



Étude du transit sédimentaire autour du port de Taverna : compte-rendu d'installation des caméras de suivi du trait de côte



Rapport final

BRGM/RP-70187-FR

Octobre 2020

Étude du transit sédimentaire autour du port de Taverna : compte-rendu d'installation des caméras de suivi du trait de côte

Rapport final

BRGM/RP-70187-FR

Octobre 2020

Étude réalisée dans le cadre de la convention d'application 2017 entre le BRGM et l'OEC

Anne-Éleonore Paquier

Avec la collaboration de

Nico Valentini

Vérificateur :

Nom : Yann Balouin

Fonction : Expert littoral

Date : 24/11/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : Anthony Rey

Fonction: Directeur régional BRGM
Corse

Date : 27/11/2020

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : Littoral, Corse, Taverna, Plaine orientale, Suivi du trait de côte, Caméras, Solarcam

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

Paquier, A.-E. Valentini, N. (2020) – Étude du transit sédimentaire autour du port de Taverna : compte-rendu d'installation des caméras de suivi du trait de côte. Rapport final. BRGM/RP-70187-FR, 45 p., 31 fig.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le port de Taverna, situé sur la commune de Santa-Maria-Poggio, sur la Plaine orientale Corse, marque la limite entre deux cellules hydro-sédimentaires. Le trait de côte est en accrétion au sud du port et en érosion au nord de celui-ci. Cette différence de fonctionnement semble accrue par la présence du port qui pourrait faire barrage au transport sédimentaire.¹ Dans un contexte de forte érosion au nord du port, comme montré par les mesures réalisées dans le cadre du Réseau d'Observation du Littoral de Corse (ROL) depuis 2002, il semble nécessaire d'évaluer si un transfert de sédiment a lieu du sud au nord, malgré la présence du port. Les résolutions spatiales et temporelles des données existantes permettent de suivre l'évolution du trait de côte sur le long terme et d'évaluer les mouvements de la barre d'avant côte à l'échelle de plusieurs jours. En revanche, elles ne permettent pas, ou seulement partiellement, de suivre l'évolution du trait de côte à l'échelle saisonnière et événementielle ni le remplissage de la digue Sud ou l'arrivée de sédiment au nord du port, éléments cruciaux pour la compréhension du transit sédimentaire au droit du port de Taverna. Pour combler ce manque de données et permettre le suivi de ces éléments, il a été choisi d'installer deux caméras sur les digues Nord et Sud. Les images ainsi acquises viendront compléter les suivis topo-bathymétriques effectués dans le cadre du ROL et du projet MAREGOT par le BRGM en partenariat avec l'Office de l'Environnement de la Corse.

Ce rapport a pour objectif de présenter la mise en œuvre des deux caméras ainsi que les traitements et exploitation des images acquises qui pourront en être faits.

Cette mise en œuvre réalisée du 30 octobre 2020 au 5 novembre 2020 a consisté à installer deux mâts pliables sur les digues Nord et Sud du port de Taverna sur lesquels sont fixées deux caméras Solarcam. Celles-ci ont été configurées pour acquérir une image toutes les demi-heures et une vidéo d'1 minute toutes les 3 heures. Après installation, les caméras ont été calibrées. La zone de suivi possible a été évaluée grâce à la comparaison de traits de côte bas levés au DGPS sur site et ceux extraits des images acquises par les caméras. La comparaison de ces traits de côte montre qu'il sera possible de suivre la plage de manière fiable sur environ 600 m au sud du port et sur environ 300 m au nord.

En complément des données existantes, les images acquises par les caméras seront utilisées pour extraire des traits de côte bas. Grâce à de nouveaux traitements informatiques à développer, le remplissage de la digue Sud, la barre d'avant-côte au sud du port lorsque celle-ci est proche du littoral et une éventuelle zone d'apport de sédiments depuis la barre au nord du port pourront être suivis.

Un protocole de suivi et d'analyse est proposé, s'appuyant sur le suivi haute fréquence par vidéo, mais également sur des données satellitaires, bathymétriques et topographiques. Son objectif vise à obtenir des informations complètes sur les transits sédimentaires autour du port de Taverna, et d'analyser en particulier l'état des transits entre la côte Sud et la côte Nord.

Le dispositif installé offre également la possibilité d'obtenir des informations quantitatives ou qualitatives sur d'autres indicateurs : le jet de rive (notamment post-tempête), évolution de la surface de dépôt de feuilles de posidonies et de la végétation de haut de plage.

¹ Cette perturbation du transport sédimentaire au niveau du port de Taverna a été décrite par BALOUIN ET AL., 2012 - BRGM/RP-61650-FR.

Sommaire

1. Contexte de l'étude	9
1.1. PROBLÉMATIQUE	9
1.2. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE	12
1.2.1. La Plaine orientale de la Corse, côte sableuse basse sensible à l'érosion	12
1.2.2. Contexte météorologique et hydrodynamique	13
1.2.3. Contexte géomorphologique du port de Taverna	15
1.3. INTERET D'UN SUIVI DU TRAIT DE COTE PAR CAMÉRA.....	18
1.3.1. Utilisations possible de ce type de système	19
2. Installation du materiel sur site	21
2.1. CHOIX DES IMPLANTATIONS.....	21
2.2. MATERIEL UTILISÉ.....	22
2.2.1. Mâts.....	22
2.2.2. Caméras	22
3. Installation du materiel	25
3.1. INSTALLATION DES MÂTS	25
3.2. INSTALLATION DES CAMÉRAS.....	26
3.3. ZONES SUIVIES PAR LES CAMÉRAS	27
3.3.1. Suivi de la plage Sud	27
3.3.2. Suivi de la plage Nord.....	28
4. Calibration externe des cameras.....	31
4.1. MÉTHODE DE RECONSTRUCTION DE LA GÉOMÉTRIE PAR GÉORECTIFICATION.....	31
4.2. CALIBRATION DES CAMERAS DU SITE DE TAVERNA.....	32
4.3. MÉTHODE DE RECONSTRUCTION DE LA GÉOMÉTRIE SUR IMAGE OBLIQUE	34
4.4. EVALUATION DE L'ERREUR ASSOCIÉE À LA GÉOMÉTRIE RECONSTRUITE	34
4.4.1. Caméra BRGM 302 (trait de côte Nord)	34
4.4.2. Caméra BRGM 301 (trait de côte Sud)	36
5. Exploitation envisageable des données	37
5.1. ZONES EXPLOITABLES	37

5.2. MARQUEURS GÉOMORPHOLOGIQUES À EXTRAIRE	39
5.2.1. Données et intérêt pour comprendre le transit sédimentaire au droit du port de Taverna	39
6. Conclusion.....	43
7. Bibliographie	45

Liste des figures

Figure 1 : Blocage sédimentaire lié à l’implantation d’un ouvrage transversal (épi, jetée)– modifié d’après PASKOFF, 2010.	9
Figure 2 : Comparaison de la photographie IGN 2017 et celle de 1950 (remonter le temps.ign.fr). Le port de Taverna est signalé par le rectangle sur l’image de droite.	10
Figure 3 : Principe du système de by-pass.	10
Figure 4 : Données de terrain : données acquises en 2020 dans le cadre du ROL sur le site de « Campoloro » (ces données sont acquises chaque année) et données bathymétriques acquises au printemps 2020 dans le cadre de MAREGOT.	11
Figure 5 : Localisation du port de Taverna et d’Alistro.	12
Figure 6 : Vulnérabilité des installations touristiques sur la plage suite à un évènement érosif important lors d’une tempête en octobre 2007 le long de la Plaine orientale (Aléria, 30 octobre 2007, Photographie BRGM/ROL 1, extraite de STEPANIAN ET AL., 2011).	13
Figure 7 : Rose des houles mesurées à Alistro (CANDHIS) entre le 1 ^{er} novembre 2013 et le 31 décembre 2019.	13
Figure 8 : Chronique des tempêtes enregistrées à Alistro entre novembre 2013 et décembre 2019.	14
Figure 9 : Cellules hydrosédimentaires de la Plaine orientale corse (STEPANIAN ET AL., 2012 – BRGM /RP-59058-FR). Le port de Taverna est ici nommé « port Campoloro ».	15
Figure 10 : Déplacement du trait de côte bas au nord du port de Taverna entre 2017 et 2018.	16
Figure 11 : Déplacement du trait de côte bas au sud du port de Taverna entre 2017 et 2018.	17
Figure 12 : Taux d’évolution annuels (en m) calculés sur la période 1937-2019 et révisé à dire d’expert dans le cadre de la Convention de recherche et développement entre le BRGM et la DDTM2B relative à l’estimation de l’évolution potentielle du trait de côte aux horizons 2040 et 2100 sur la Plaine orientale (Haute Corse, Paquier & Mugica, en cours).	18
Figure 13 : Utilisations possibles des systèmes de suivi du trait de côte par caméras.	19
Figure 14 : Localisation des mâts sur les digues Nord et Sud du port de Taverna (points rouge).	21
Figure 15 : Plan technique des mâts utilisés pour la mise en place des caméras au port de Taverna.	22
Figure 16 : Système Solarcam 4G.	23
Figure 17 : Perforation de la roche (gauche), injection du scellement chimique (centre) et mise en place des tiges filetées (droite).	25
Figure 18 : Réglage du mât de la digue Nord.	26
Figure 19 : Fixation des caméras sur le mât de la digue Sud.	26
Figure 20 : Mâts Sud (gauche) et Nord (droite) après installation des caméras.	27

Figure 21 : Emprise photographique de la caméra BRGM 301 utilisée pour le suivi du trait de côte au sud du port de Taverna.	28
Figure 22 : Emprise photographique de la caméra BRGM 302 utilisée pour le suivi du trait de côte au nord du port de Taverna.	28
Figure 23 : Schéma explicatif du principe de géorectification photogrammétrique d'après Holland et al., 1997. Moisan et al., 2019 - BRGM/RP-69416-FR.....	32
Figure 24 : Photo prise avec la Solarcam BRGM 301 pour la géorectification des images, plage Sud.	33
Figure 25 : Localisation des caméras et des points de contrôle DGPS sur les plages Nord (gauche) et Sud (droite). Fond : IGN, 2016.	33
Figure 26 : Projection des coordonnées en pixel et des coordonnées calculées sur une image de Solarcam (gauche) et sur une image redressée (droite) pour la caméra BRGM 302 installée sur la digue Nord.	34
Figure 27 : Valeurs extrêmes, médiane et moyenne de déviation des coordonnées en pixel (gauche) et en mètre (droite) pour la caméra BRGM 302 installée sur la digue Nord.	35
Figure 28 : Taille des pixels en fonction de la distance à la caméra pour la caméra BRGM 302, digue Nord.	35
Figure 29 : Valeurs extrêmes, médiane et moyenne de déviation des coordonnées en pixel (gauche) et en mètre (droite) pour la caméra BRGM 301 installée sur la digue Nord.	36
Figure 30 : Zones exploitables des images Solarcam. Les rectangles verts représentent l'étendue des zones dans lesquelles les traits de côte mesurés in-situ et extraits des images Solarcam sont concordants.	38
Figure 31 : Protocole envisagé pour l'utilisation des images Solarcam pour la compréhension du transit sédimentaire autour du port de Taverna.	40

1. Contexte de l'étude

1.1. PROBLÉMATIQUE

Les mouvements sableux le long des côtes sont dus à divers phénomènes : impacts des tempêtes, érosion chronique liée au déficit sédimentaire ou à l'interruption de la dérive littorale² sableuse, qu'elle soit naturelle (aux embouchures par exemple) ou anthropique (incidence d'ouvrages de défenses, de jetées portuaires).

