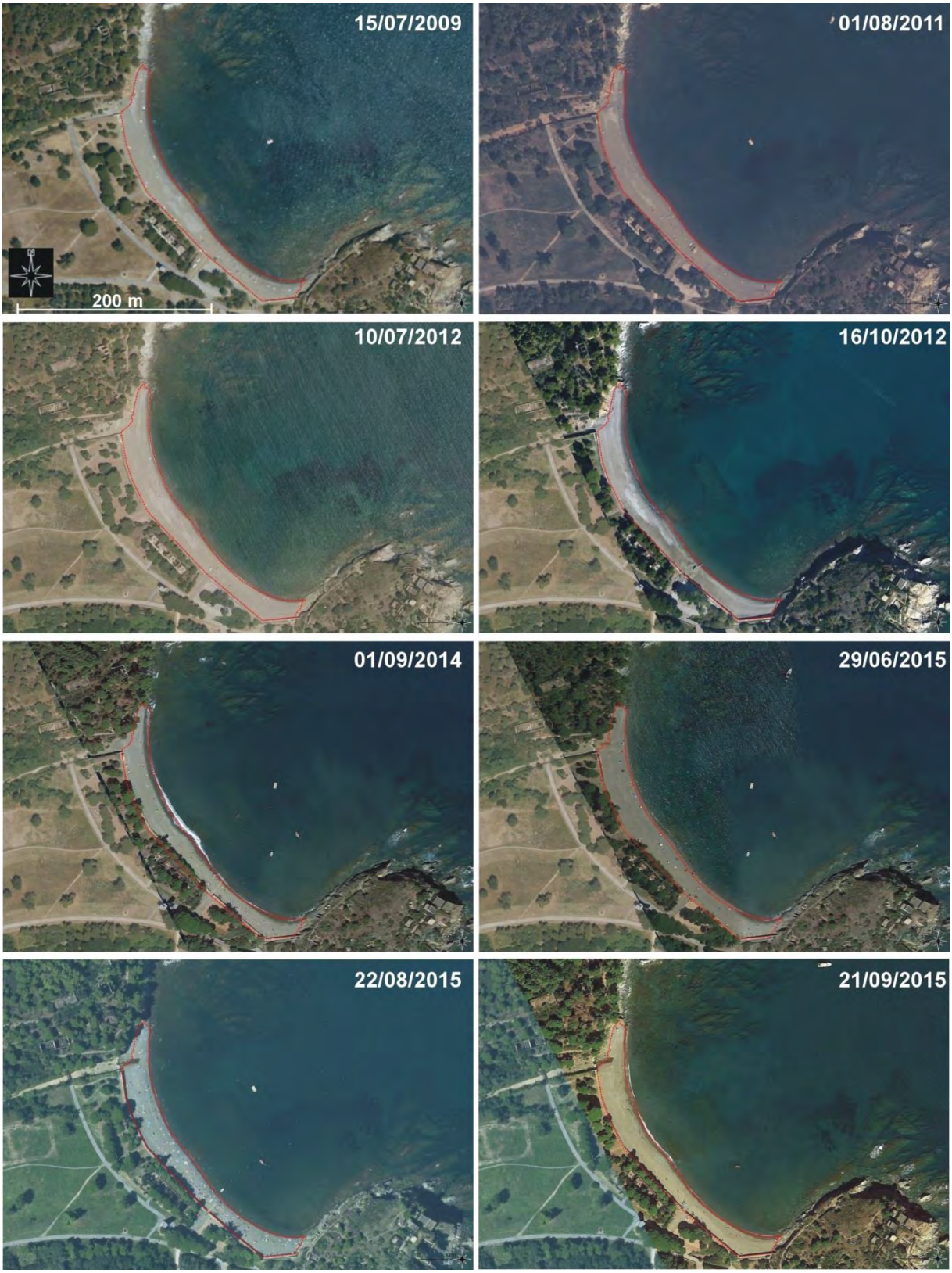
B.



Figure 89 : situation de la plage de Paulilles en 1942 (a) et en 1952 (eb) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 présentées par des contours rouges.

La plage semble sensible au changement de régime de houles et aux premiers coups de mer de l'hiver. Hormis sur sa petite embouchure à son extrémité nord, la tempête Gloria n'a pas généré d'érosion significative. Cette plage semble donc pouvoir soutenir de très fortes houles.

A.


15/07/2009
01/08/2011
200 m
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
22/08/2015
21/09/2015

B.


04/07/2016
IMAGE NON DISPONIBLE
04/10/2017
IMAGE NON DISPONIBLE

C.

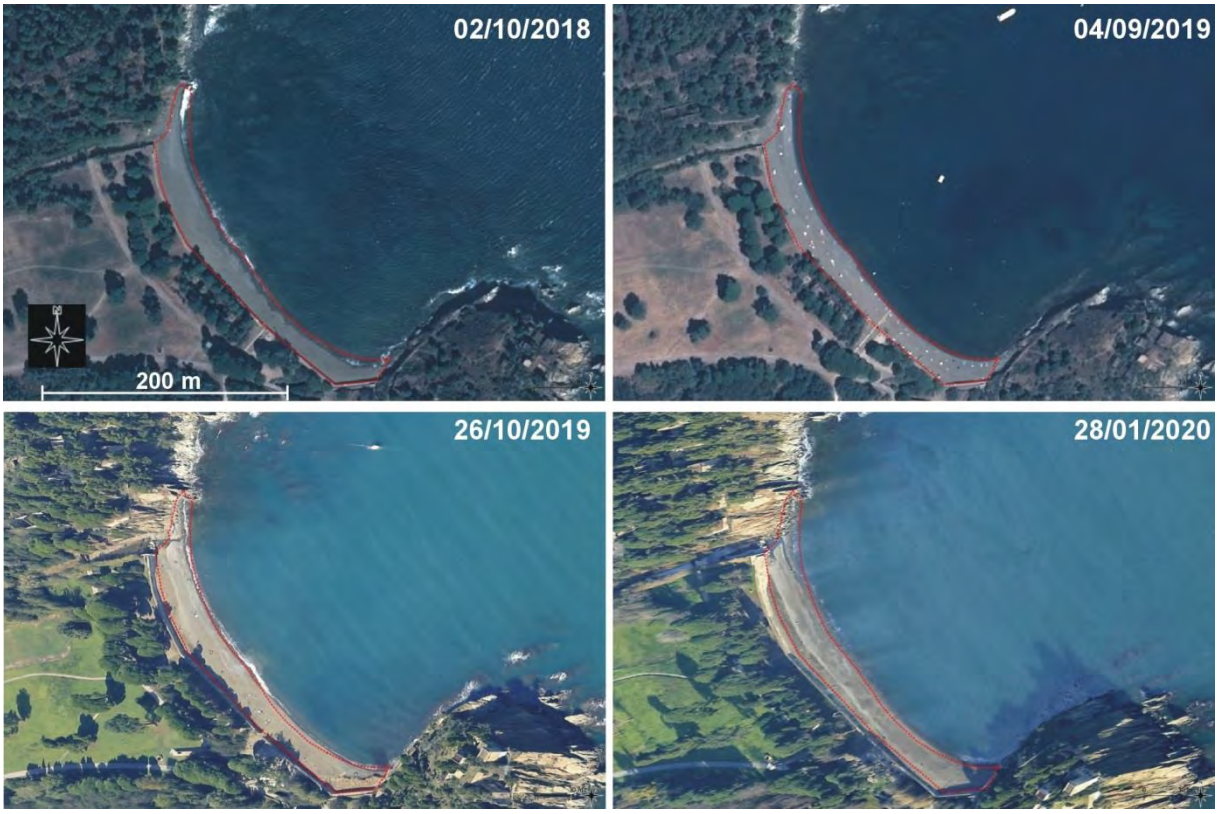


Figure 90 (a, b, c) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site de Paulilles entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria)

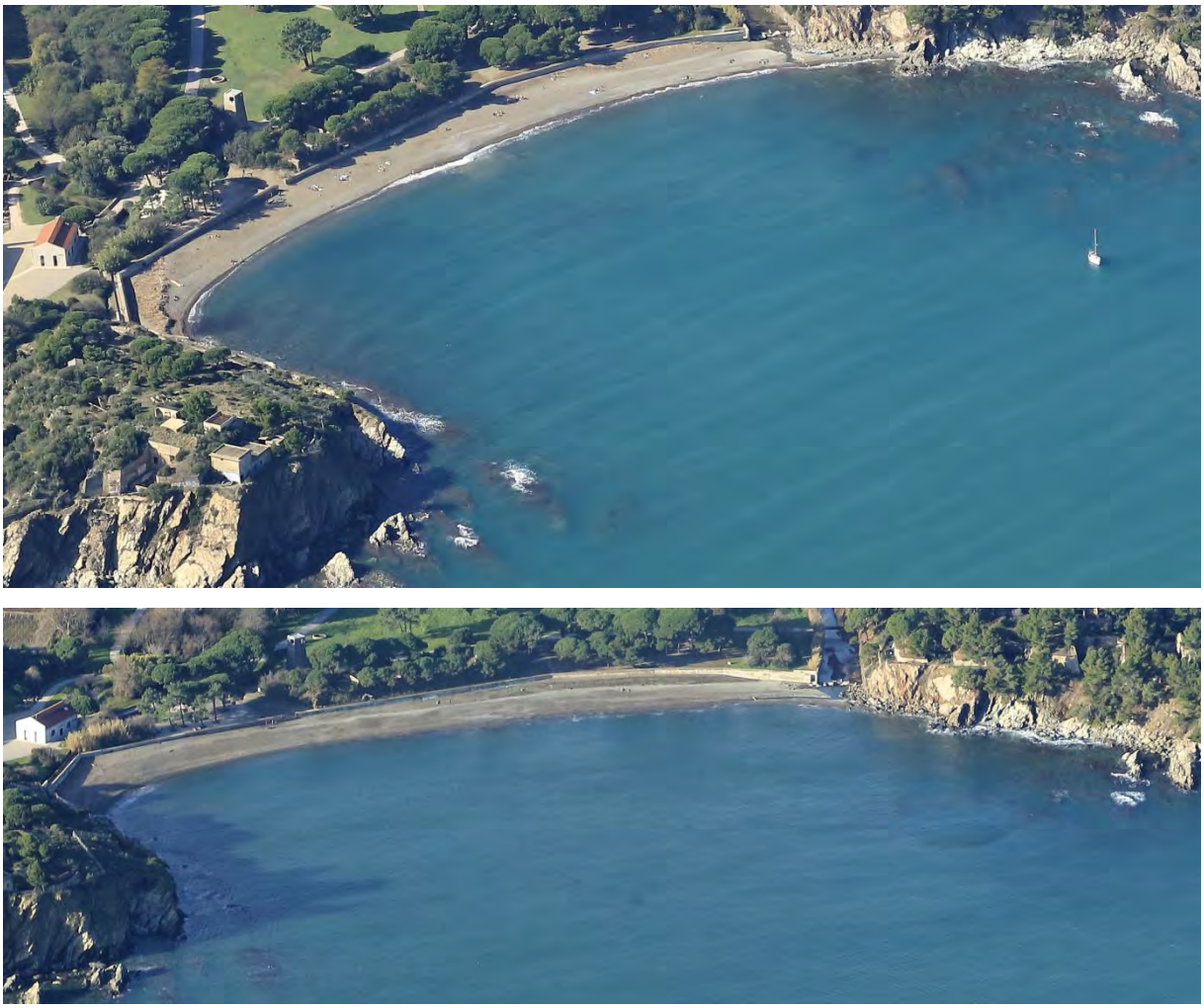


Figure 91 : photographies prises en ULM des plages de Paulilles après les tempêtes d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL

Evolution historique et contemporaine de la plage d'el Forat

La plage d'el Forat est exposée au nord-est, avec une anse principale et une "annexe" à l'est, séparées par un petit éperon rocheux.

Cette plage semble stable sur le long terme, et les changements depuis 2009 sont peu importants, les variations du trait de côte demeurant assez minces (même si le pied de plage, avec son talus de collision sableux visible sous l'eau, bouge manifestement)

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
13_Forat	4 100 m²	278 m	4 133 m² (+0,1 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)	4 805 m² (+2,5 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)

A.



B.