L'interruption de la dérive est un mécanisme bien connu qui génère des accumulations de sédiments en amont du transit et un déficit d'apport sédimentaire et des phénomènes d'érosion en aval-transit (Figure 1).

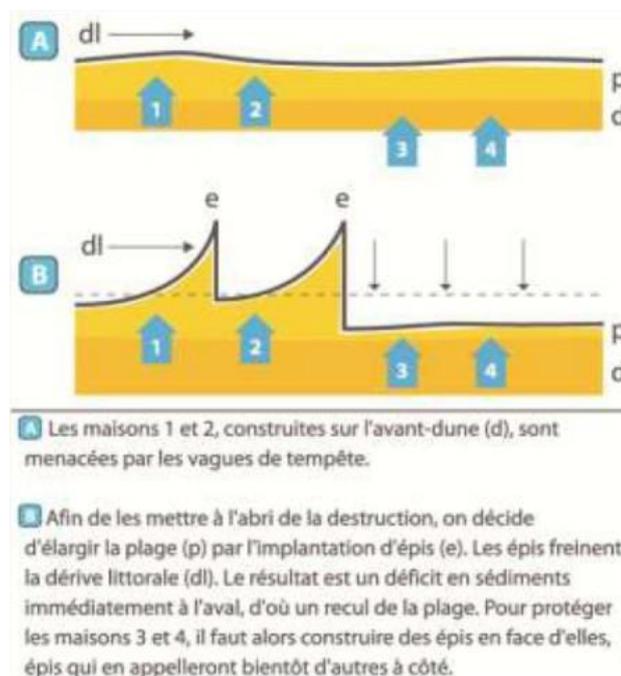


Figure 1 : Blocage sédimentaire lié à l'implantation d'un ouvrage transversal (épi, jetée) – modifié d'après PASKOFF, 2010.

Le site de « Campoloro » (port de Taverna) est exposé à une forte problématique d'érosion au nord qui résulte potentiellement d'interactions entre des processus naturels et anthropiques. La présence du port de Taverna perturbant la dérive littorale joue vraisemblablement un rôle prépondérant dans les évolutions observées sans toutefois que ces effets aient pu être quantifiés faute d'observations à haute fréquence (Figure 2).

² La dérive littorale est le transport longitudinal sableux le long des côtes sous l'effet de vagues obliques dominantes.

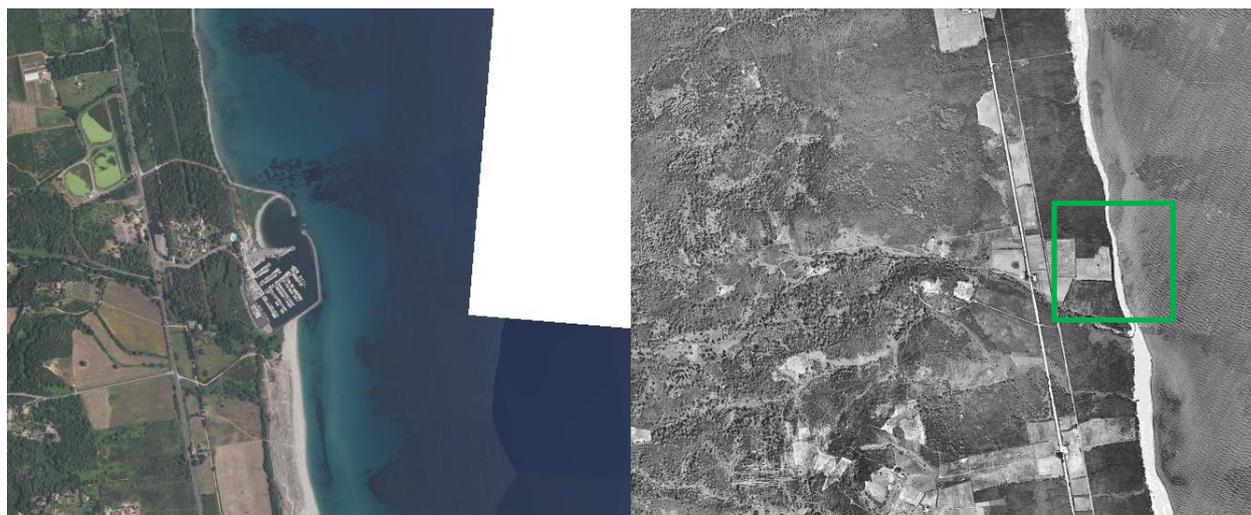


Figure 2 : Comparaison de la photographie IGN 2017 et celle de 1950 (remonter le temps.ign.fr). Le port de Taverna est signalé par le rectangle sur l'image de droite.

Dans certaines situations, l'accumulation au sud du port remplit quasiment la digue Sud et un contournement (dit by-pass sédimentaire, Figure 3) semble possible. Dans d'autres situations, la digue n'est que partiellement pleine et ce by-pass est soit inexistant, soit s'effectue plus au large au niveau des barres d'avant-côte.

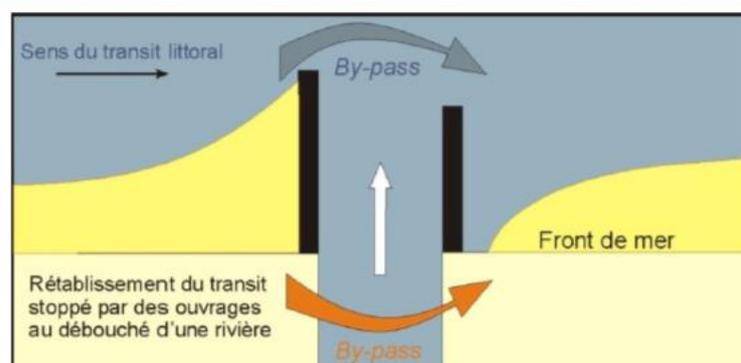


Figure 3 : Principe du système de by-pass.

La méconnaissance de ces phénomènes et de leurs causes implique la nécessité d'estimer les transits sédimentaires afin d'envisager d'éventuelles solutions de gestion de cette problématique d'érosion. Dans le cadre du Réseau d'Observation du Littoral de Corse (ROL), des suivis annuels de traits de côte et de transects au nord et au sud du port sont assurés (mesures DGPS et sondeur monofaisceau) afin de connaître les tendances d'évolution sur le long terme (Figure 4, Mugica & Koechler, 2019 - BRGM/RP-69318-FR). C'est pourquoi, en complément de ces mesures, il a été prévu d'installer un **système de caméras** afin d'obtenir des **images à haute fréquence temporelle sur plusieurs centaines de mètres** du littoral adjacent au port de Taverna, au nord et au sud. L'objectif d'un tel système est d'apporter des connaissances sur l'évolution et la migration des barres sous-marines notamment dont les dimensions, la morphologie et la localisation présentent une grande **variabilité à l'échelle saisonnière, voire évènementielle** (tempête, forte agitation météo-marine). En complément de données topo-

bathymétriques acquises dans le cadre du projet MAREGOT³ (MNT)), du ROL (position des traits de côte et profils ainsi que de données satellitaires haute fréquence (un passage tous les 5 jours pour Sentinel 2B par exemple), le suivi camera ainsi mis en place permettra l'estimation des transits sédimentaires et l'amélioration de la connaissance des processus naturels et anthropiques impliqués.

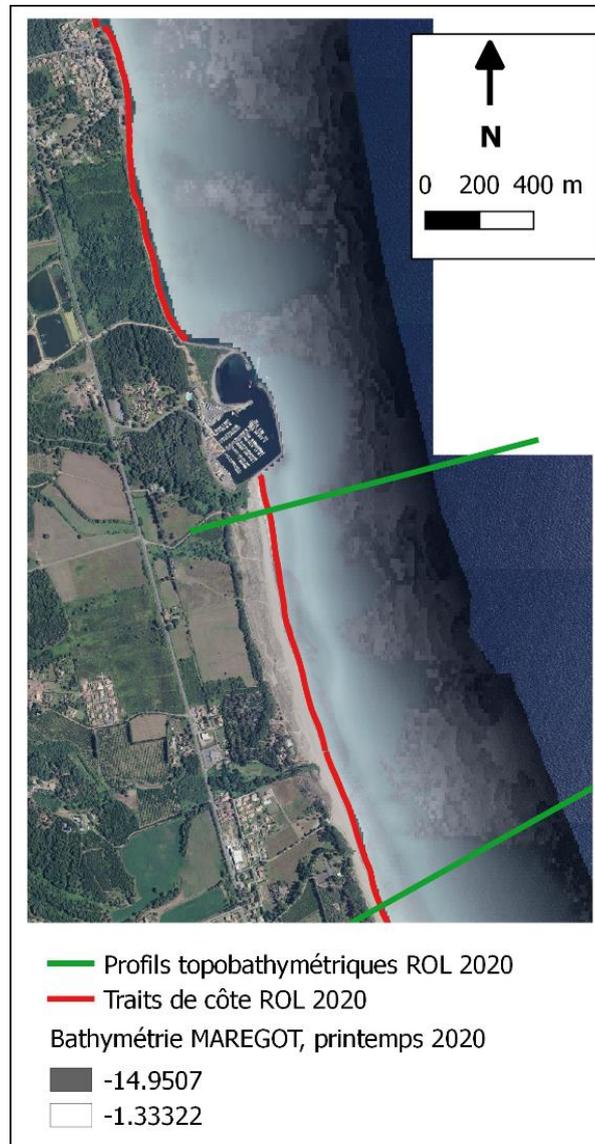


Figure 4 : Données de terrain : données acquises en 2020 dans le cadre du ROL sur le site de « Campoloro » (ces données sont acquises chaque année) et données bathymétriques acquises au printemps 2020 dans le cadre de MAREGOT.

³ projet Interreg 2017-2020 du programme Marittimo

1.2. PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE

Le port de Taverna se situe sur le littoral de la commune de Santa-Maria-Poggio, sur la Plaine orientale corse (Figure 5).



Figure 5 : Localisation du port de Taverna et d'Alistro.

1.2.1. La Plaine orientale de la Corse, côte sableuse basse sensible à l'érosion

Le littoral de la Plaine orientale de la Corse est un linéaire côtier d'une centaine de kilomètres de long qui s'étend de Bastia (Haute-Corse) à Solenzara (Corse-du-Sud). À l'exception de quelques affleurements rocheux, au niveau de caps, il est largement constitué de plages sableuses, avec des massifs dunaires faiblement développés, et étangs et lagunes littorales reliés à la mer par des graus, à l'embouchure desquels peuvent se développer des flèches sableuses. Comme toute côte basse sableuse, la Plaine orientale est soumise à un large spectre de forçages naturels (vagues, vents, courants) qui perturbent son équilibre mais également aux actions anthropiques (aménagements, constructions extraction...) qui peuvent le fragiliser davantage et conduire à sa dégradation chronique.

La Plaine orientale de Corse est de fait un espace naturel fragile particulièrement vulnérable à l'érosion côtière (Figure 6).



Figure 6 : Vulnérabilité des installations touristiques sur la plage suite à un évènement érosif important lors d'une tempête en octobre 2007 le long de la Plaine orientale (Aléria, 30 octobre 2007, Photographie BRGM/ROL 1, extraite de STEPANIAN ET AL., 2011).

1.2.2. Contexte météorologique et hydrodynamique

Conditions hydrodynamiques moyennes

Sur la Plaine orientale, **les vents** sont assez irréguliers. Les vents de secteur Ouest (U Libeccio) sont cependant dominants toute l'année, mais leur influence est limitée sur le littoral Ouest, à l'abri des fortes houles. En revanche, les vents de secteur Est (U Grecale, U Levante, le Sirocco) sont moins fréquents, mais ont une influence directe sur le littoral, en particulier lors des épisodes tempétueux. Ce sont de plus ces vents d'Est qui contribuent actuellement à l'alimentation des cordons dunaires depuis la plage. Ils vont également générer des vagues de vent, voir des houles transversales (Figure 7 et Figure 8).

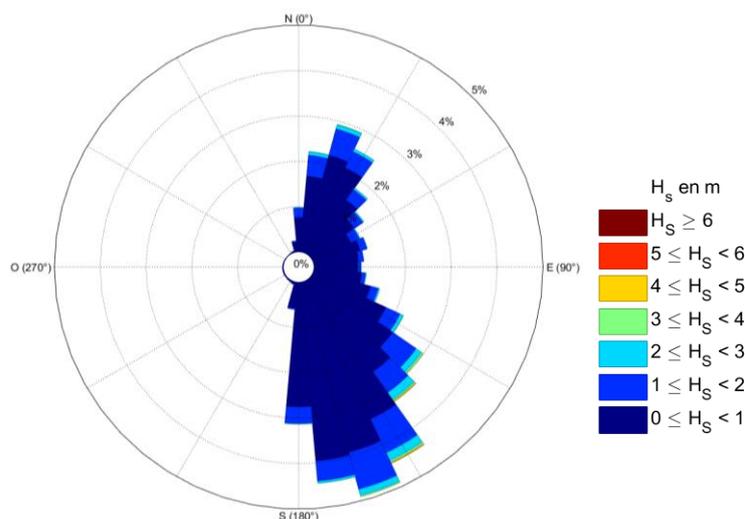


Figure 7 : Rose des houles mesurées à Alistro (CANDHIS) entre le 1^{er} novembre 2013 et le 31 décembre 2019.

Les données de **vagues** de la bouée CANDHIS située à Alistro (Figure 5) permettent d'approcher les conditions de houle qui se propagent sur la Plaine orientale. Les houles dominantes dépassent rarement les 3 m ($2.5 < \text{période} < 9.1\text{s}$) et se propagent sur l'axe nord-sud. Les vagues ayant ici un impact sur le littoral proviendront du sud-sud-est et du nord-nord-est (Figure 7). La dérive littorale dominante générée par ces forçages se propage du sud vers le nord. Des épisodes d'inversion du sens de la dérive sont toutefois assez fréquents (BALOUIN *ET AL.*, 2012).

Conditions hydrodynamiques extrêmes

- Vagues de tempêtes

Pour la période récente (2013-2019) l'identification des tempêtes a été réalisée à partir des données de houles enregistrées par la bouée Candhis d'Alistro (Figure 8). La sélection des tempêtes repose ici sur deux critères (i) des conditions de vagues supérieures à 2 m (H_s) et (ii) seules les houles en direction de la côte sont concernées (de 180° à 360° N). Les années 2017 et 2019 sont caractérisées par de plus nombreux événements que les autres années. L'événement présentant les vagues les plus hautes a eu lieu le 19 décembre 2016. Malheureusement, aucun suivi d'évolution géomorphologique synchrone à cet événement n'a été réalisé.

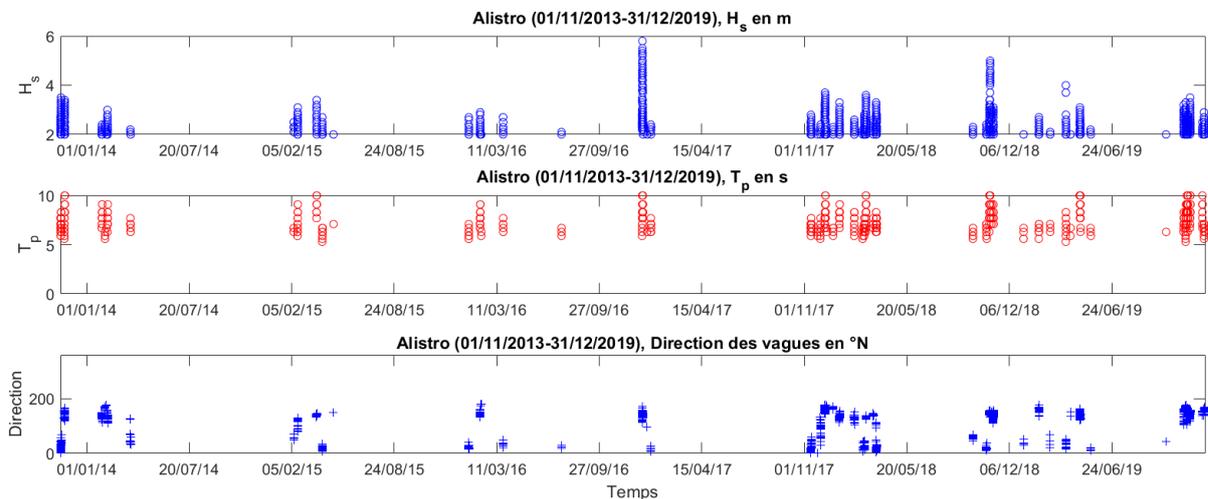


Figure 8 : Chronique des tempêtes enregistrées à Alistro entre novembre 2013 et décembre 2019.

- Le niveau d'eau

La Corse est une zone micro-tidale dont le marnage ne dépasse pas 0,4 m. Lors des tempêtes, la surcote atmosphérique et la surcote liée aux vagues (*wave-setup*) provoquent une élévation du niveau marin local. L'action des vagues dans ce contexte se produira plus haut dans le profil avec des effets morphogéniques importants qui sont alors dominés par une dynamique transversale.

- Les crues des cours d'eau trouvant leurs embouchures sur la Plaine orientale

Les principaux cours d'eaux trouvant leurs embouchures sur la Plaine orientale sont le Bévinco (dans la lagune de Biguglia), le Golo, le Fium'Alto, l'Alésani, la Bravona, l'Aréna (dans la lagune de Diana), le Tavignano, le Travo, et la Solenzara. Ces cours d'eau ont des bassins versants de tailles variables, constitués de lithologies variées et plus ou moins occupés par des zones agricoles, forestières ou anthropisées. Les débits solides et apports sédimentaires à la côte

seront donc différents. Une étude sur la contribution du Golo à l'évolution du littoral adjacent à son embouchure est en cours de réalisation (BILLY *ET AL.*, 2020 - BRGM/RP-69969-FR).

1.2.3. Contexte géomorphologique du port de Taverna

Le port de Taverna marque la limite entre deux cellules hydro-sédimentaires : la cellule « Golo-Campoloro » au nord du port et la cellule Campoloro-Tavignano au sud de celui-ci (STEPANIAN *ET AL.*, 2012 - BRGM/RP-59058-FR, Figure 9).

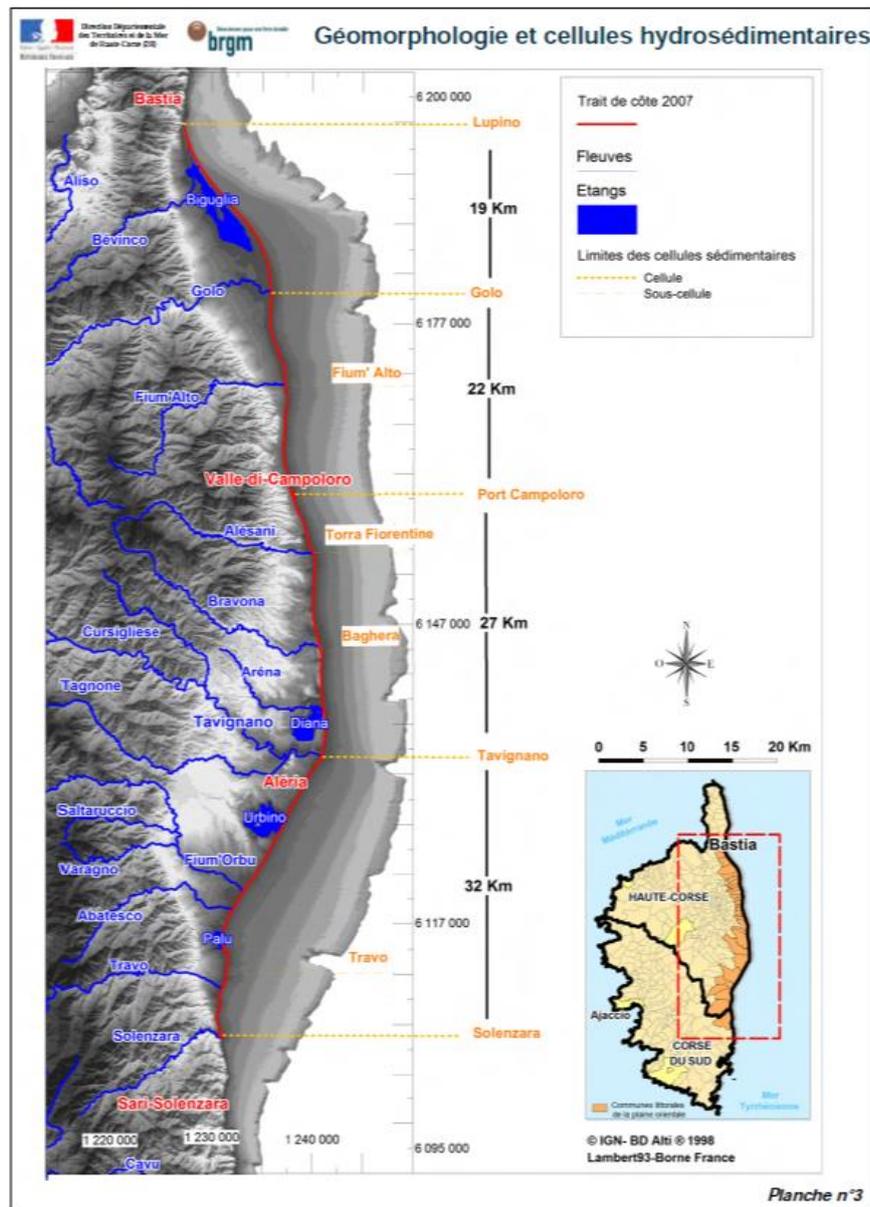


Figure 9 : Cellules hydrosédimentaires de la Plaine orientale corse (STEPANIAN *ET AL.*, 2012 - BRGM/RP-59058-FR). Le port de Taverna est ici nommé « port Campoloro ».

Cellule « Golo-Campoloro »

Cette unité sédimentaire de 22 km s'étend de la rive Sud de l'embouchure du fleuve Golo jusqu'au port de Taverna. Les jetées du port construites dans les années 1970 perturbent le transit sédimentaire naturel majoritairement sud-nord. Le contournement de l'ouvrage par les sédiments est aujourd'hui considéré relativement faible et le port constitue ainsi une limite quasi-imperméable. Cette hypothèse pourrait être remise en question par la présente étude.

Cellule « Campoloro-Tavignano »

La limite au nord est matérialisée par la digue Sud du port de Taverna alors que la limite au sud correspond à l'embouchure du fleuve Tavignano. Tout comme pour le Golo, les débits y sont importants, en particulier lors des périodes de crues. Les apports sédimentaires y sont de fait importants comme le prouve l'édification d'un delta sous-marin, de forme relativement symétrique. Celui-ci génère une réfraction importante des houles incidentes, provoquant très localement une inversion de dérive littorale. On constate principalement cette inversion au nord de l'embouchure au niveau du camping d'Aléria, attestée par la formation d'une flèche sableuse dirigée vers le sud au niveau de l'embouchure du Tavignano.