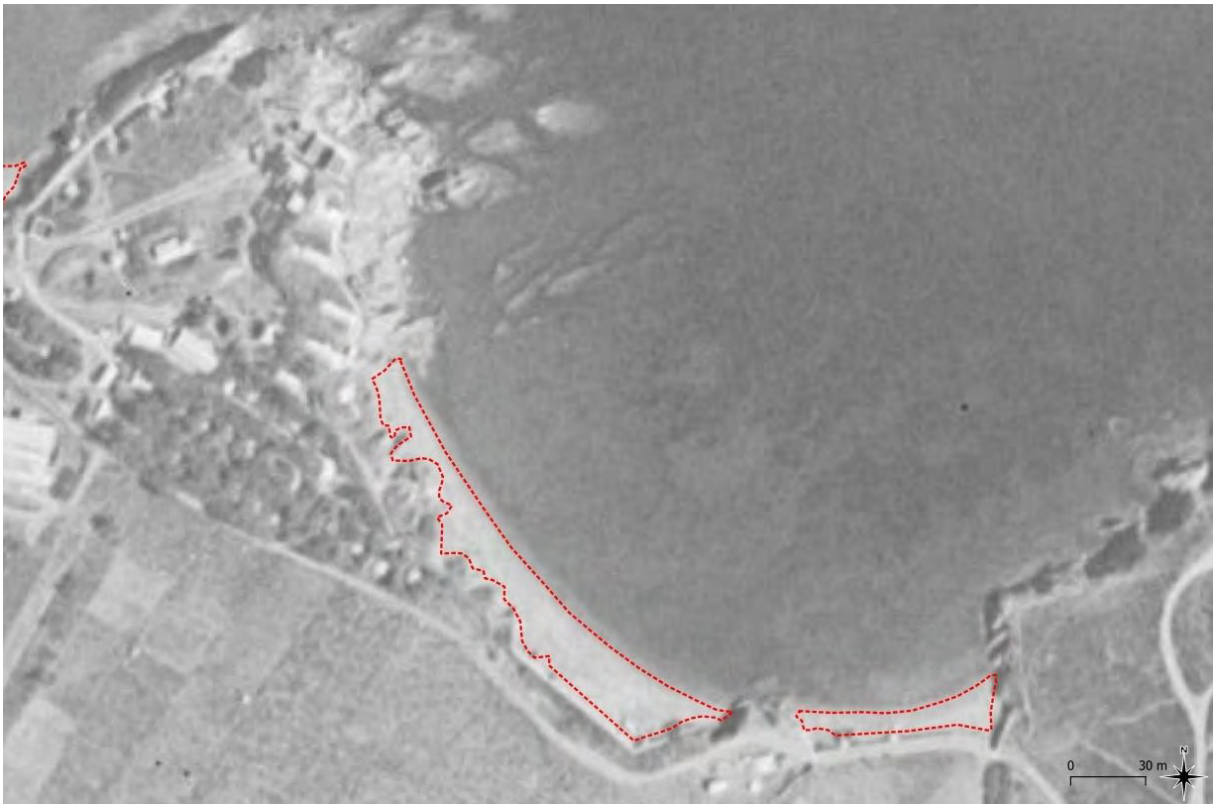


Figure 92 (a, b) : situation de la plage d'el Forat en 1942 (a) et en 1952 (b) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 présentées par des contours rouges.

A.


15/07/2009
01/08/2011
200 m
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
IMAGE NON DISPONIBLE
IMAGE NON DISPONIBLE


22/08/2015
21/09/2015

B.



04/07/2016

IMAGE NON DISPONIBLE







04/10/2017

IMAGE NON DISPONIBLE

13/07/2018

IMAGE NON DISPONIBLE



C.



Figure 93 : Evolution chronologique des ortho-images sur le site d'el Forat entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria)

L'impact de la tempête Gloria a été assez faible sur el Forat en première analyse. Aucun torrent n'affecte la dynamique sédimentaire de cette plage. En revanche les photos obliques prises avant et après l'évènement prouvent que les rochers se sont clairement découverts sur la partie est du haut de plage (voir le désensablement de la falaise côtière à l'ouest en Figure 94).



Figure 94 : photographies prises en ULM des plages d'el Forat après les tempêtes d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL

La cellule sédimentaire de la baie de Banyuls

Les trois plages principales de Banyuls sont exposées aux houles marines venant du secteur E-SE. Ces plages peuvent être regroupées dans une même cellule sédimentaire puisque les fonds sableux entre -4 et -10 m relient ces 3 anses séparées par des petits caps rocheux. Toutefois, le Cap d'Ona est bien plus imposant que celui des Elmes. De fait, les échanges concernent essentiellement les deux plages du Sanatorium et des Elmes. Il est supposé que la fraction la plus grossière qui constitue le stock sédimentaire de la partie émergé est isolée sur chaque compartiment de plage, mais que les deux plage du Sanatorium et des Elmes échangent des sédiments sur la partie immergée, notamment au niveau d'une barre d'avant-côte visible au droit des deux anses (voir bathymétrie en Figure 98).

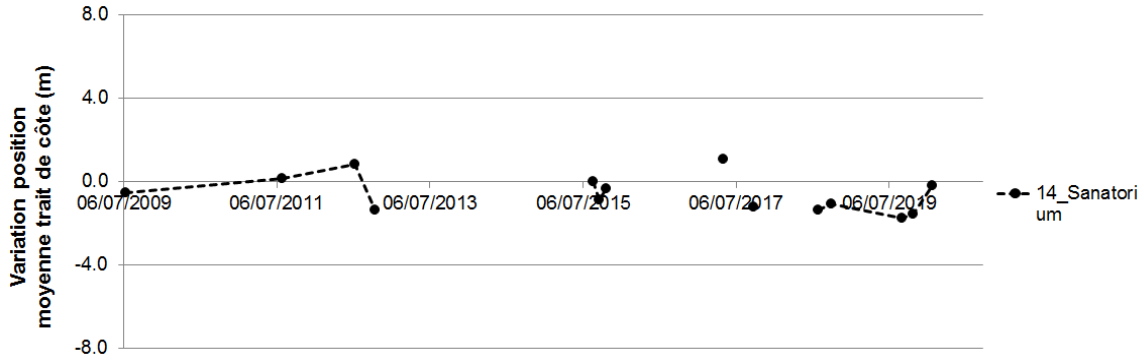


Figure 95 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage du Sanatorium à Banyuls entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria) d'après les images aériennes et satellites disponibles

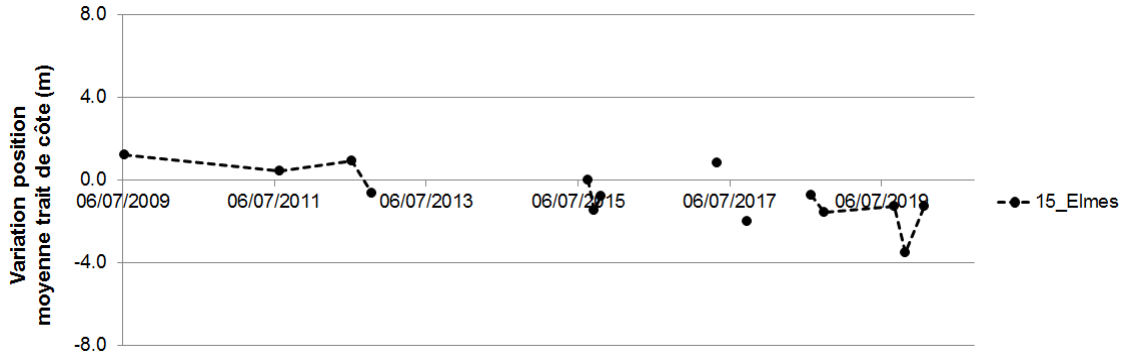


Figure 96 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage des Elmes à Banyuls entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria) d'après les images aériennes et satellites disponibles

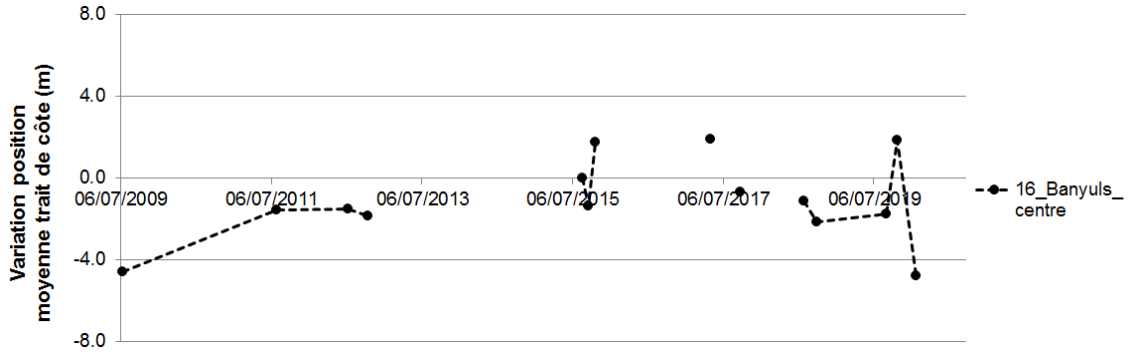


Figure 97 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage centrale (anse du Fontaulé) à Banyuls entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria) d'après les images aériennes et satellites disponibles

L'évolution du trait de côte date à date a été comparable depuis 2009 sur ces 3 plages. Seule la tempête Gloria, ainsi que le coup de mer d'octobre 2019, ont agi de manière différente, avec des changements apparemment plus importants sur la plage du centre-ville.

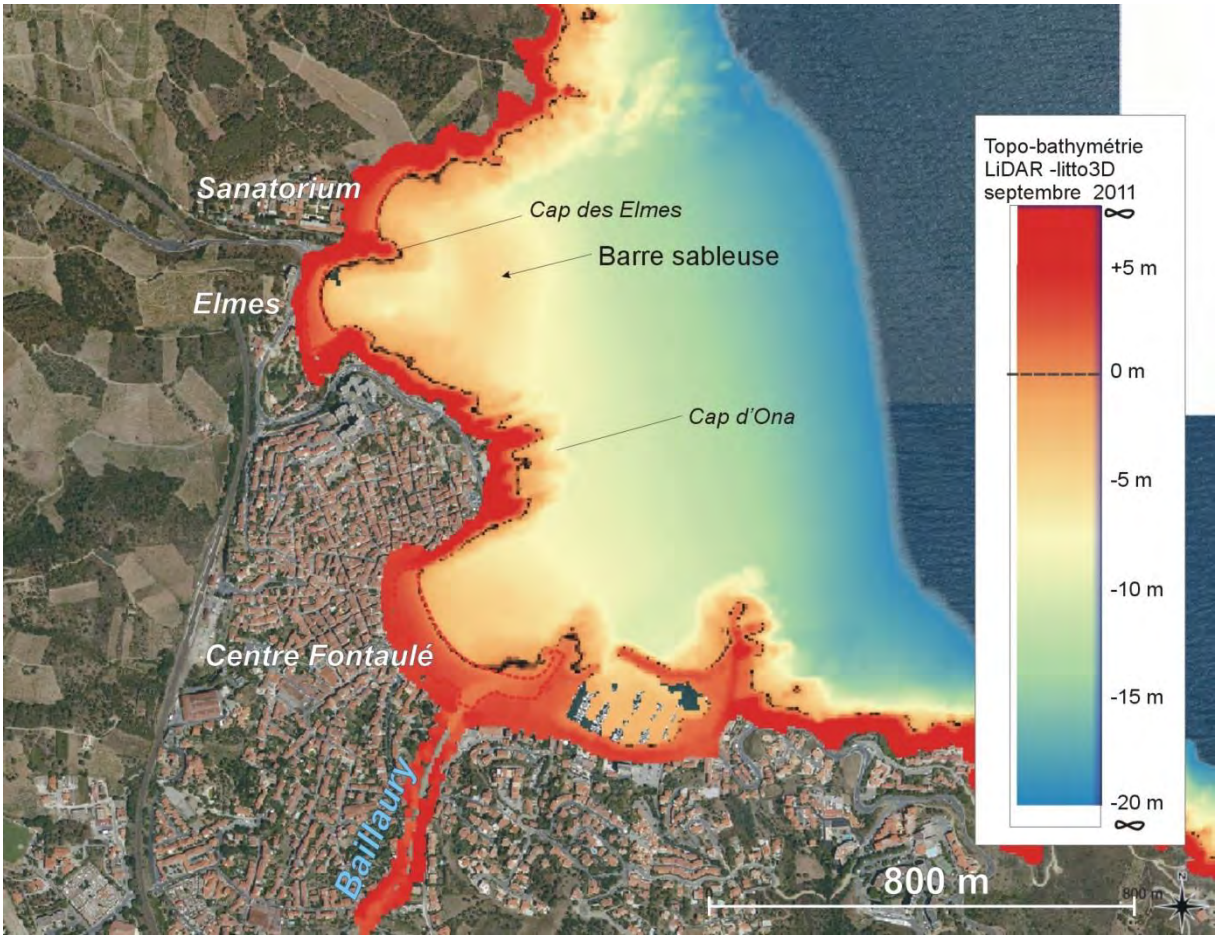


Figure 98 : bathymétrie des plages de Banyuls d'après le levé lidar de l'été 2011 montrant une barre sableuse, témoin de la connexion sédimentaire forte sur les fonds entre la plage du Sanatorium et d'Elmes.

Richard (1993) s'interroge sur la contradiction entre le sable abondant et bien homogène (sable surtout et galets plus fins) des plages des Elmes et du Sanatorium, et celle du centre-ville, composée de galets schisteux (de forme plate) et d'un mélange de graviers et de sables, matériel qu'il suppose lié aux apports millénaires de la Baillaury, remaniés sous l'action des houles marines.

Le fleuve aurait charrié de nombreuses carcasses de voitures jusqu'à l'embouchure lors de la crue dévastatrice du 20 septembre 1971 (P. Richard, 1993, p.112).

Il signale que l'Hôtel des Elmes faisait procéder régulièrement à un reprofilage et un régalement général de la plage avant l'été, qui comblait à cette occasion les ravinements des torrents. La plage du Sanatorium montre un chenal surcreusé de plus d'un mètre suite à de fortes pluies, faisant découvrir un soubassement de lit de galets en 1993.