Suivi géomorphologique du trait de côte

Le port de Taverna marque donc une limite dans le transit sédimentaire transversal le long du littoral de la Plaine orientale Corse. Les suivis réalisés dans le cadre du ROL sont notamment menés sur les sites dit de Campoloro Nord et Sud soit les deux plages situées au nord et au sud du port de Taverna. L'évolution du trait de côte de 2017 à 2018 est présentée sur les Figure 10 et Figure 11.



Figure 10 : Déplacement du trait de côte bas au nord du port de Taverna entre 2017 et 2018.

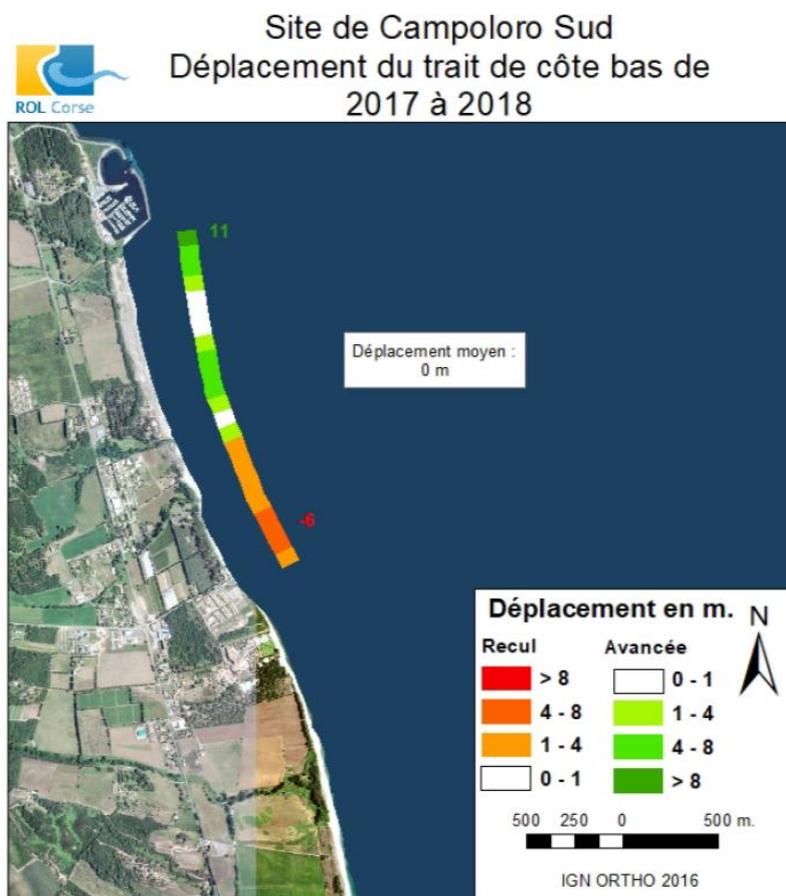


Figure 11 : Déplacement du trait de côte bas au sud du port de Taverna entre 2017 et 2018.

Il apparaît évident que la plage au sud du port est en accumulation (même si le déplacement moyen est nul) tandis que celle située au nord du port est en érosion. Ces données interannuelles ont été confirmées dans le cadre d'une étude à plus long terme qui porte sur l'estimation de l'évolution potentielle du trait de côte aux horizons 2040 et 2100 à l'échelle de la Plaine orientale⁴ (Paquier & Mugica, en cours) Pour évaluer l'évolution potentielle du trait de côte dans le futur, l'évolution passée du trait de côte entre 1937 à 2019 a été estimée à partir d'analyses statistiques basée sur l'outil DSAS d'ArcGIS (Figure 12).

⁴ Convention de recherche et développement entre le BRGM et la DDTM2B relative à l'estimation de l'évolution potentielle du trait de côte aux horizons 2040 et 2100 sur la Plaine orientale (Haute Corse), signée le 24/05/2019.

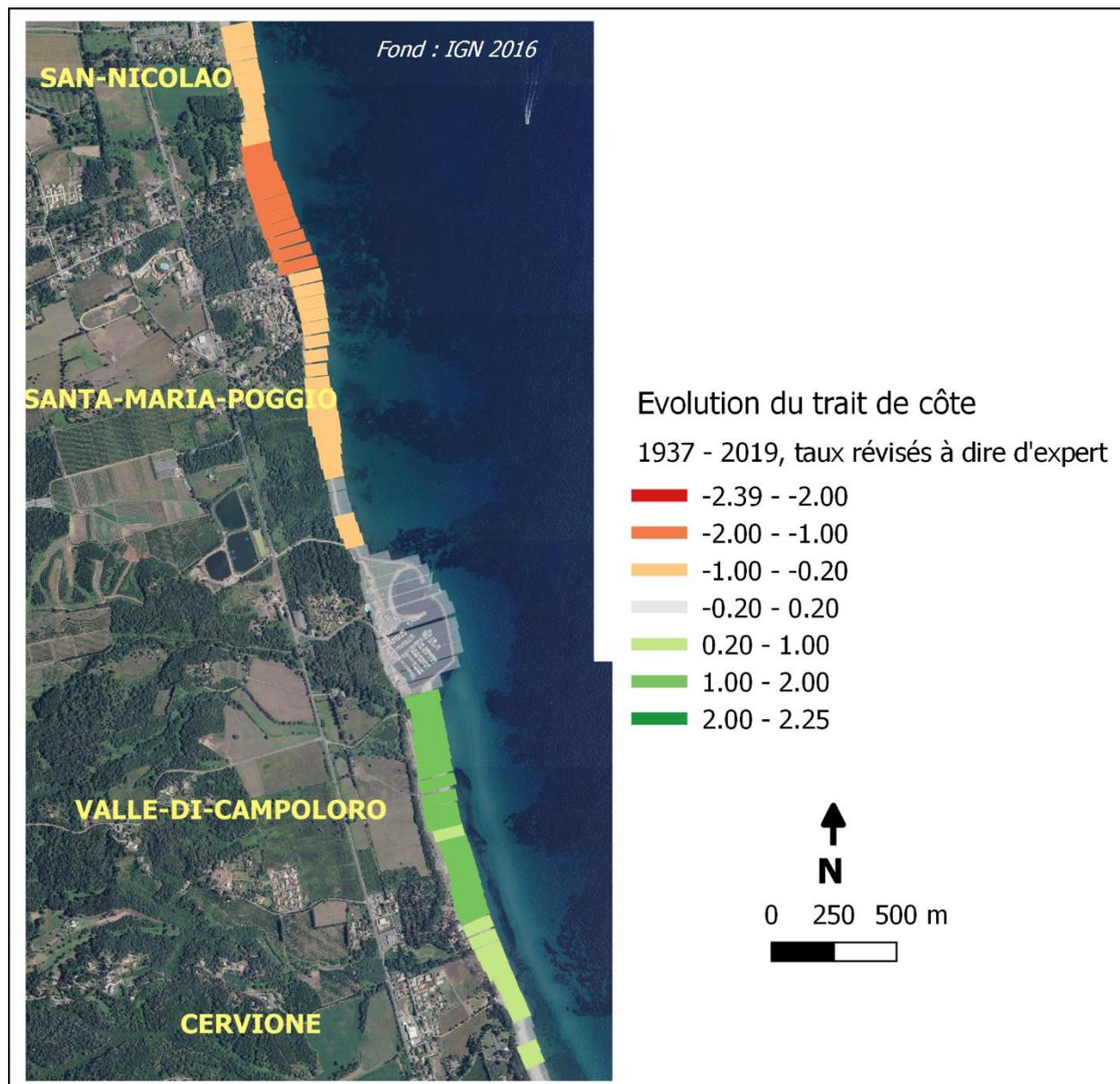


Figure 12 : Taux d'évolution annuels (en m) calculés sur la période 1937-2019 et révisés à dire d'expert dans le cadre de la Convention de recherche et développement entre le BRGM et la DDTM2B relative à l'estimation de l'évolution potentielle du trait de côte aux horizons 2040 et 2100 sur la Plaine orientale (Haute Corse, Paquier & Mugica, en cours).

1.3. INTÉRÊT D'UN SUIVI DU TRAIT DE CÔTE PAR CAMÉRA

Le port de Taverna est aujourd'hui une limite dans le transit sédimentaire naturel du littoral de la Plaine orientale. Fait-il barrage total au transport sédimentaire ou une partie du sédiment accumulé contre la digue Sud peut-il rejoindre la plage au nord du port ? Dans le cadre d'un partenariat avec l'Office de l'Environnement de la Corse, le BRGM a mis en place des caméras de suivi du trait de côte. En effet, l'imagerie vidéo est particulièrement adaptée au suivi du littoral (HOLLAND *ET AL.* 1997, ALMAR 2009, HOLMAN *ET AL.*, 1993).

1.3.1. Utilisations possible de ce type de système

Les systèmes de caméra installés à Taverna permettent de suivre de nombreux éléments des systèmes côtiers. La Figure 13 en fait un résumé pour les environnements micro-tidaux. Ceux-ci portent à la fois sur des éléments morphologiques et hydrodynamiques.

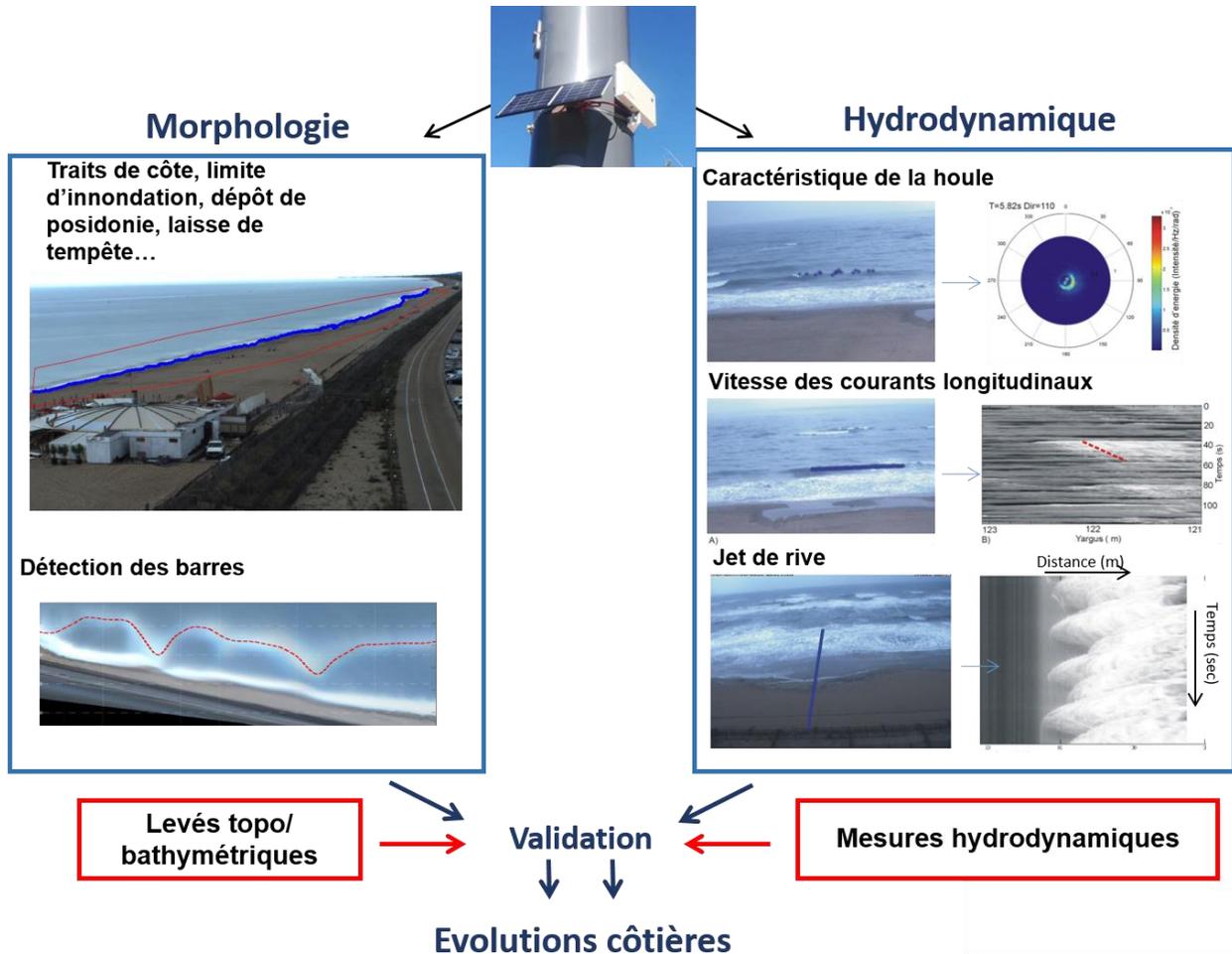


Figure 13 : Utilisations possibles des systèmes de suivi du trait de côte par caméras.