Evolution historique et contemporaine des plages du Sanatorium et des Elmes

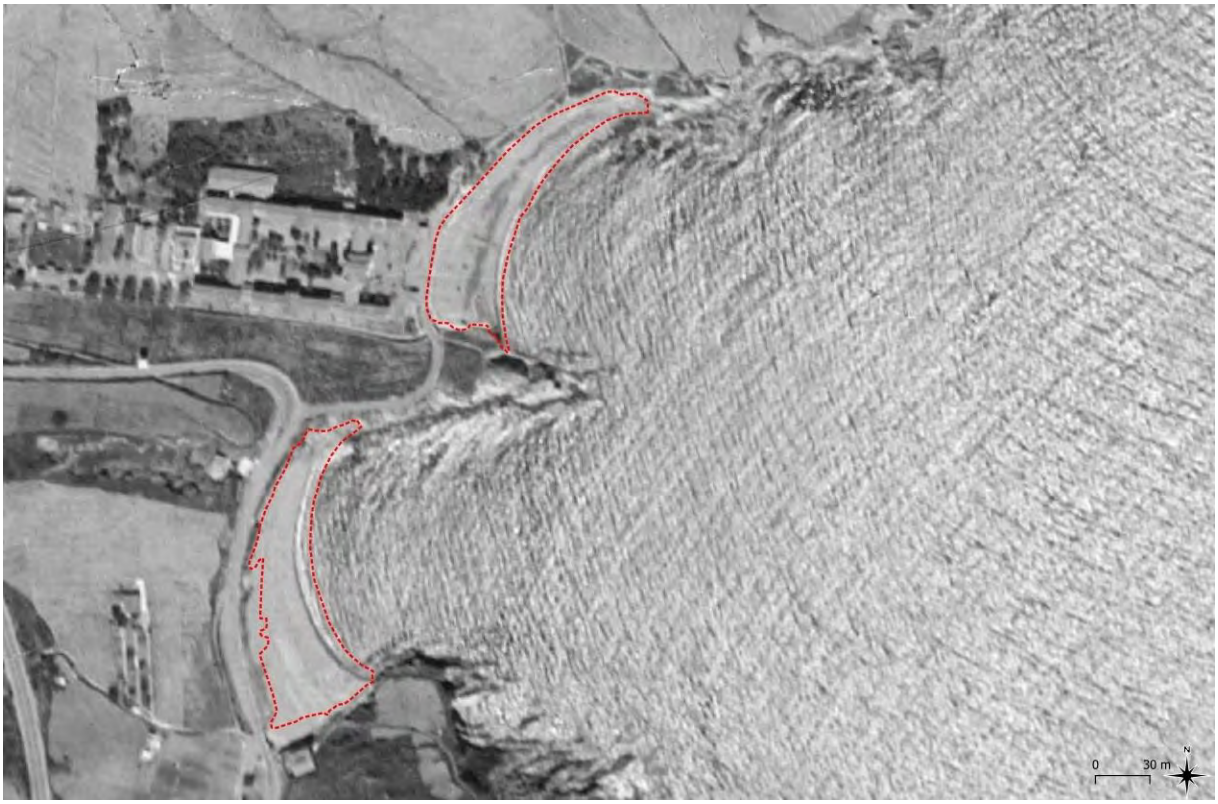
Ces deux plages sont stables depuis 1942 ou en très légère accrétion.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
14_Sanatorium	4 955 m²	169 m	4 433 m² (-3,1 m en moyenne de retrait du trait de côte par rapport à 2015)	4 694 m² (-1,5 m en moyenne de retrait du trait de côte par rapport à 2015)
15_Elmes	5 366 m²	154 m	4 417 m² (-6,2 m en moyenne de retrait du trait de côte par rapport à 2015)	4 755 m² (-4 m en moyenne de retrait du trait de côte par rapport à 2015)

La plage des Elmes comporte un petit exutoire d'un talweg qui la surplombe : "el Rec de les Redoleres". Ceci explique peut-être une plus grande mobilité du trait de côte sur cette plage.

Néanmoins, à l'échelle des 10 ans passés, il apparait là encore que la mobilité du trait de côte reste modérée sur ces 2 anses. Les très fortes tempêtes de mars 2013, mars 2018 et janvier 2020 (Gloria) n'ont pas bousculé le trait de côte au-delà de faibles variations, que l'on observe plusieurs mois après l'évènement (amplitudes identiques à celles observées sur d'autres périodes). On relève pourtant après Gloria de petites variations des hauteurs de dépôt sur le haut de plage par rapport aux murs, et un ensablement au pied du poste de secours de la plage des Elmes (cf. Figure 102).

A.



B.



Figure 99 (a, b) : situation des plages du Sanatorium et des Elmes en 1942 (a) et en 1952 (b) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 présentées par des contours rouges

A.


15/07/2009
200 m
01/08/2011
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
IMAGE NON DISPONIBLE
IMAGE NON DISPONIBLE
22/08/2015
21/09/2015

B.



Figure 100 (a, b) : Evolution chronologique des ortho-images sur le sites du Sanatorium et des Elmes entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria)



Figure 101 : photographies prisse en ULM de la plage du Sanatorium après les tempêtes d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL



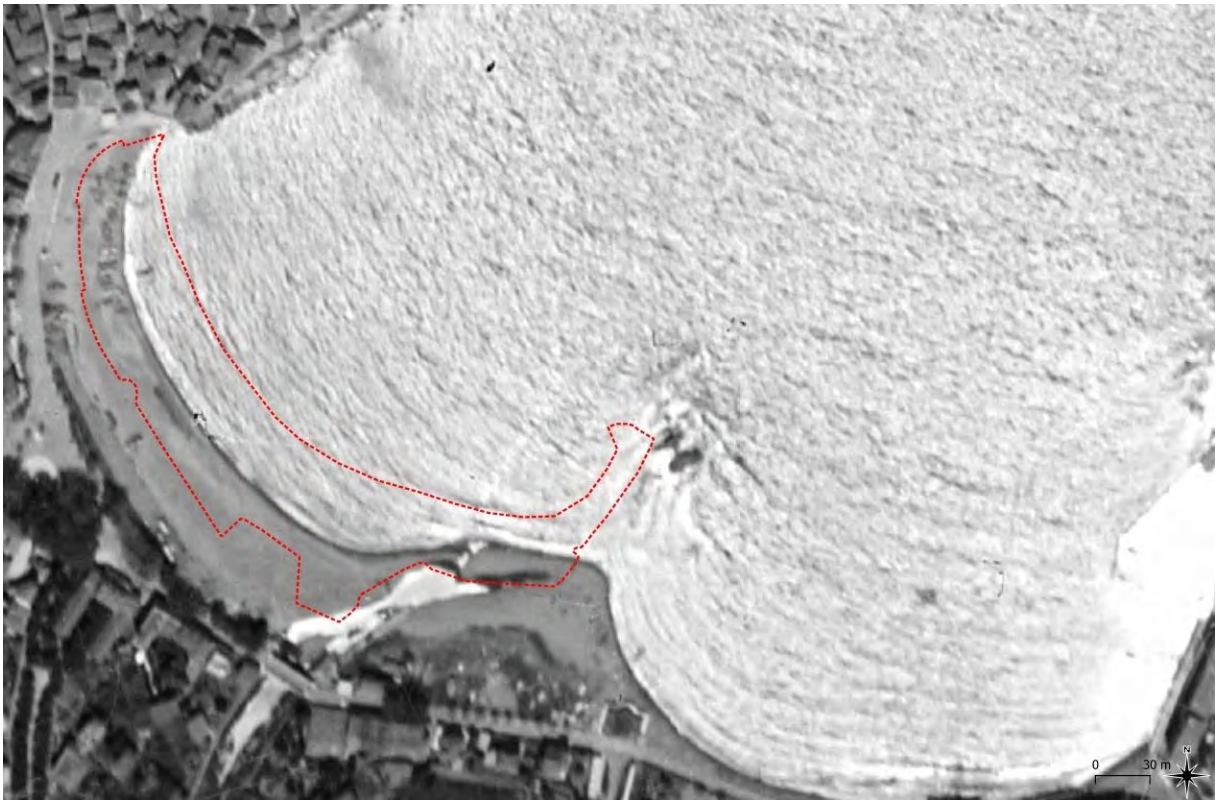
Figure 102 : photographies prises en ULM de la plage des Elmes après les tempêtes d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL

Evolution historique et contemporaine de la plage de Banyuls-centre/Fontaulé

Cette plage a fait historiquement l'objet de nombreux aménagements. Elle a littéralement été réduite de moitié en 1968 pour construire le port, avec la suppression de sa partie est par rapport au tombolo de sable naturel qui se formait derrière la petite île rocheuse. Cet îlot a ensuite servi d'accroche à la digue de séparation et de protection du port ; entre 1985 et 1987, un petit épi anti-retour a été placé au musoir de la digue qui rejoint les rochers, afin d'éviter des pertes de sédiment vers le large. Cet ouvrage a eu pour effet de remodeler le trait de côte de la plage qui a pris en réponse une forme concave, avec un demi-tombolo derrière l'ouvrage.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
16_Banyuls_centre	21 616 m²	394 m	9 844 m² (-29,9 m en moyenne de retrait du trait de côte par rapport à 2015)	14 512 m² (-18 m en moyenne de retrait du trait de côte par rapport à 2015)

A.



B.



Figure 103 (a, b) : situation des plages du centre à Banyuls en 1942 (a) et en 1952 (b) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 présentées par des contours rouges

La construction du port et le dragage des bassins a apparemment permis de recharger la plage ouest de manière importante puisqu'elle parait plus large en 1970 qu'en 1942-1952-1962. Mais il est supposé que plusieurs autres rechargements ou délocalisations mécaniques de sédiments ont été réalisés, comme par exemple :

- lors du rétrécissement de l'arrière de la plage (baladoir) entre 1942 et 1952
- lors de la rénovation de la route entre 1952 et 1968, qui a tronqué l'extrémité ouest de la plage
- enfin, comme à l'occasion de la construction de l'épi courbe entre 1986 et 1988.

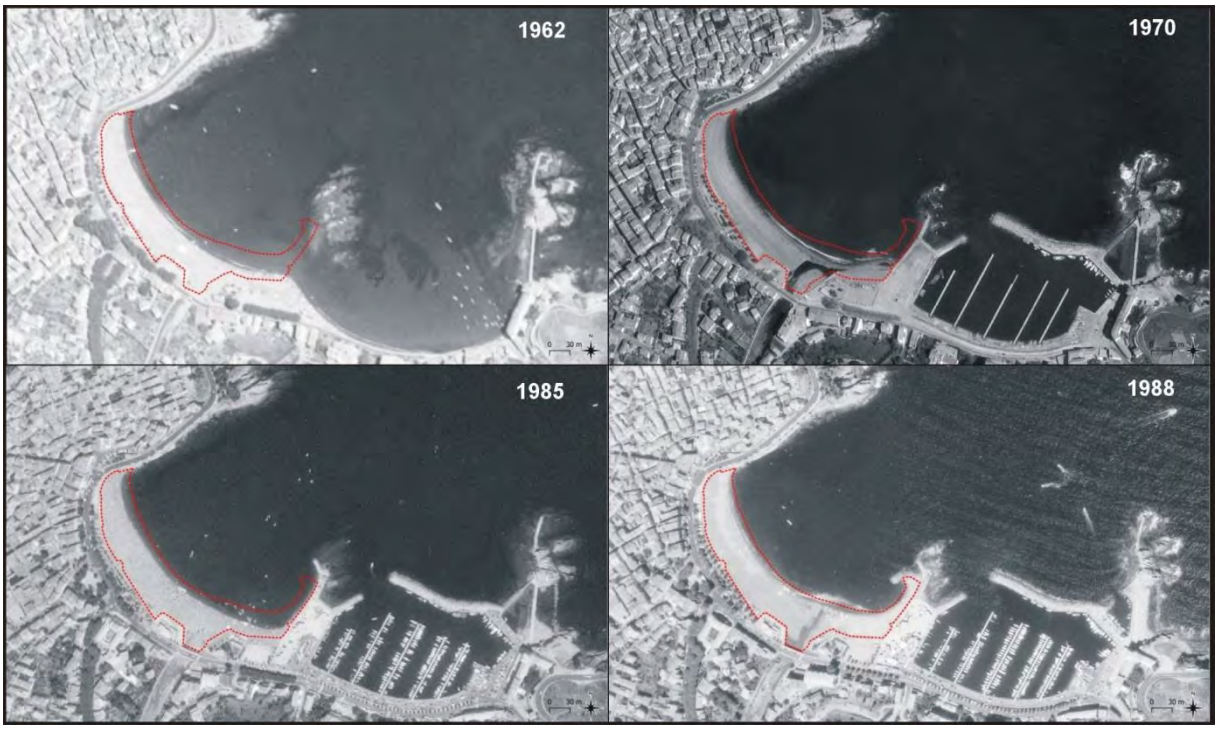


Figure 104 : historique de l'influence des aménagements successifs de 1968 (port) et 1986-1988 (épis courbe)

Depuis 2009, la plage du centre de Banyuls s'est élargie ou a été stable avec la formation d'un lobe de delta sous-marin à l'embouchure de la Baillaury, plus clair et visible en 2011 qu'en 2009, puis plus clair en 2015 qu'en 2012 (Figure 105). Ces deltas successifs témoignent certainement des fortes crues du 15 mars 2011, puis celles du 06/03/2013, 30/11/2014 et 22/03/2015. L'embouchure de la Baillaury semble par conséquent très dynamique, avec un remodelage du sable du chenal et du delta, même avec des crues d'intensité modérée tel que le montrent les photos du 21 septembre et du 23 octobre 2015. Une légère érosion de l'est de la plage (embouchure) est observée entre l'été 2017 et l'été 2019.