Certains d'entre eux pourront s'avérer intéressants dans le cadre du suivi visant à évaluer le transit sédimentaire autour du port de Taverna. En effet, il s'agit de (i) suivre le trait de côte (ii) d'établir si les sédiments accumulés au sud du port contre la digue Sud pourront transiter vers le nord en contournant le port et (iii) d'évaluer si la barre d'avant côte passe au large du port et ramène potentiellement du sédiment dans le compartiment plage au nord de celui-ci. Les données de morphologie telles que le suivi de trait de côte et de la barre d'avant-côte sont particulièrement utiles.

Grâce à ces outils, il sera possible de suivre la dynamique morphologique sud et nord en parallèle. Ce rapport a pour objectif de présenter cette installation et les utilisations qui pourront en être faites.

2. Installation du matériel sur site

2.1. CHOIX DES IMPLANTATIONS

Une concertation préalable avec les autorités portuaires a été menée afin de valider le choix des implantations des caméras.

Ce dernier a été réalisé de telle sorte que les caméras puissent capturer des images du trait de côte de façon directe tout en n'entravant pas l'utilisation des infrastructures portuaires. L'utilisation des infrastructures déjà présente sur le port comme support des caméras a dû être écartée à cause de la présence d'arbres gênant la prise de vue. Il a donc été décidé d'installer des mâts sur les digues Sud et Nord (Figure 14).

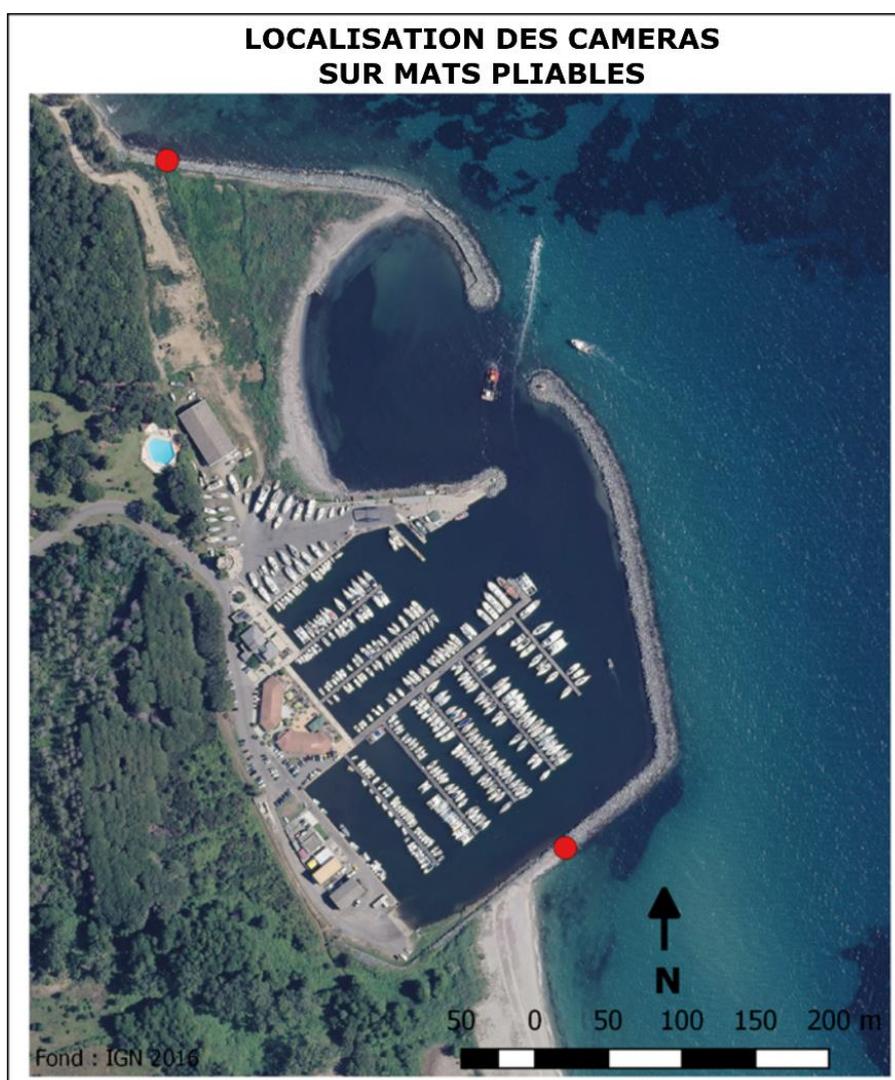


Figure 14 : Localisation des mâts sur les digues Nord et Sud du port de Taverna (points rouge).

2.2. MATÉRIEL UTILISÉ

2.2.1. Mâts

Les mâts choisis pour ce déploiement sont de marque Deschamps VIDEO150 de 6 m de haut. Ce sont des mâts en fibre de verre prévus pour l'installation de système de vidéosurveillance. Ils ont l'avantage d'être équipés d'une charnière en pied de mât qui permet de les mettre à terre simplement pour la mise en place et l'entretien du matériel de prise de vue (Figure 15). Ils sont également équipés d'une trappe d'accès généralement utilisée pour le passage de câbles.

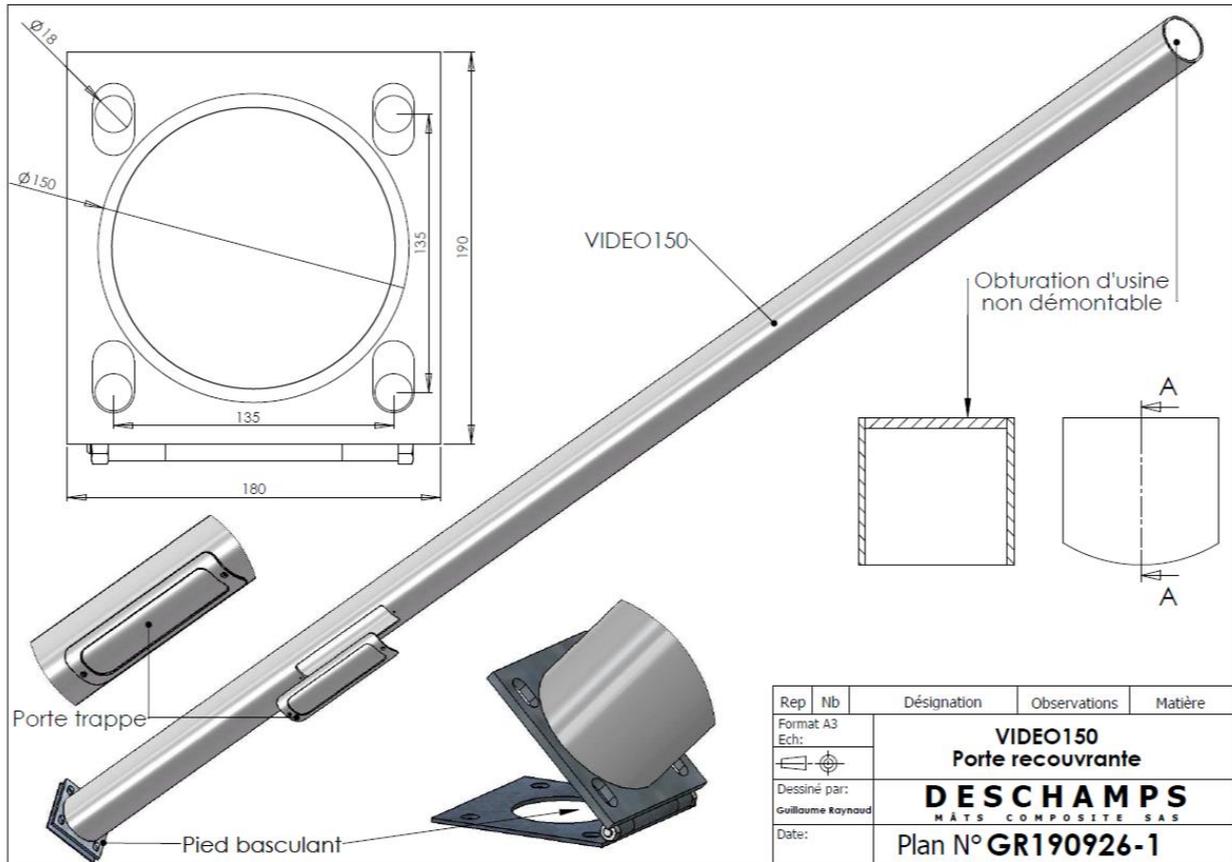


Figure 15 : Plan technique des mâts utilisés pour la mise en place des caméras au port de Taverna.

2.2.2. Caméras

Les caméras utilisées ici sont des Solarcam 4G. Ces systèmes ont déjà été utilisés à de nombreuses reprises dans des projets similaires par le BRGM (BELON, 2017 - BRGM/RP-67632 –FR). Ces caméras « timelapse » autonomes à bas coût permettent de prendre des images fixes et des vidéos plusieurs fois par jours. Ce dispositif se compose d'un boîtier étanche contenant un smartphone alimenté par panneau solaire. Le système est ainsi complètement autonome.

Ces appareils permettent l'acquisition d'images à une fréquence modulable (plus haute fréquence 1 min) et des vidéos courtes (jusqu'à 10 min d'enregistrement).

La qualité des images est modulable à distance et peut varier entre 0,7 et 12 Mégapixels (Mp). Le réglage des appareils doit être optimisé pour obtenir une qualité/fréquence optimale tout en respectant le potentiel de recharge de la batterie.



Figure 16 : Système Solarcam 4G.

3. Installation du matériel

3.1. INSTALLATION DES MÂTS

L'installation des mâts a été effectuée par le BRGM avec l'appui d'un sous-traitant spécialisé (Homan Cheikhrvat).