L'évolution la plus significative du suivi haute fréquence est mise en évidence par les relevés aériens après l'épisode d'octobre 2019, et surtout après la tempête Gloria (cf. Figure 106). La crue d'octobre a fortement modifié l'embouchure, qui s'est à nouveau ouverte et déviée totalement en oblique contre l'épi courbe. Sept jours après la tempête, la Baillaury coule encore et l'embouchure reste ouverte. Mais au final, ces deux épisodes n'ont pas provoqué de retrait important du trait de côte (Figure 105), même si l'épisode Gloria a favorisé un peu de recul. Une modification importante du profil semble visible sur les photos obliques, au niveau du haut de plage qui évolue fortement avant et après l'épisode.

A.


15/07/2009
200 m
01/08/2011
10/07/2012
16/10/2012
01/09/2014
29/06/2015
IMAGE NON DISPONIBLE
IMAGE NON DISPONIBLE
22/08/2015
21/09/2015

B.

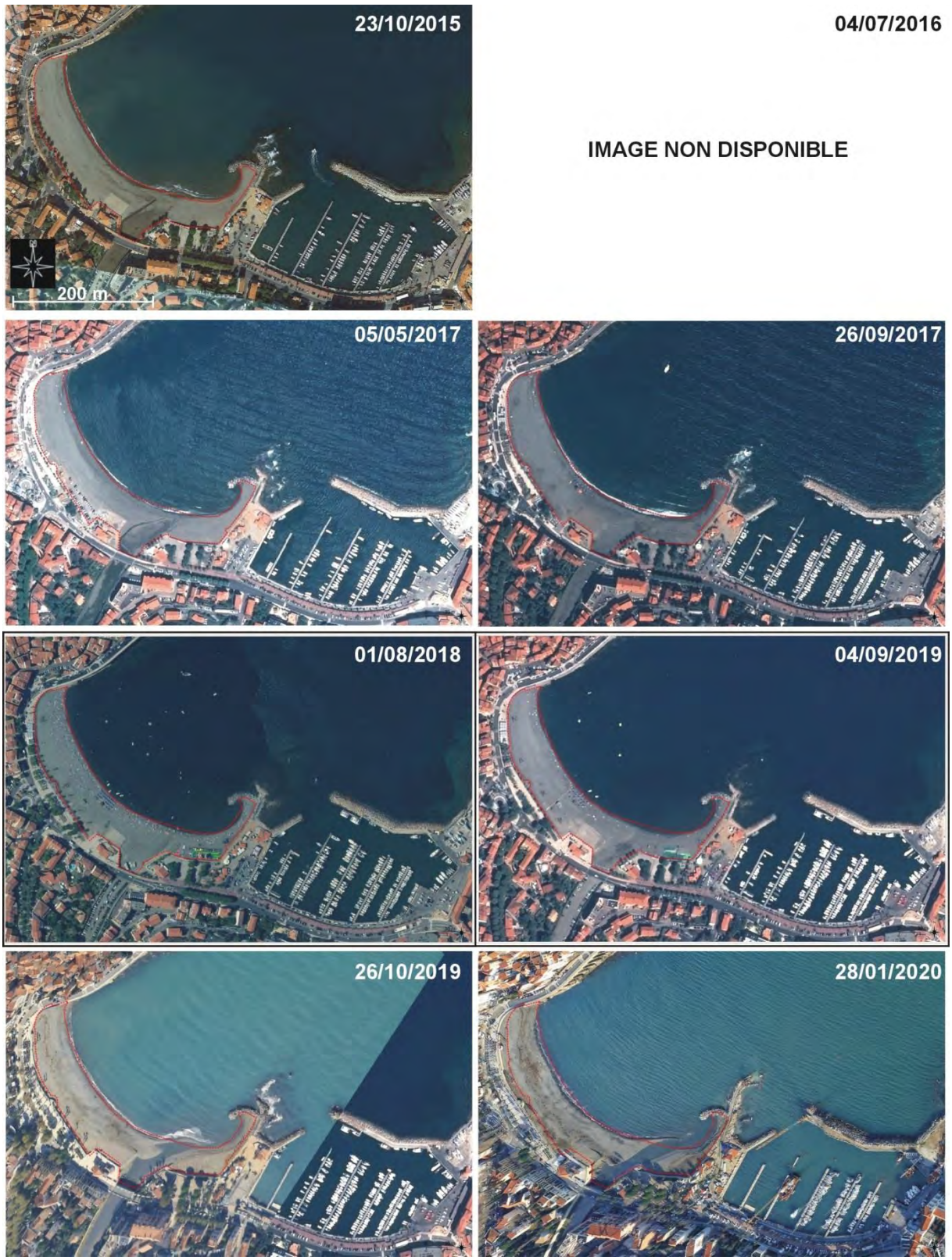


Figure 105 (a, b) : évolution chronologique des ortho-images sur le site de la plage du centre à Banyuls entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria)



Figure 106 : photographies prises en ULM de la plage de Banyuls-centre après les tempêtes d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL

La crique de Peyrefite

Evolution historique et contemporaine de la plage de Peyrefite

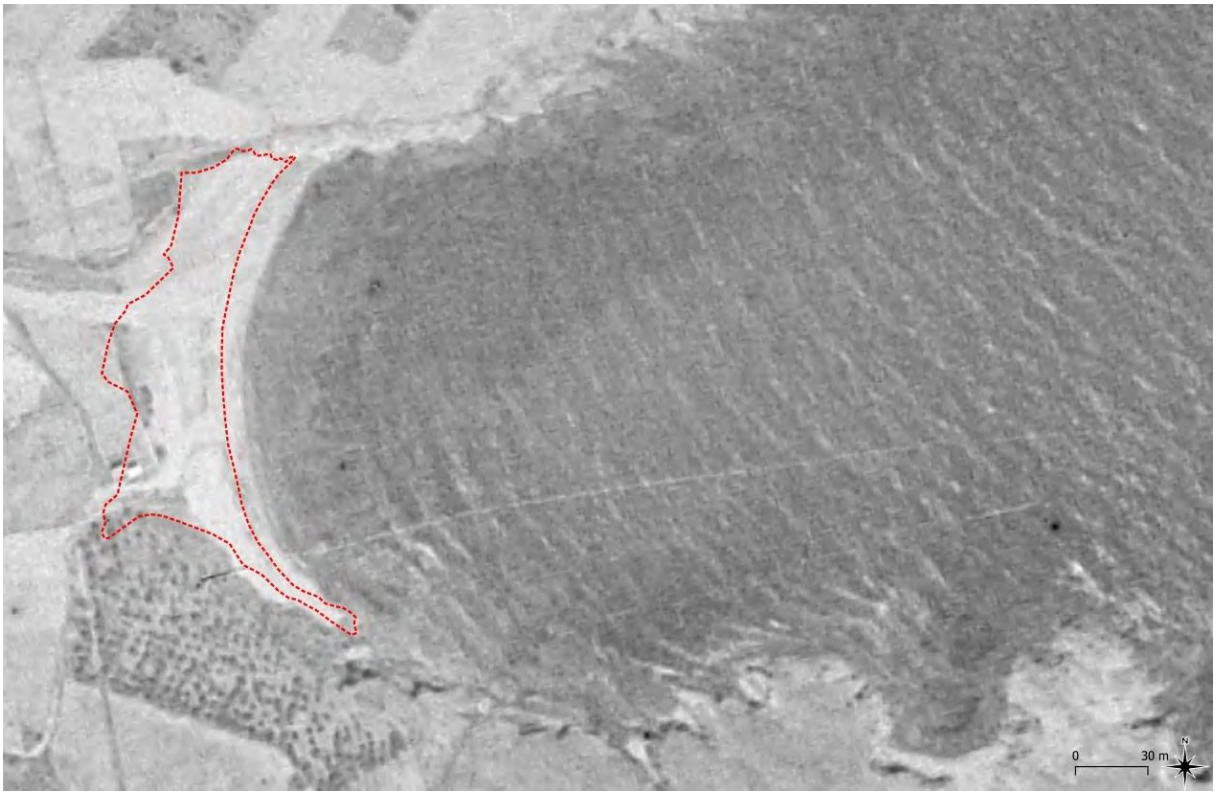
Au milieu du siècle dernier la crique de Peyrefite était très naturelle et presque totalement dépourvue de constructions en bord de mer. Elle est composée de fonds mobiles de sables/graviers/galets, mais aussi d'un herbier de posidonie qui est bien visible en noir sur les photos aériennes par transparence de l'eau. La surface de l'herbier parait avoir reculé fortement depuis l'image de 1952 (Figure 107).

Du point de vue du trait de côte, la plage était plus large d'une dizaine de mètres il y a 70-80 ans, ce qui laisse penser à une tendance naturelle érosive du site, toutefois très lente (0,12 m/an) comparé à ce que l'on peut observer sur d'autres côtes du Golfe du Lion (ex. : côte sableuse du Roussillon plus au nord avec des vitesses de près de 1 m/an).

La plage est alimentée par le ravin de la Tourasse au nord, et le parking de stationnement se trouve l'été sur le lit des alluvions (terrasse de galets). Richard (1993) décrit et illustre déjà l'impact du ravinement du torrent sur le creusement de la plage suite aux crues. Il décrit également des opérations de reprofilage de certaines parties de la plage par la mairie de Banyuls l'été.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
17_Peyrefite	6 636 m²	200 m	8 644 m² (+10,0 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)	9 106 m² (+12,3 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)

A.



B.

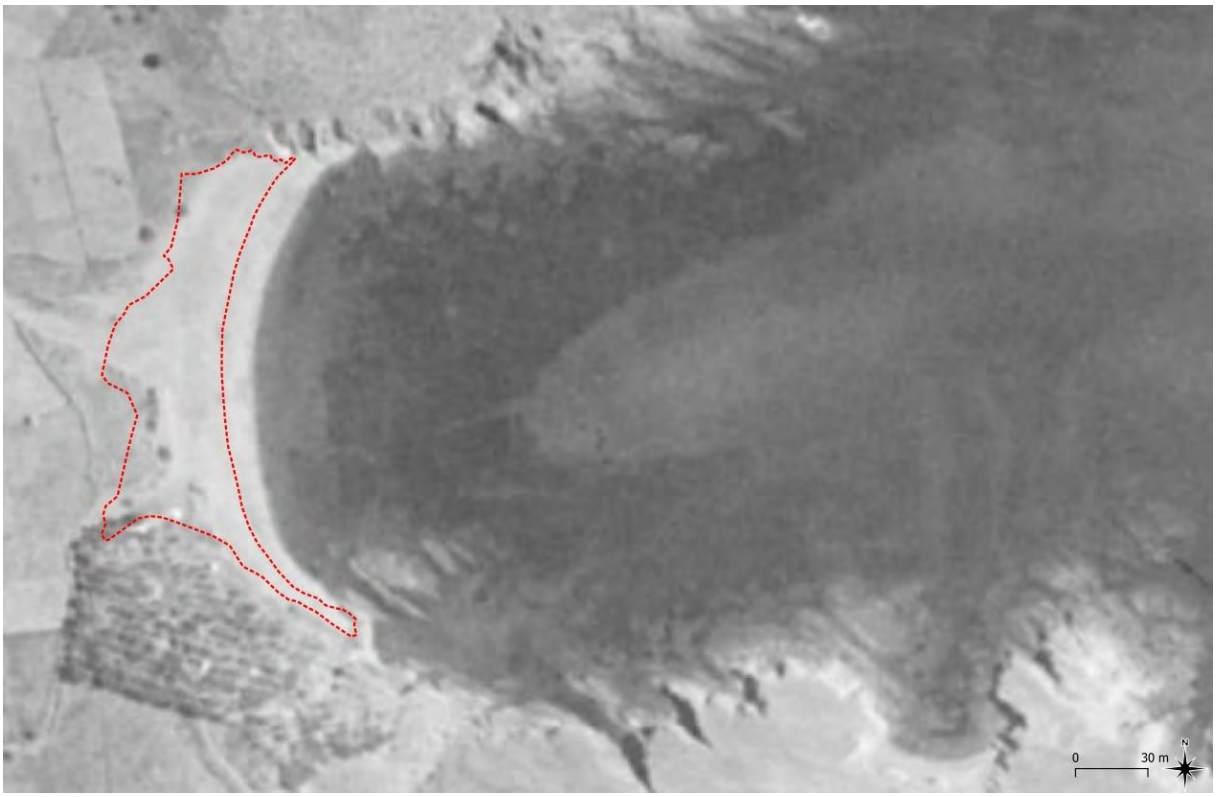


Figure 107 (a, b) : situation de la plage de Peyrefite en 1942 (a) et en 1952 (b) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 présentées par des contours rouges