En concertation avec l'exploitation portuaire, une solution a été trouvée afin de ne pas mettre en place de fondation rapportée, notamment par la réalisation d'une dalle de béton (difficile à réaliser sur une digue avec un impact sur l'environnement visuel), tout en conservant la stabilité optimale des mâts. Les 4 points de fixation des mâts sont donc fixés directement dans des blocs rocheux au sommet des digues grâce à des scellements chimiques haute résistance (notamment aux conditions marines) en résine vinylester (effort résistant à l'arrachement jusqu'à 50 kN par points). Des solutions de fixations des caméras clés en main ont également été mises en œuvre. Par ailleurs, les trappes de passage de câbles (non utilisées ici puisque les caméras sont indépendantes énergétiquement) seront exploitées pour stocker le matériel de déploiement (clés de serrage, pied de réception du mât en cours de conception par l'installateur, petit outillage pour les caméras).

La mise en place des mâts a eu lieu le 31 octobre 2020.

Après avoir percé les blocs choisis pour leurs caractéristiques techniques (poids, surface disponible, présence d'un plan proche de l'horizontal, positionnement sur la digue par rapport au trait de côte), le produit de scellement est injecté et les tiges filetées sont insérées pour scellement dans la roche (Figure 17).



Figure 17 : Perforation de la roche (gauche), injection du scellement chimique (centre) et mise en place des tiges filetées (droite).

Après séchage, les mâts sont mis en place, dressés et réglés en place (Figure 18). Après déploiement des caméras, une nouvelle visite le 2 novembre 2020 a eu lieu pour régler de nouveau les mâts.



Figure 18 : Réglage du mât de la digue Nord.

3.2. INSTALLATION DES CAMÉRAS

Les caméras ont été installées le 4 novembre 2020 par le BRGM. Les mâts ont été abaissés et les caméras ont été installées grâce au éléments prévus à cette effet (Figure 19). Les panneaux solaires sont orientés vers le sud alors que les caméras sont orientées vers le trait de côte à suivre.



Figure 19 : Fixation des caméras sur le mât de la digue Sud.

Les mâts ont ensuite été redressées puis contrôlés le 5 novembre 2020 (Figure 20).



Figure 20 : Mâts Sud (gauche) et Nord (droite) après installation des caméras.

3.3. ZONES SUIVIES PAR LES CAMÉRAS

La caméra, de référence BRGM 301, est installée sur le mât de la digue Sud et acquiert des images de la plage au sud du port tandis que la caméra, de référence BRGM 302, est installée sur la digue Nord et acquiert des images de la plage située au nord du port. Chacune suit une zone d'une étendue différente tel que présenté dans les paragraphes suivants

3.3.1. Suivi de la plage Sud

Ce suivi se fait par la caméra BRGM 301, installée sur la digue Sud du port de Taverna. Elle est configurée pour acquérir 1 image toutes les 30 minutes de 7 h à 18 h, chaque jour de la semaine. Les images acquises ont une dimension de 4 032 x 3 016 pixels. Les photos acquises couvrent la plage jusqu'au secteur de Prunete situé à 1,4 km au sud de la zone (Figure 21).

Toutes les 6 images, soit toutes les 3 heures, une vidéo d'1 minute est également acquise.



Figure 21 : Emprise photographique de la caméra BRGM 301 utilisée pour le suivi du trait de côte au sud du port de Taverna.

3.3.2. Suivi de la plage Nord

Ce suivi se fait par la caméra BRGM 302, installée sur la digue Nord du port de Taverna. Elle est configurée de la même manière que la caméra BRGM 301 (1 photo prise toutes les 30 min de 7 h à 18 h et une vidéo d'1 min toutes les 3 heures). Les images acquises ont une dimension de 4 032 x 3 016 pixels. Les photos acquises couvrent la plage jusqu'au mur de pelotte basque, à 1,4 km au nord de la zone. Toutefois, des zones aveugles sont présentes du fait de la présence de la végétation, de la variation du linéaire et de la faible largeur de plage (Figure 22).



Figure 22 : Emprise photographique de la caméra BRGM 302 utilisée pour le suivi du trait de côte au nord du port de Taverna.

Les caméras transmettent presque instantanément les données acquises au site dédié du BRGM (<https://brgm-suivi-littoral.fr/>). Elles sont également stockées 30 jours sur le serveur de SolarCam. Ces images ne sont pas disponibles pour le grand public et sont exploitées en interne à des seules fins d'étude de l'évolution géomorphologique de la côte.

4. Calibration externe des caméras

Afin de réaliser des observations quantitatives à partir des images obliques du réseau de suivi, différents algorithmes de traitement ont été développés par le BRGM. Ces traitements visent, entre-autres, à la géorectification de ces images et à la détection du trait de côte.

Dès l'installation, les caméras acquièrent des images visualisables sur le site <https://brgm-suivi-littoral.fr/>. Ces images, afin d'être exploitées, doivent pouvoir être géorectifiées. Il s'agit de convertir les données pixels de l'image en distances réelles, donc de corriger l'effet de perspective occasionné par l'obliquité des prises de vue, d'attribuer à chaque pixel des coordonnées géographiques en RGF 93 et de redresser les images afin qu'elles apparaissent comme vues du ciel. On réalise donc la calibration externe des caméras.

4.1. MÉTHODE DE RECONSTRUCTION DE LA GÉOMÉTRIE PAR GÉORECTIFICATION

Les coordonnées réelles (X,Y,Z) et images (u,v) correspondant à la position du pixel sur l'image sont utilisées pour résoudre les équations colinéaires (1), (2), (3) et (4).

$$X = (Z - Zc)u + Xc \quad (1)$$

$$Y = (Z - Zc)v + Yc \quad (2)$$

Où

$$u = \frac{m_{11x} + m_{21y} - m_{31x}Df}{m_{13x} + m_{23x} - m_{33x}Df} \quad (3)$$

Et

$$v = \frac{m_{12x} + m_{22y} - m_{32x}Df}{m_{13x} + m_{23x} - m_{33x}Df} \quad (4)$$

Les coefficients m_{ij} sont les éléments de la matrice de rotation M (5) et correspondent aux rotations d'inclinaison (α), horizontale (τ) et d'azimut (σ).

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\tau) & -\sin(\tau) \\ 0 & \sin(\tau) & \cos(\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos(\sigma) & -\sin(\sigma) & 0 \\ -\sin(\sigma) & \cos(\sigma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Cette technique est largement décrite dans la littérature (BAILEY AND SHAN, 1996 ; HOLLAND ET AL. 1997 ; ALMAR, 2009 ; VALENTINI ET BALOUIN, 2020).

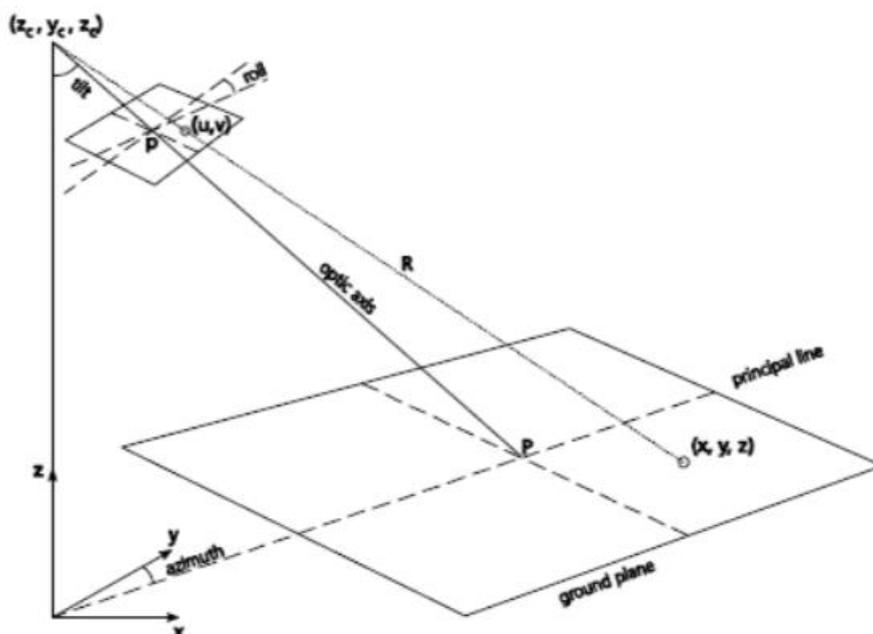


Figure 23 : Schéma explicatif du principe de géorectification photogrammétrique d'après Holland et al., 1997. Moisan et al., 2019 - BRGM/RP-69416-FR.

4.2. CALIBRATION DES CAMÉRAS DU SITE DE TAVERNA

Afin de réaliser la géorectification des images, des points DGPS (précision centimétrique) ont été acquis (Figure 24). Ces points sont marqués physiquement sur la plage puis pris en photo avec la Solarcam. Ici, un cône de chantier a été utilisé. Ainsi, en post traitement, un couple de coordonnées est attribué au pixel correspondant au marquage physique. C'est sur le pixel correspondant au pied du cône (endroit où la mesure est réalisée) que le couple de coordonnées mesuré sera attribué. Ce processus sera répété pour chaque point. Par interpolation, il sera possible d'attribuer à chaque pixel un couple de coordonnées GPS. Une grille de couples de coordonnées de 4 032 x 3 016 sera ainsi générée et reportée sur chaque image capturée.

Dans ce cadre, 12 points de calibration DGPS ont été acquis sur la plage au sud et 11 sur la plage au nord (Figure 25).

Dans le cas où la caméra bougerait de façon définitive, il sera nécessaire de faire un calcul de changement de géométrie (décalage de la grille de coordonnées) et de refaire les mesures sur sites. Toutefois, les faibles mouvements temporaires liés au vent soufflant sur la caméra peuvent être en partie corrigés et ne nécessitent pas d'intervention sur site.

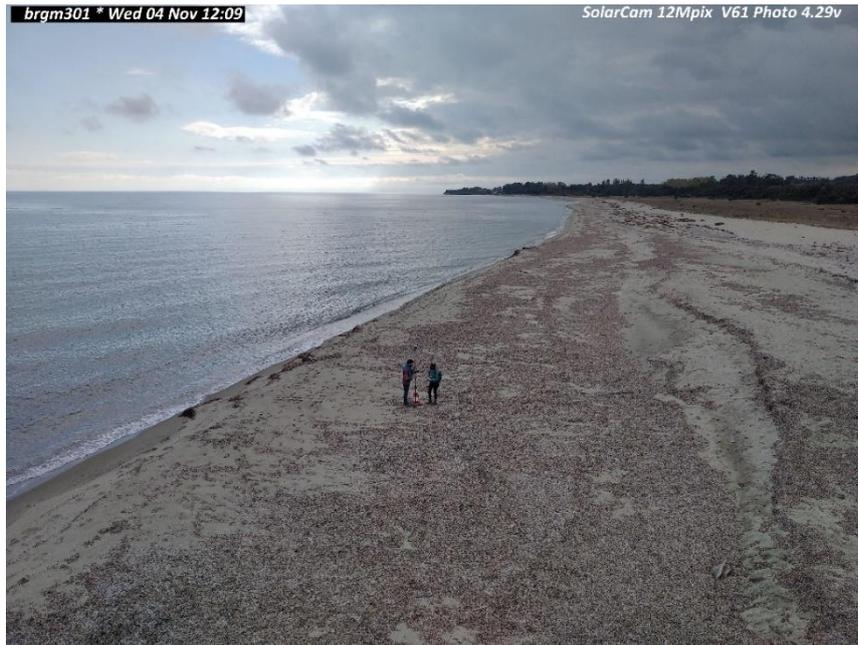


Figure 24 : Photo prise avec la Solarcam BRGM 301 pour la géorectification des images, plage Sud.