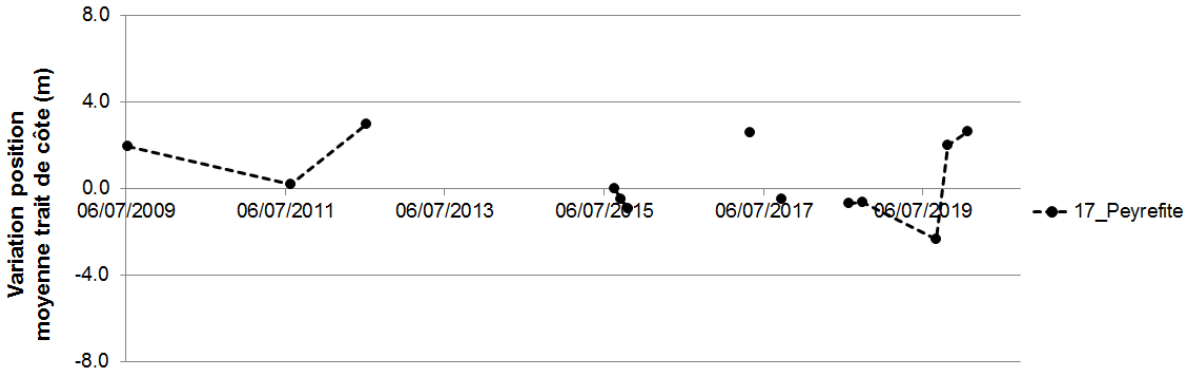
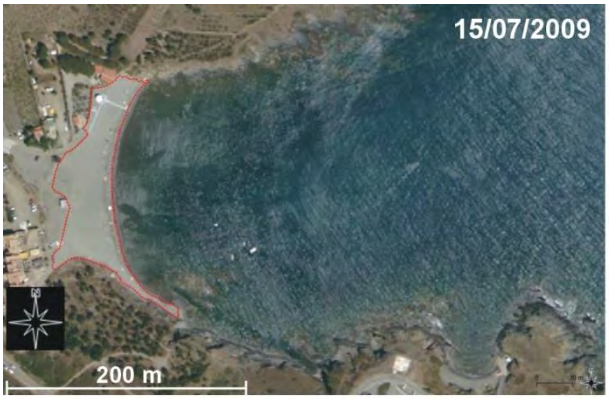
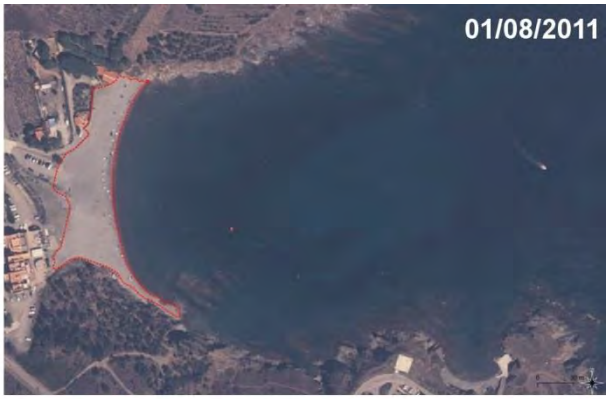


Figure 108 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage de Peyrefite entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria) d'après les images aériennes et satellites disponibles

Le trait de côte à Peyrefite semble fortement mobile pour une plage de la côte rocheuse. On relève une érosion entre 2009 et 2011, et une accrétion entre 2011 et 2012 (hivers pourtant relativement calmes). Entre 2012 et 2015 le trait de côte recule à nouveau (impact de la tempête de mars 2013 ?), et il est étonnant de voir que la plage s'élargit à nouveau en mai 2017, après un hiver riche en tempêtes. La plage s'érode ensuite entre 2018 et 2019 bien qu'aucune tempête très forte ne se soit produite. La tempête d'octobre 2019 a pour effet d'élargir la plage, qui reste de largeur moyenne assez stable lors de l'épisode Gloria.

A.







16/10/2012

IMAGE NON DISPONIBLE

01/09/2014

29/06/2015

IMAGE NON DISPONIBLE

IMAGE NON DISPONIBLE





B.

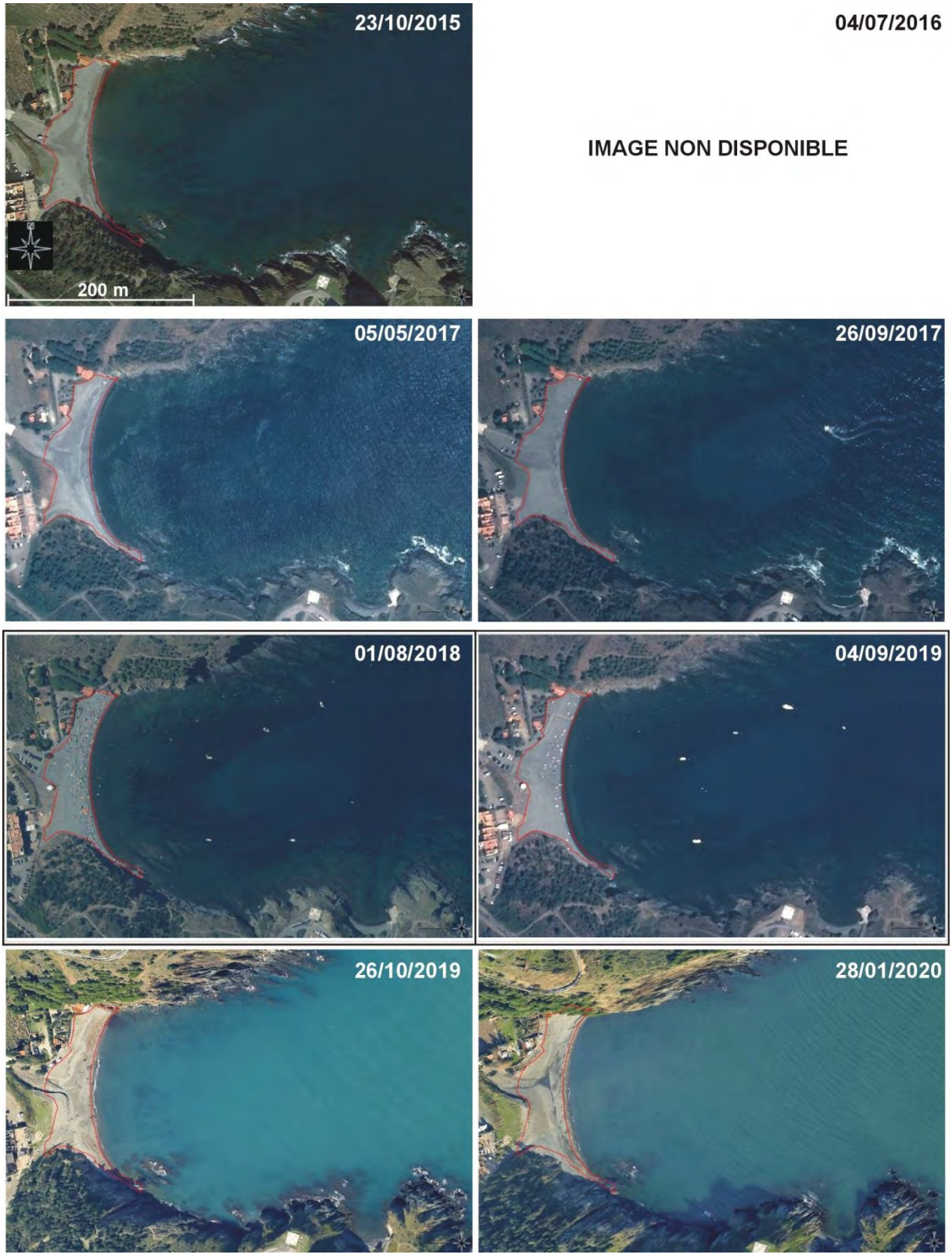


Figure 109 (a, b) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site de Peyrefite entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria)

La photographie aérienne oblique prise à la suite de la tempête d'octobre 2019 montre avant tout de fortes marques laissées par les torrents (très forte crue associée à cet évènement). Les exutoires des deux torrents sur la plage ont laissé une forte incision du cordon de galets et graviers, apportant des éléments de forte taille sur la plage (rochers, gros galets), ainsi que de nombreux déchets végétaux. Il est supposé que la couleur sombre observée à droite de l'image en bas de plage corresponde à une accumulation de feuilles mortes de posidonies arrachées par les vagues à l'herbier.

La tempête Gloria semble avoir clairement décaissé le haut de plage au milieu de l'anse avec la formation d'une falaise d'érosion en limite du replat végétalisé surplombant la plage. De même, le haut de plage face aux constructions au nord a subi des pertes de sédiments. Des galets sont visibles sur le haut de plage et en grande quantité dans le lit du torrent (dans ce cas, 2 hypothèses : incision du lit du fleuve, ou apport par la crue qui a accompagné la tempête ?).



Figure 110 : photographies prises en ULM de la plage de Peyrefite après les tempêtes d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL

La crique de Terrimbo

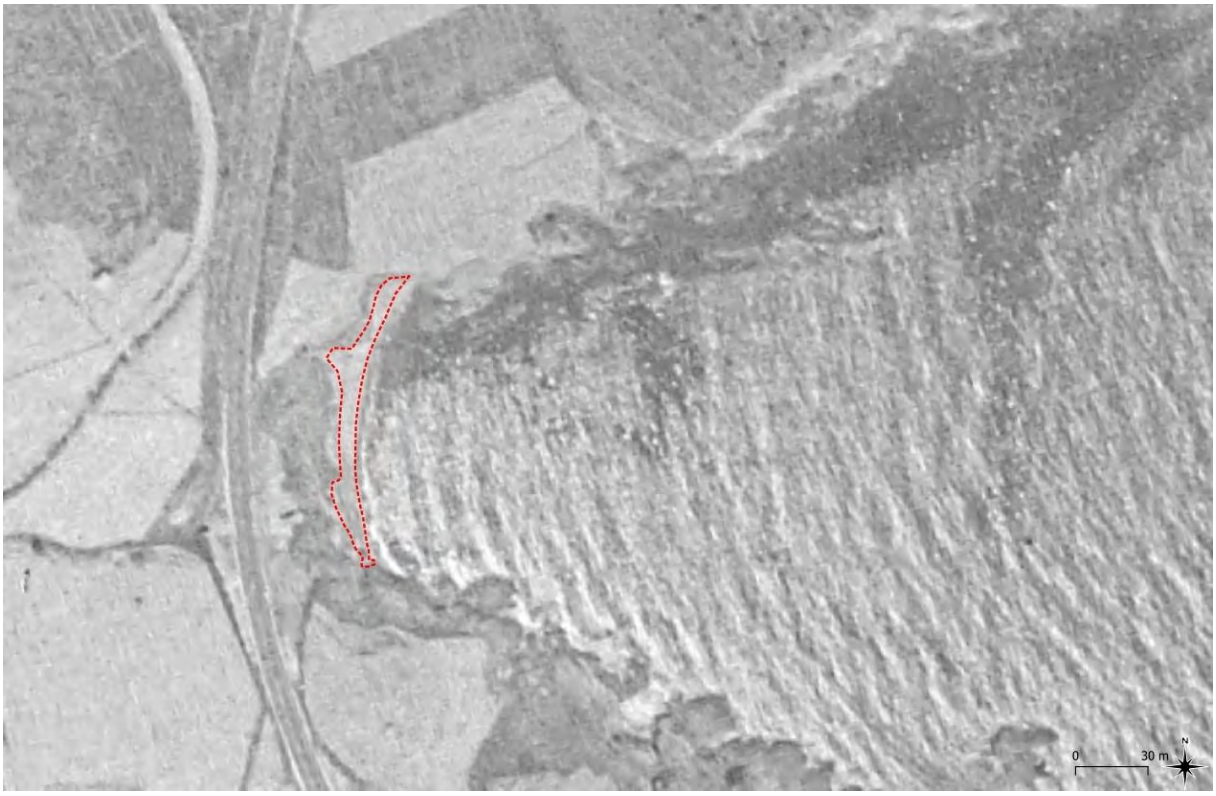
Evolution historique et contemporaine de la plage de Terrimbo

La crique de Terrimbo montre également un herbier de posidonies bien marqué en 1952, nettement effacé aujourd'hui. Hormis le lotissement construit sur le haut de la falaise au nord de l'anse, ce site a peu changé depuis la fin de la guerre. La plage en 1942 et 1952 était légèrement plus large qu'aujourd'hui.

La crique de Terrimbo possède une plage très étroite et une falaise prononcée, qui masque souvent avec son ombre la position du trait de côte sur les images aériennes. Le stock sédimentaire de la plage parait donc bien plus limité qu'à Peyrefite par exemple.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
18_Terrimbo	955 m²	125 m	1 456 m² (+4 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)	1595 m² (+5,1 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)

A.



B.