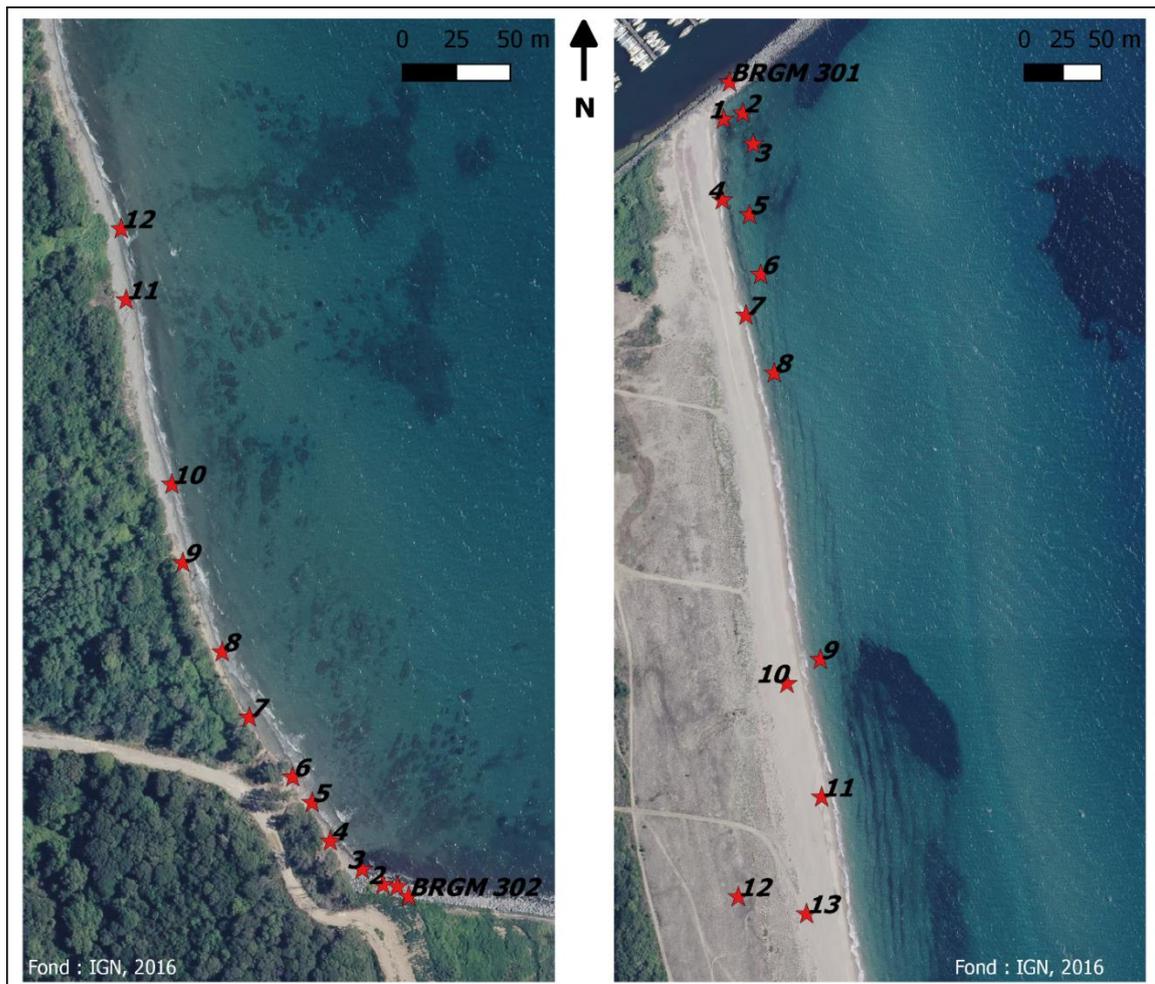


Figure 25 : Localisation des caméras et des points de contrôle DGPS sur les plages Nord (gauche) et Sud (droite). Fond : IGN, 2016.

4.3. MÉTHODE DE RECONSTRUCTION DE LA GÉOMÉTRIE SUR IMAGE OBLIQUE

Il est également possible de travailler directement sur les images obliques. Il s'agit alors de convertir les données pixels de l'image en distances réelles et d'attribuer à chaque pixel des coordonnées géographiques en RGF 93 sans redresser l'image.

Le choix de la méthode de reconstruction de la géométrie se fait en fonction de la qualité des résultats obtenus.

4.4. ÉVALUATION DE L'ERREUR ASSOCIÉE À LA GÉOMÉTRIE RECONSTRUITE

4.4.1. Caméra BRGM 302 (trait de côte Nord)

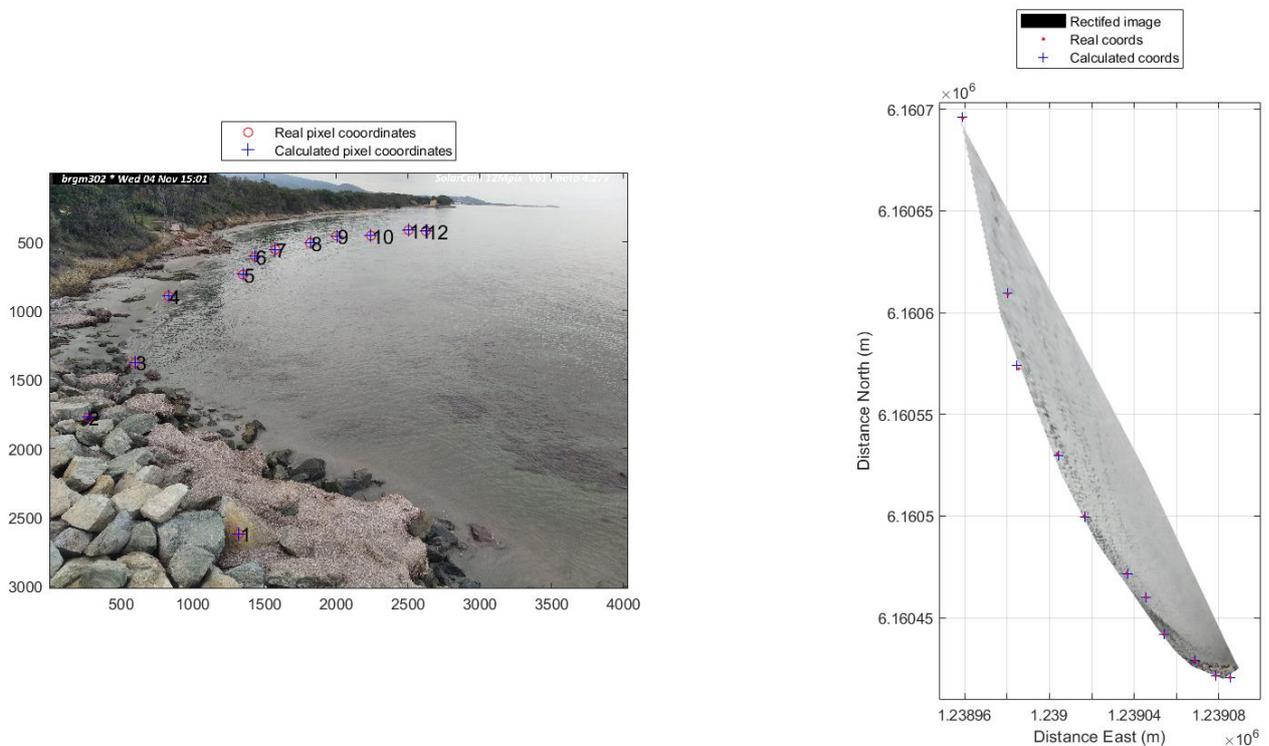


Figure 26 : Projection des coordonnées en pixel et des coordonnées calculées sur une image de Solarcam (gauche) et sur une image redressée (droite) pour la caméra BRGM 302 installée sur la digue Nord.

La qualité du redressement peut être vérifiée facilement grâce aux outils développés par le BRGM. Sur la Figure 26 les coordonnées réelles (coordonnées de chaque pixel sur la grille 4 032 x 3 016) peuvent être comparées avec les coordonnées recalculées (coordonnées en RGF 93 pour chaque pixel). Les coordonnées recalculées tendent à s'éloigner légèrement des coordonnées réelles en s'éloignant de la caméra. Les écarts restent tout de même faibles (maximum 1,9 m, Figure 27).

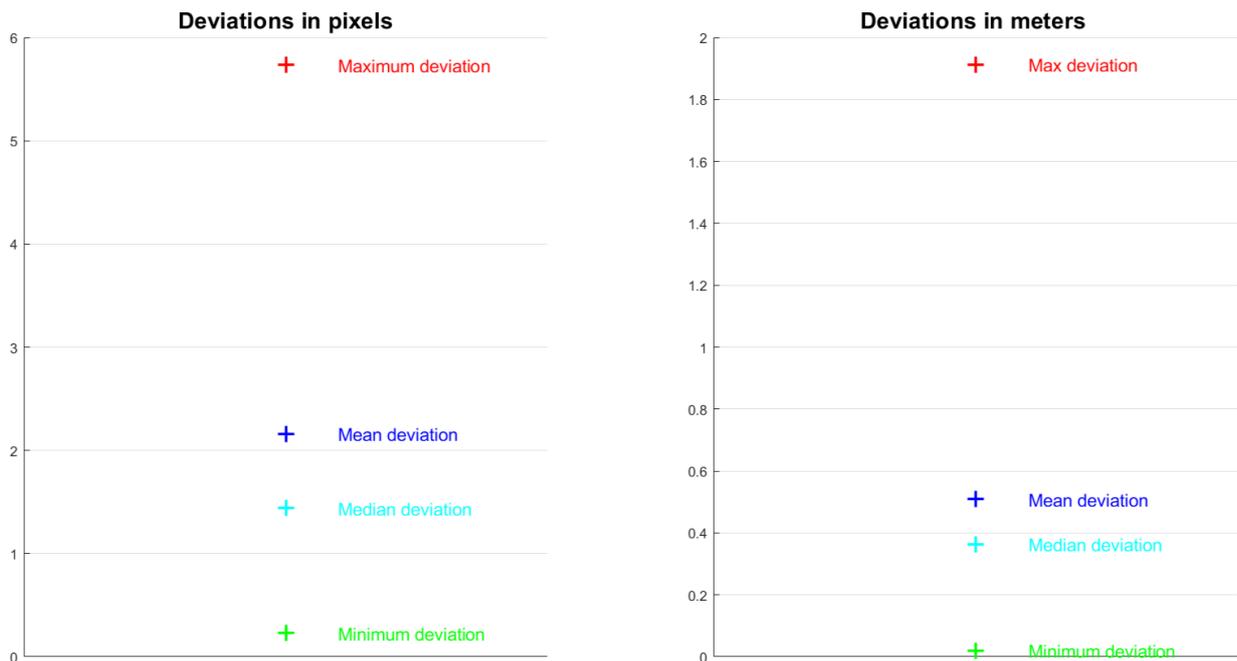


Figure 27 : Valeurs extrêmes, médiane et moyenne de déviation des coordonnées en pixel (gauche) et en mètre (droite) pour la caméra BRGM 302 installée sur la digue Nord.

De manière générale, les points les plus éloignés de la caméra induisent une déviation plus importante. En effet, comme le montre la Figure 28, l'emprise au sol des pixels est bien plus importante au loin qu'à grande proximité de la caméra. L'erreur induite sera donc d'autant plus grande à distance qu'à proximité de la caméra.