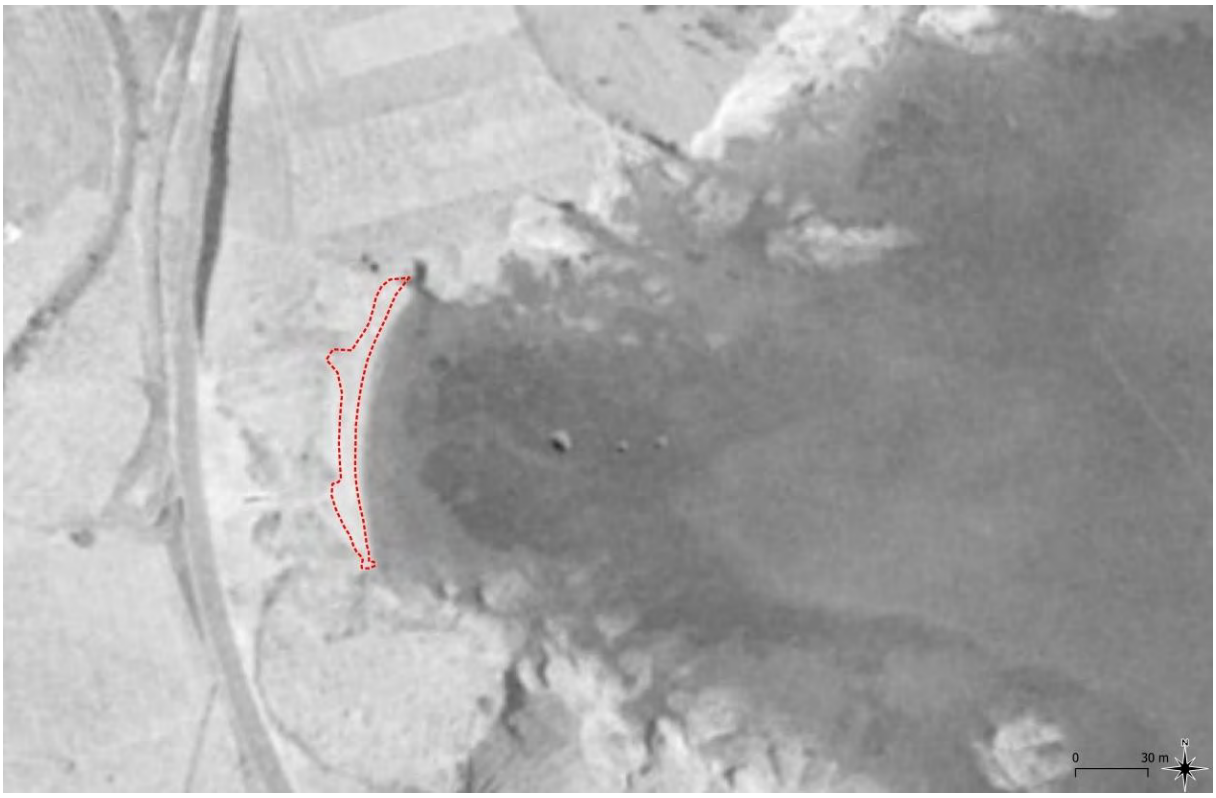


Figure 111 (a, b) : situation de la plage de Terrimbo en 1942 (a) et en 1952 (b) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 présentées par des contours rouges

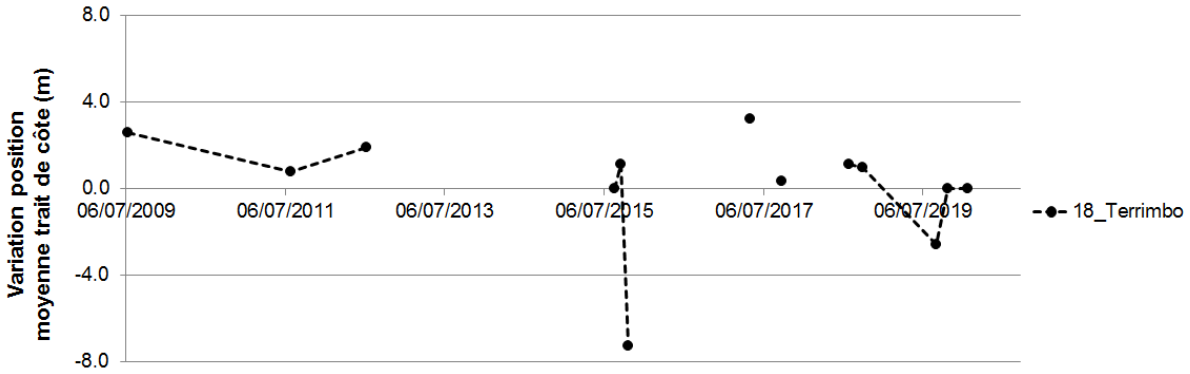


Figure 112 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage de Terrimbo entre l'été 2009 et l'été 2019 d'après les images aériennes et satellites disponibles

Sur ce site, le trait de côte est aussi fortement mobile, et répond de manière assez analogue à celui de Peyrefite. En revanche, on note une forte crise d'érosion de la plage entre le 21 septembre et le 23 octobre 2015. En l'espace de seulement un mois, le premier coup de mer de l'automne (Hs des vagues au large d'environ 3,5 m) a ici fortement mis à mal le stock sableux de la plage, avec un recul moyen de plus de 8 m du trait de côte contre la falaise.

A.







16/10/2012

IMAGE NON DISPONIBLE

01/09/2014

29/06/2015

IMAGE NON DISPONIBLE

IMAGE NON DISPONIBLE





B.

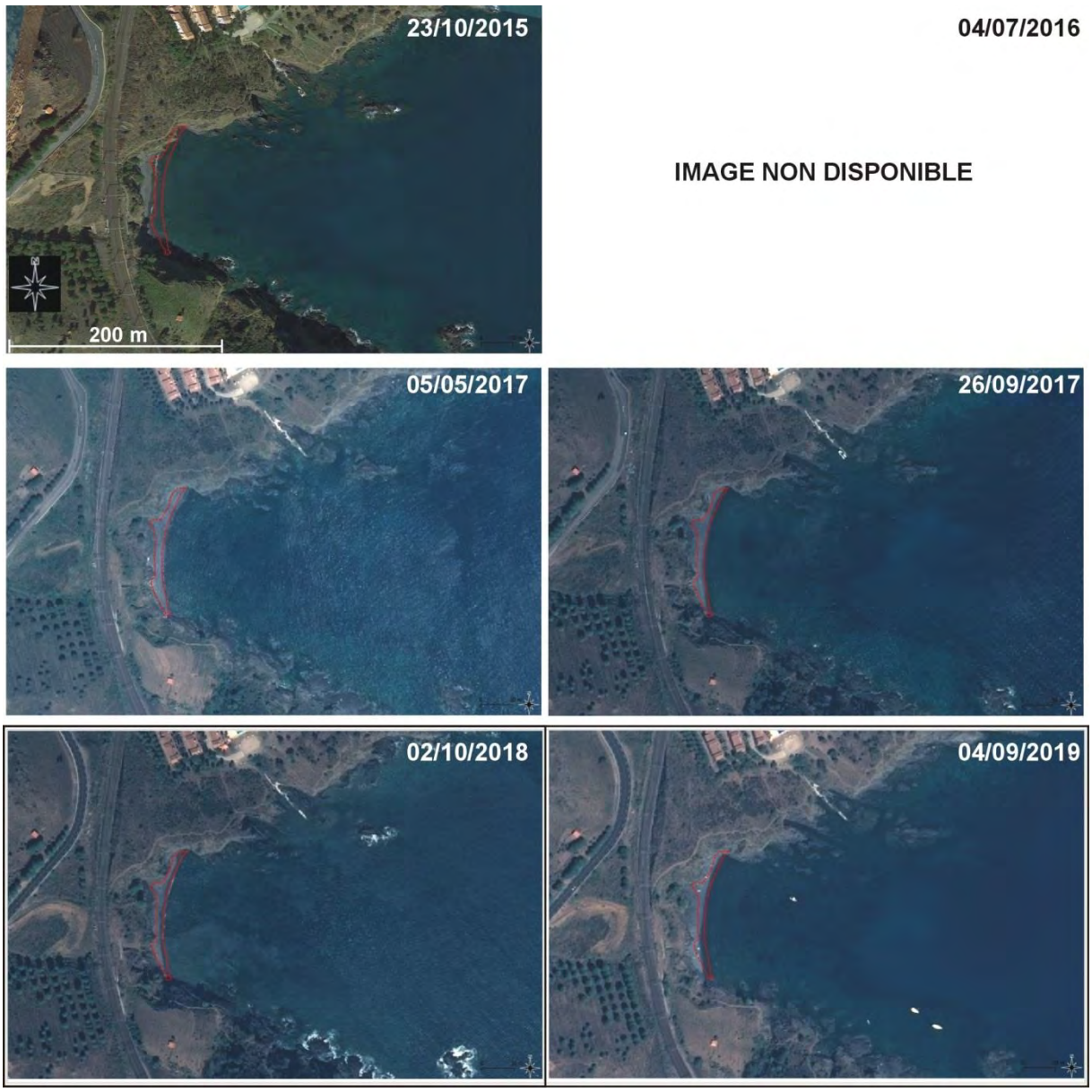


Figure 113 (a, b) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site de Terrimbo entre l'été 2009 et l'été 2019

Les images obliques n'ont pas été orthorectifiées sur ce site ; toutefois il est évident d'après les images que la tempête Gloria a laissé une forte marque après son passage, avec un rétrécissement important de la largeur de plage.

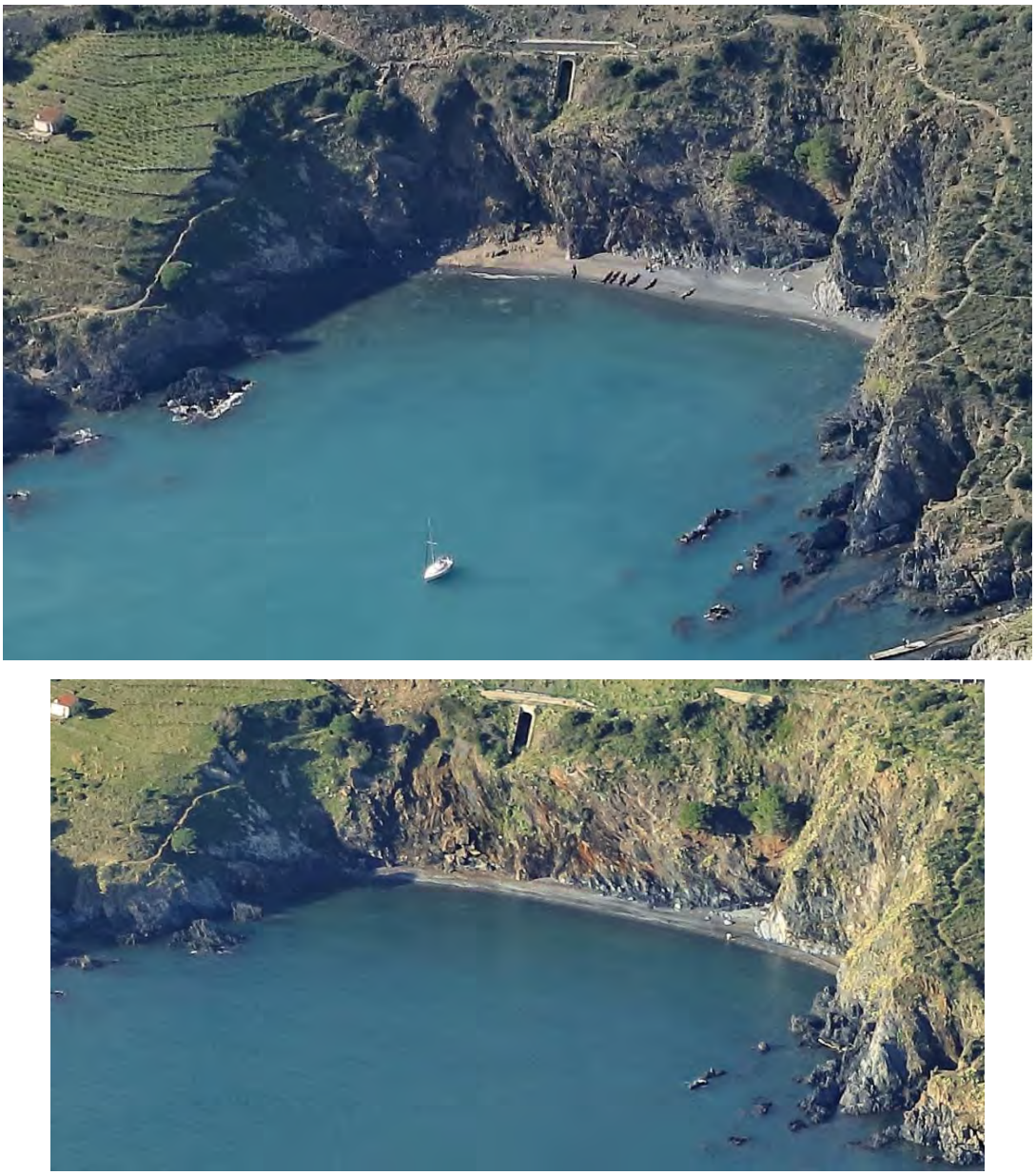


Figure 114 : photographies prises en ULM de la plage de Terrimbo après les tempêtes d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL

La baie de Cerbère

Evolution historique et contemporaine de la plage de Cerbère

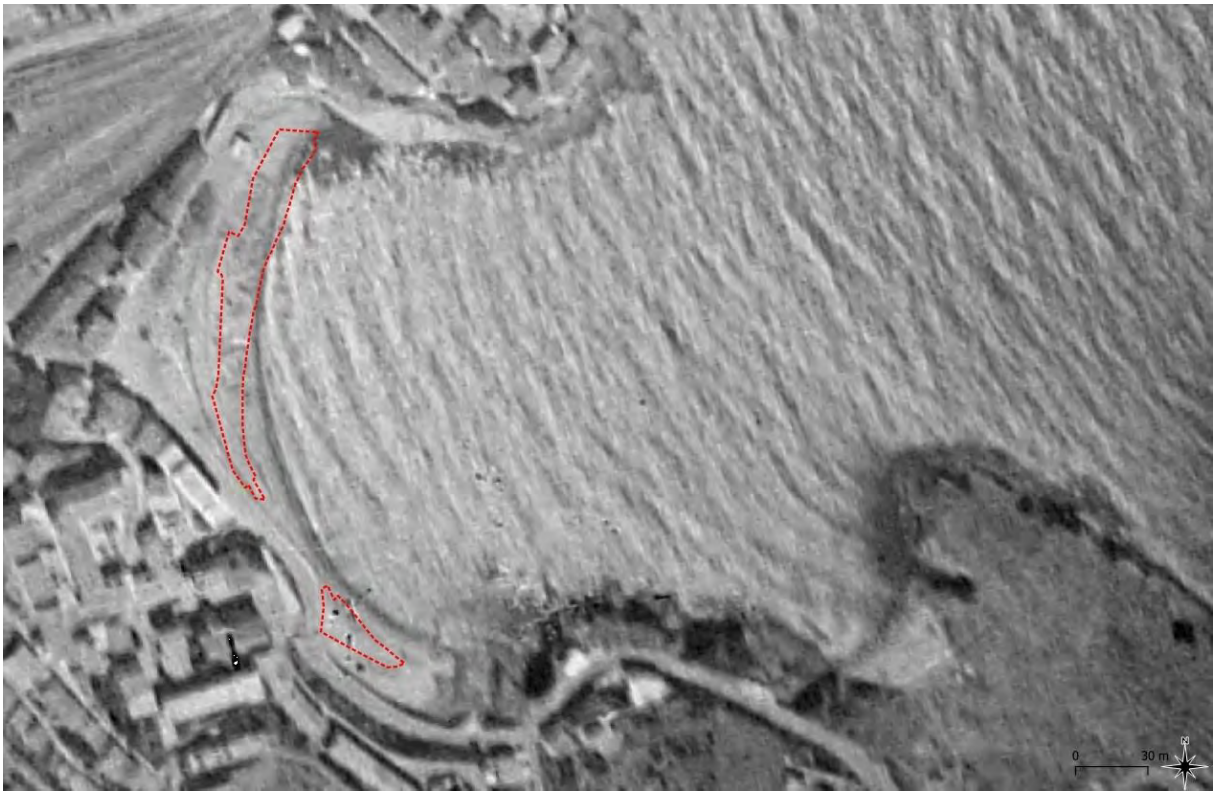
Depuis le milieu du XX^{ème} siècle la configuration générale de la ville de Cerbère autour de la plage a peu changé ; il est vrai que l'espace est ici contraint par la proximité de la gare de triage. Seul le nord de la ville sur la colline s'est développé.

Originellement, la plage de la baie de Cerbère est coincée entre deux petits caps rocheux en fond de baie. La digue qui ferme la baie au nord a été construite en 1976 afin de servir d'abri pour les bateaux, puis rénovée et clairement renforcée après la très forte tempête du 26 décembre 2008 qui a fortement impacté l'ouvrage (Figure 120). Une nouvelle carapace de tétrapodes en béton a été installée après la saison estivale de 2010.

SURFACE_SABLE	Surface sableuse (surface "serviette") par rapport à l'image de 2015 de l'IGN	linéaire de trait de côte sabeux/galets mobile	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1944	Surface de plage sur le même linéaire côtier en 1952
19_Cerbère	2 468 m²	188 m	3 497 m² (+5,5 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)	2 992 m² (+2,8 m en moyenne d'avancée du trait de côte par rapport à 2015)

La largeur de la plage était supérieure de quelques mètres en 1942-1952 par rapport à l'actuelle. On peut considérer que dans l'ensemble le système parait stable, mais il n'est pas à exclure que des opérations de rechargement en sable/gravier aient été réalisées sur ce système très rocheux et apparemment assez pauvre en sédiment sur la zone immergée, en comparaison notamment des plages de Peyrefite et de Banyuls. La petite plagette à la sortie de la ville sous l'hôtel de la Vigie a, elle, clairement perdu du sédiment depuis les années 50.

A.



B.

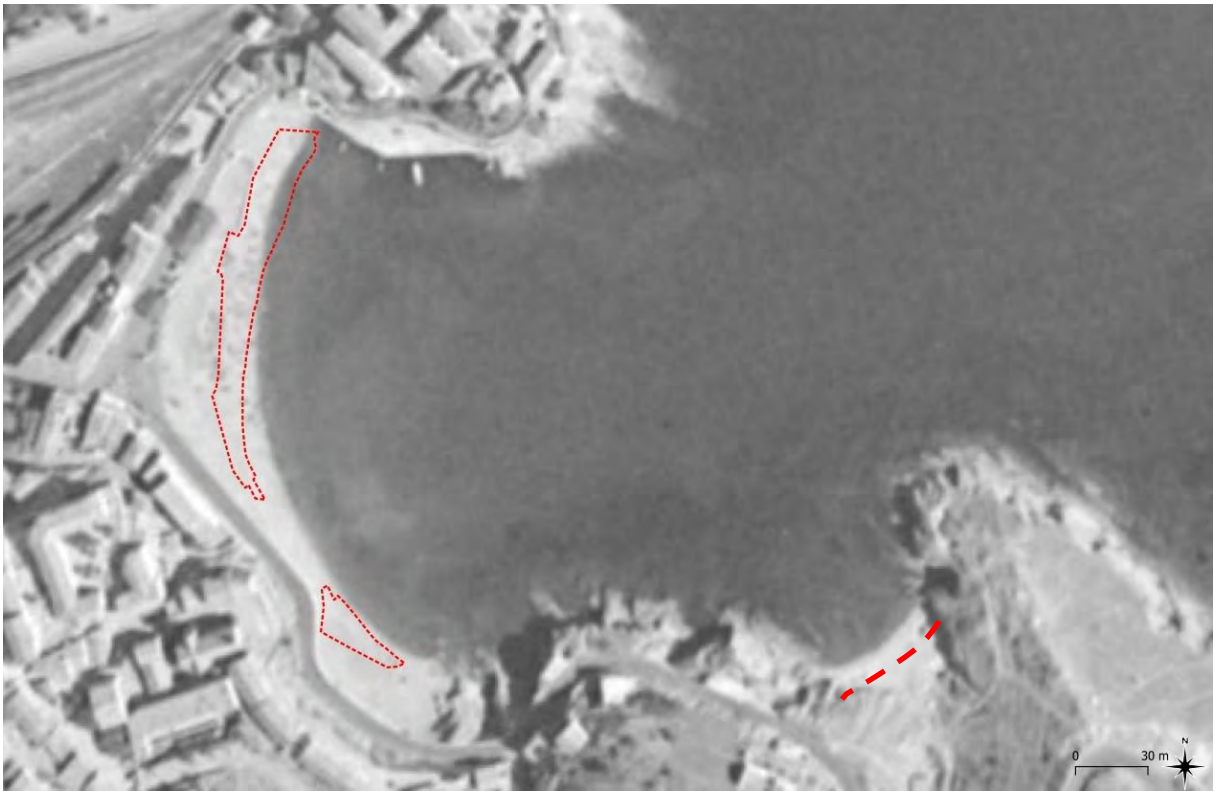


Figure 115 (a, b) : situation de la plage de Cerbère en 1942 (a) et en 1952 (b) par rapport aux surfaces de plages de référence mesurées en 2015 présentées par des contours rouges (trait de côte de 2015 marqué aussi en rouge sur la petite plage à la sortie de la ville).

Une érosion forte est à noter en revanche sur la partie centrale de la plage, adossée à un mur qui soutient la route. A cet endroit la plage s'est creusée entre 1950 et aujourd'hui, et des enrochements ont été superposés au socle rocheux existant pour préserver le soutènement de la route. Sur la portion sud de la plage, après les enrochements, la construction du bâtiment du club de plongée (vers la fin des années 1960) a réduit nettement l'espace mobile du prisme sableux de la plage, de même que la construction d'un petit boulodrome clôturé séparé de la plage par un muret.



Figure 116 : influence de la construction de la digue de protection entre 1972 et 1974 (source : ortho-images historiques de l'IGN ; https://remonterletemps.ign.fr/)

Le creusement de la partie centrale de la plage (face au virage de la route) s'est fait au profit de la partie nord de la plage, qui s'est agrandie. Cet effet est très certainement la réponse naturelle du prisme sableux suite à la construction de la digue en 1976 qui a modifié la circulation induite par les vagues (courant qui transporte le sédiment lors des coups de mer). Le trait de côte a pris une forme plus concave.

En 1993, Richard indique que la ville de Cerbère avait pour habitude de procéder à un remaniement mécanique régulier de la plage avant l'été, avec notamment l'apport exogène de sédiments meubles alluvionnaires (limons, sables, graviers et petits galets) au pied du mur de soutènement de la route, afin de pouvoir relier à pied les deux parties de la plage. De plus, les eaux stagnantes du marigot sur la plage à l'embouchure du Ribéral, bloquées par un cordon de galets l'été, étaient évacuées, de même que les déchets apportés par les eaux de ruissellement de la ville.



Figure 117 : deux images *Google street view* © montrant des enrochements au sud de la plage de Cerbère

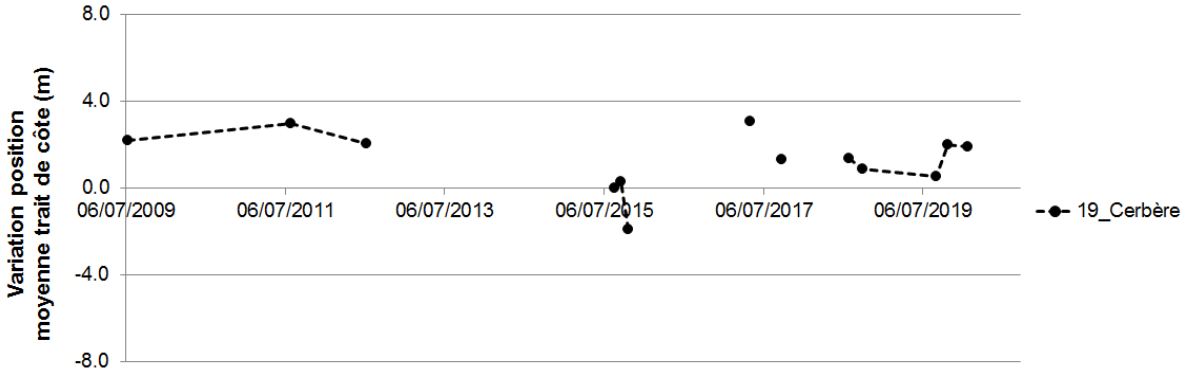


Figure 118 : évolution de la position moyenne du trait de côte sur la plage de Cerbère entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria) d'après les images aériennes et satellites disponibles

Depuis 2009, la plage est relativement stable, excepté une légère avancée au nord certainement à relier au renforcement de la digue en 2010. Toutefois, en 2015 on observe que la plage perd nettement de sa largeur, en particulier sur la partie nord de la plage. Les fortes houles de la saison 2016-2017 compensent ensuite ce déficit. On note pour les dernières années, une forme particulière

du trait de côte avec de légères sinuosités au nord (petite avancée et recul local) liées potentiellement à des morphologies sur la zone immergée du pied de plage (petits bancs de sable ?).

Sur cette plage encore, l'influence du torrent (le Ribéral) n'est pas nulle, et son drainage en partie nord de la plage provoque la déformation du stock sableux de la plage, et la formation d'un petit delta sous-marin après la crue d'octobre 2019 (Figure 119 et Figure 120).

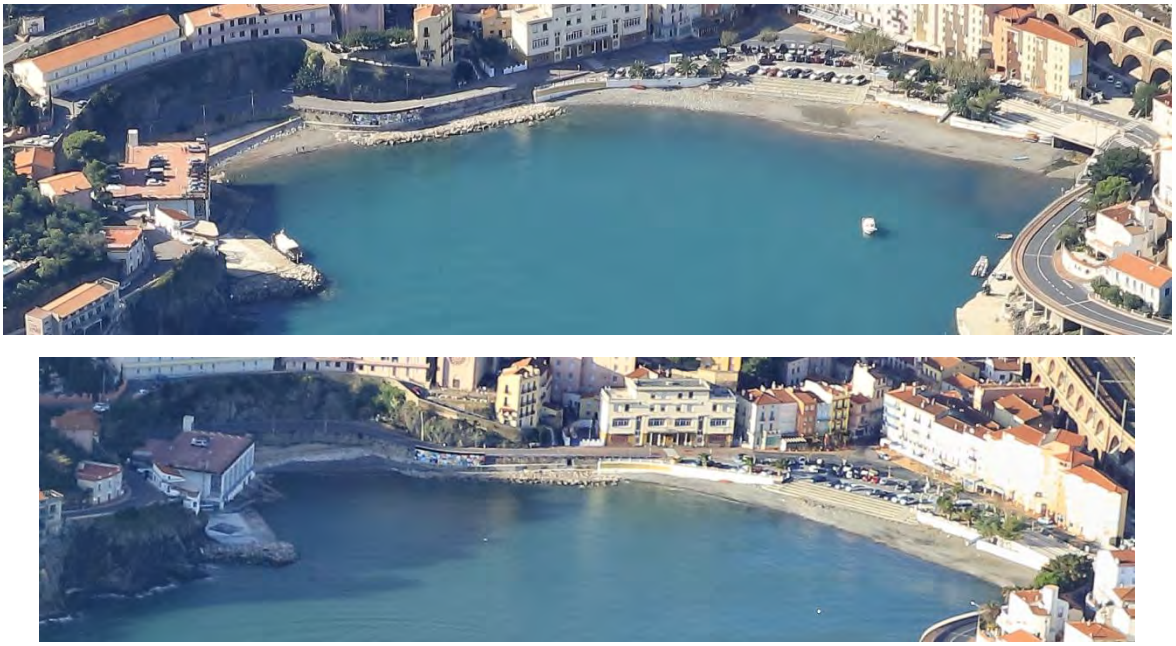
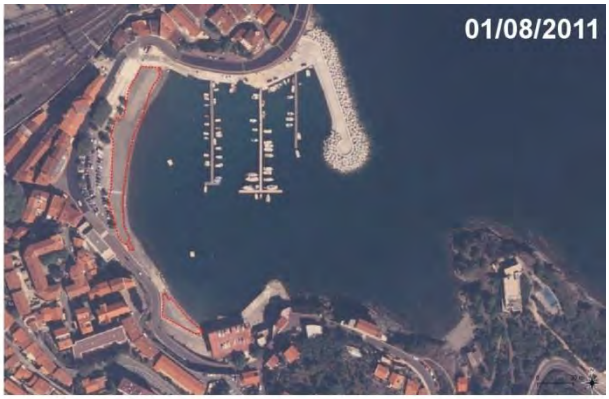


Figure 119 : photographies prises en ULM de la plage de Cerbère après les tempêtes d'octobre 2019 (en haut) et de janvier 2020 (Gloria, en bas) par le prestataire © photos-hedelin.com pour le compte du PNMGL

A.







16/10/2012

IMAGE NON DISPONIBLE

01/09/2014

IMAGE NON DISPONIBLE

29/06/2015

IMAGE NON DISPONIBLE





B.

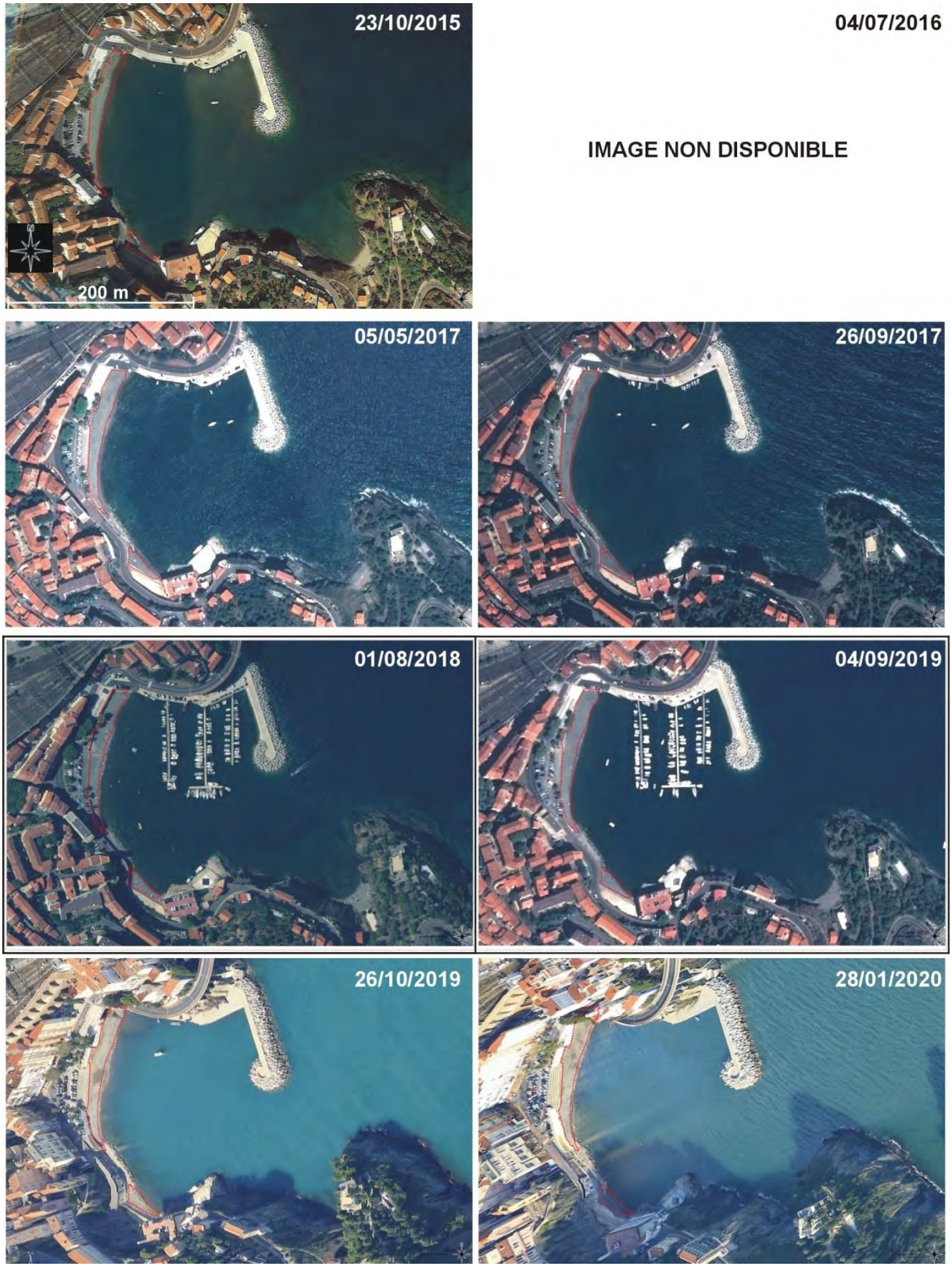


Figure 120 (a, b) : Evolution chronologique des ortho-images sur le site de Cerbère entre l'été 2009 et janvier 2020 (post-Gloria)

VI) Conclusion

Après un premier regard sur près de 80 années d'évolution du littoral de la côte rocheuse catalane française, l'étude apporte pour la première fois une investigation à très haute fréquence, entre 2009 et 2020, des mouvements du trait de côte des vingt plages principales de la zone. Le rapport montre, en conformité avec les études précédentes, que les stocks de sable de ces plages semblent stables sur le long-terme (10 à 100 ans) et que les pertes potentielles de sédiments sont compensées par des apports issus du démantèlement des roches sous-marines et des falaises (caps) voisines de ces plages. L'apport par les différents torrents et petits fleuves côtiers paraît secondaire face à l'action des vagues malgré de fortes crues observées durant la période temporelle considérée, crues qui remodèlent de manière active la forme des embouchures et du cordon sableux immergé/émergé. Certaines plages urbaines ont indéniablement fait l'objet de modifications par l'Homme, quand elles n'ont pas été semble-t-il purement et simplement créées artificiellement (ex. en-Baux). Si les rechargements sont certainement rares aujourd'hui, plusieurs ont eu lieu par le passé. Il s'agira à l'avenir de rechercher les dates de ces travaux et les quantités déplacées/apportées depuis 20 ans.

Si l'origine des mouvements du trait de côte reste complexe à décoder malgré une investigation très poussées des conditions de vagues entre chaque image, certains comportements ont été observés, notamment un aspect bénéfique des fortes houles de Tramontane pour les plages du nord, et un impact significatif de certaines fortes tempêtes comme celle de décembre 2008, mars 2013, mars 2018 et janvier 2020. Leur impact n'est pas toujours synonyme de recul du trait de côte, c'est variable selon les sites. Les images obliques de la tempête d'octobre 2019 et surtout de Gloria montrent des dépôts ou départs importants de sable sur le haut de plage, ce qui semble le cas de toutes les tempêtes. Sur certaines plages, des mouvements du trait de côte de +/- 4 à 8 m en moyenne et de plus de +/- 15 m localement ont été observés à plusieurs reprises et sur plusieurs sites à la fois à l'échelle d'une saison et à l'échelle d'un seul épisode de tempête (comme le prouve le suivi de Gloria).

Les plages de poches de la côte rocheuse ne semblent pas menacées du fait de leur caractère "naturellement résilient". Néanmoins sur ces plages les risques existent (menaces pour les enjeux de haut de plage, érosion, submersion) et une dynamique très active du sable est bien visible. Il est certain que de forts volumes de sables et de graviers sont déplacés pendant les tempêtes. Néanmoins, ce travail montre également que les interventions humaines, comme la construction de digues, ont un effet très important sur le transport des sédiments et la forme des plages qui doit naturellement s'adapter à la nouvelle circulation des courants. Les reprofilages des plages urbaines peuvent expliquer certaines évolutions observées durant la période estivale.

L'originalité de ce rapport est assurément de montrer qu'une dynamique sédimentaire active est à l'œuvre sur l'avant-côte, que des liaisons fortes avec la plage émergée existent, et que des anses voisines peuvent être connectées entre elles par leur stock sous-marin. En termes de préconisations, des études futures devront investir la dynamique évènementielle des volumes de sables grâce à des mesures topo-bathymétriques hautes fréquences et des suivis de la courantologie. Un suivi bathymétrique Lidar ou multifaisceaux de toutes les plages à fréquence annuelle ou bi-annuelle apporterait un éclairage sur certains phénomènes immergés. Enfin, un suivi par photographie oblique ou vidéo des conditions d'agitation et de déferlement, permettrait de mieux comprendre la sensibilité de chaque site et d'apporter un retour terrain sur ces épisodes de fortes vagues.

VII) Bibliographie

Les publications du CEFREM sont disponibles en téléchargement sur : https://elmusca.wordpress.com/

AGENCE DE L'EAU RHONE-MEDITERRANEE-CORSE, UPVD/CEFREM, 2000. Définition et cartographie des unités sédimentaires du littoral méditerranéen français, synthèse bibliographique. Volet I : caractérisation de l'évolution du trait de côte depuis 50 ans - secteur ouest : Languedoc-Roussillon. Décembre 2000. Rapport technique, 79 p.

ALEMAN N., ROBIN N., CERTAIN R., BARUSSEAU J.-P. and GERVAIS M., 2013. Net offshore bar migration variability at a regional scale: Inter-site comparison (Languedoc-Roussillon, France). In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 1715-1720, ISSN 0749-0208.

ALEMAN N., RAYNAL O., CERTAIN R., ROBIN N., BRUNEL C., 2017. Atlas de l'évolution morphologique et du budget sédimentaire du littoral du Languedoc-Roussillon 2007-2009-2011. Rapport thème 2 - SIMILAR, 68 p.

ALEMAN N., RAYNAL O., CERTAIN R., ROBIN N., 2019a. Pertes de sédiment vers le large : Quelles zones préférentielles par réanalyse des données existantes ? Rapport axe 1 et 4 - PAUL, 28 p. contrat d'étude "Perte AU Large" (PAUL) entre la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement d'Occitanie (DREAL-O), l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD) et le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), laboratoire CEFREM et groupe Littoral Multi-SCale Analysis (LMUSCA).

ALEMAN N., RAYNAL O., CERTAIN R., ROBIN N., 2019b. Atlas de l'évolution morphologique et du budget sédimentaire du littoral d'Occitanie 2011-2014/15. Rapport axe 2 - PAUL, 64 p.

ALEMAN N., ROBIN N., RAYNAL O., CERTAIN R., RICHARD B., GERVAIS M., HEBERT B., MENITI C., CROS M., HEURTEFEUX H., 2019c. Evaluation de méthodes d'analyse du trait de côte et de l'avant côte via les données satellites PLEIADES. Rapport phase 1 - SENVISAT.

BRUNEL C., 2010. Evolution séculaire de l'avant-côte de la Méditerranée Française. Thèse de doctorat de l'université d'Aix-Marseille, 423 p.

BRUNEL C., CERTAIN R., ROBIN N., ALEMAN N., RAYNAL O., BARUSSEAU J-P, SABATIER F., 2012. Atlas de l'évolution des fonds et des budgets sédimentaires séculaires de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon (1895/1984/2009), 27p.

CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), 2015. Indicateur national de l'érosion côtière. Cartographie pour le Languedoc-Roussillon, 7 p. (http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/acces-aux-donnees-r556.html)

EID-MEDITERRANEE, 2014. Dynamique morphologique des plages de la côte rocheuse des Pyrénées-Orientales. Contrat d'étude de la DREAL, 81 p. Disponible sur demande à l'EID-Méditerranée.

GERVAIS M., 2012. Impacts morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen. Thèse de doctorat en Océanologie de l'Université de Perpignan (co-encadrement BRGM / UPVD-CEFREM ex-LEGEM), 370 p.

PENNEC C., 2013. Rôle du contact géologique et de l'hydrodynamique sur la morphodynamique de l'avant-côte : exemple de la plage du Racou. Mémoire de master 2. Université de Perpignan Via Domitia, 33 p.

RAYNAL O., CERTAIN R., GUERINEL B., 2011. Plan de Gestion des Sédiments du Languedoc-Roussillon Tâche A1. Publication CEFREM pour la DREAL, 49p.

RICHARD P., 1993. La côte rocheuse des Pyrénées orientales : étude de ses plages. Mémoire de maîtrise de géographie, sous la direction de B. Lemartinel, université de Perpignan. Disponible sur demande à l'EID-Méditerranée.

STRATEGIE REGIONALE DE GESTION INTEGREE DU TRAIT DE COTE, 2018. DREAL-Occitanie. Directeur de Publication : Didier KRUGER, Directeur DREAL ; Réalisation : DREAL Occitanie - DRN/DPRN - Laurent MONTEL ; Conception : DREAL Occitanie - CAB/COM. 86 p. (http://www.occitanie.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/20180821_-_srgitcv2.pdf)

CPER 2007 – 2013. Gérer durablement le Littoral - Etudes stratégiques et prospectives sur l'évolution des risques littoraux - Module 2 : stratégies d'adaptation - Action 3 – Le nettoyage des plages, problèmes et solutions. Phase 1 (2010) : l'état des pratiques aujourd'hui en Languedoc-Roussillon. Etat, région Languedoc-Roussillon.