Pixel footprint on the geo-rectified image (m)

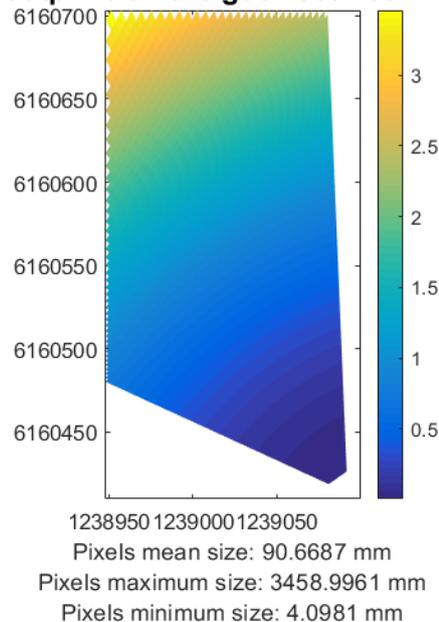


Figure 28 : Taille des pixels en fonction de la distance à la caméra pour la caméra BRGM 302, digue Nord.

4.4.2. Caméra BRGM 301 (trait de côte Sud)



Figure 29 : Valeurs extrêmes, médiane et moyenne de déviation des coordonnées en pixel (gauche) et en mètre (droite) pour la caméra BRGM 301 installée sur la digue Nord.

Les valeurs de déviation en mètres pour la caméra BRGM 301 installée sur la digue Sud sont plus importantes (4 m en moyenne, Figure 29).

5. Exploitation envisageable des données

5.1. ZONES EXPLOITABLES

Afin de définir la zone qui peut être considérée exploitable, la qualité des images rectifiées est évaluée. Un levé des traits de côte a été réalisé le lendemain de la pause des caméras pour quantifier la dérive de la qualité des données avec l'éloignement de la caméra.

La Figure 30 présente un trait de côte extrait grâce aux outils BRGM d'images prises le jour de l'installation (4 novembre 2020) et le trait de côte levé au DGPS le 5 novembre 2020, au nord et au sud de la plage (gauche et droite de la figure). Les rectangles verts clairs désignent la zone optimale : en effet, dans cette zone, les traits de côte mesurés sur les images Solarcam et au DGPS sur le terrain sont presque confondus : l'éloignement maximum entre les deux traits de côte est de 3 m au nord du port et de 4 m au sud. Au-delà, ceux-ci divergent. Le trait de côte nord peut être suivi sur un linéaire moins important (250 m environ) que le trait de côte sud (580 m environ) car la plage est étroite : il est donc plus difficile de rectifier l'image.



- Traits de côte mesurés au DGPS le 05/11/2020
- Traits de côte extraits des images SolarCam du 04/11/2020

Figure 30 : Zones exploitables des images Solarcam. Les rectangles verts représentent l'étendue des zones dans lesquelles les traits de côte mesurés in-situ et extraits des images Solarcam sont concordants.

5.2. MARQUEURS GÉOMORPHOLOGIQUES À EXTRAIRE

Il est possible d'extraire différentes données des images de caméras de suivi du trait de côte (Figure 13) mais cela dépend notamment de la position des caméras. Ici, différents marqueurs géomorphologiques pourront être extraits. Ces données devront être associées à des données existantes pour permettre la compréhension du transit sédimentaire au droit du port de Taverna.

5.2.1. Données et intérêt pour comprendre le transit sédimentaire au droit du port de Taverna

Afin de comprendre le transit sédimentaire au droit du port de Taverna, il est nécessaire :

- (i) de détecter les bypass possibles de sédiments au droit du port, qu'ils aient lieu par la barre d'avant côte ou par le remplissage de la digue sud ;
- (ii) d'observer la dynamique du trait de côte et de la barre d'avant-côte pour évaluer leur comportement avant et pendant un passage de sédiments ;
- (iii) d'observer la dynamique du trait de côte au nord et d'éventuelles formes du fond proche de la côte pouvant témoigner d'une arrivée de sédiments.

Un protocole d'analyse, qui pourra être affiné en fonction des premiers résultats d'analyse, est décrit en Figure 31.

1. Detecter les passages possibles du sud vers le nord

La digue Sud est-elle pleine ? →

OU

La barre d'avant-côte passe-t-elle au droit du port ? ↘

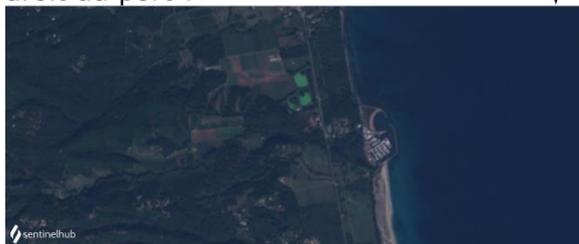


Image sentinel du 24/11/2020

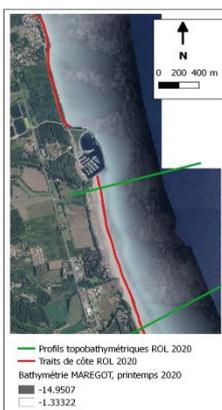


Données Caméra Sud



Données In-situ

2. Observer la dynamique du trait de côte au sud du port



Données In-situ



Données Caméra Sud

Indicateurs :

trait de côte & position de la barre

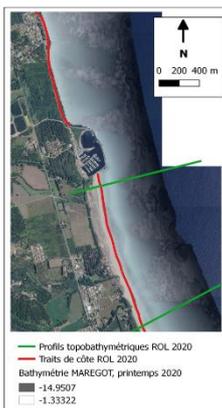
Objectifs :

x quantifier l'accumulation au sud

x Vérifier si la barre est en position favorable pour un bypass au large

x Caractériser les évolutions rapides pendant les tempêtes

2. Observer la dynamique du trait de côte au nord du port



Données In-situ



Données Caméra Nord

Indicateurs :

trait de côte & présence de barres

Objectifs :

x quantifier le recul ou les alternances reculs/avancées éventuelles

x Caractériser les apports potentiels lors d'épisodes de bypass, et leur point d'atterrissage le long du littoral Nord

Figure 31 : Protocole envisagé pour l'utilisation des images Solarcam pour la compréhension du transit sédimentaire autour du port de Taverna.

Détecter les passages de sédiments possibles du sud vers le nord

Il sera nécessaire de suivre l'accumulation de sédiments contre la digue sud et la barre d'avant-côte car les deux sources de by-pass seront le remplissage de la digue sud et le passage de la barre au droit du port. Le projet européen INTERREG MAREGOT a permis d'acquérir des données topo-bathymétriques à haute résolution spatiale (MNT) au printemps 2020 (Figure 31). Les données du ROL seront également utiles dans ce cadre puisque deux profils topobathymétriques sont suivis sur la plage Sud, dont un juste au sud de la digue (Figure 4). En parallèle, l'utilisation d'images satellitaires Sentinel 2B de résolution moyenne (10 m, Figure 31) permettra le suivi de la barre d'avant côte à une fréquence régulière (un passage tous les 5 jours).

Observer la dynamique du trait de côte au sud et nord du port

Dans le cadre du ROL, les traits de côte au sud et au nord sont levés annuellement (Figure 4). En complément de ces données, les deux caméras permettront de suivre le trait de côte bas (et d'autres indicateurs) afin de suivre l'évolution de la côte à haute fréquence.

Les images acquises par les Solarcam seront utilisées pour extraire des traits de côte bas (traitement déjà automatisé sous Matlab par le BRGM) et dans la mesure du possible si leur qualité le permet, pour le suivi du remplissage de la digue sud. Le suivi de la barre d'avant-côte est également envisageable, au moins au sud lorsque celle-ci est proche du littoral. Au nord, une éventuelle zone d'apport de sédiments depuis la barre pourrait être détecté, si celui modifie la profondeur du fond de façon importante et que cela a lieu dans la zone suivie. Le développement d'outils numériques spécifiques reste encore à mettre en place.

D'autres suivis sont également possibles comme le suivi du jet de rive, le suivi la limite de submersion marine lors des tempêtes ou encore de la surface de dépôt de feuilles de posidonies.

6. Conclusion

Afin d'améliorer la connaissance du transit sédimentaire au droit du port de Taverna, il est nécessaire :

- (i) de détecter les passages possibles de sédiments au droit du port, qu'ils aient lieu par la barre d'avant côte ou par le remplissage de la digue Sud ;
- (ii) d'observer la dynamique du trait de côte et de la barre d'avant-côte pour évaluer leur comportement avant et pendant un passage de sédiments ;
- (iii) d'observer la dynamique du trait de côte au nord et d'éventuelles formes du fond proche de la côte pouvant témoigner d'une arrivée de sédiments.

Il existe déjà des données pouvant permettre une première approche de la question :

- données bathymétriques et topographiques à faible résolution temporelle (de l'ordre de 1 fois par an en moyenne issues du projet Interreg MAREGOT (2017-2020) et du Réseau d'Observation du Littoral de la Corse) ;
- images satellites de faible résolution spatiale mais à fréquence temporelle raisonnable (un passage tous les 5 jours) permettant de détecter les évolutions de la barre d'avant-côte (SENTINEL 2B).

Même si les résolutions spatiales et temporelles de ces données permettent d'évaluer les mouvements de la barre d'avant côte, elles ne permettent pas, ou seulement partiellement, de suivre les autres éléments cruciaux à la détection d'un éventuel transit sédimentaire sud-nord et la compréhension des mécanismes en jeu. Il a donc été choisi d'installer des caméras sur les digues Nord et sSud pour permettre le suivi de ces éléments.

L'installation des mâts, des caméras et leur mise en route se sont déroulées dans des conditions satisfaisantes du 30 octobre 2020 au 5 novembre 2020 et en concertation avec les services exploitant l'infrastructure portuaire de Taverna. Les caméras transmettent désormais une image par heure et une vidéo toutes les 3 h au site dédié du BRGM. Ces images ne sont pas disponibles pour le grand public et sont exploitées par le BRGM à des seules fins d'étude de l'évolution géomorphologique de la côte. Afin de conserver une qualité optimale des données, nous envisageons de refaire la calibration externe des caméras en cas de mouvement permanent.

Les images acquises vont permettre d'extraire un nombre important de trait de côte bas sur une longueur d'environ 300 m au nord du port et d'environ 600 m au sud de celui-ci. Il est également envisagé de réaliser d'autres mesures sur la base de ces images comme le suivi de la barre d'avant-côte au sud lorsque celle-ci est proche de la côte, le remplissage de la digue Sud ou encore d'éventuels apports de la barre d'avant-côte au nord de la zone s'ils marquent significativement la forme du fond et qu'ils ont lieu dans la zone suivie par la caméra nord. Le développement d'outils spécifiques sera alors nécessaire.

Le déploiement d'instruments de mesures hydrodynamiques au droit du port et dans la zone visible par les caméras devrait être envisagée pour quantifier les forçages modifiant le trait de côte localement et les mettre en lien avec les évolutions observées.

7. Bibliographie

- Almar R.** (2009) - Morphodynamique littorale haute fréquence par imagerie vidéo. Thèse Université de Bordeaux, 262 p.
- Balouin Y., Belon R., Stépanian A., Bodéré G.,**2012 - Étude générale pour la protection du littoral de la Plaine orientale de Corse - Préconisations de gestion. Rapport BRGM/RP-61650-FR ; 52p., 36 ill.
- Bailey D.G., and Shan R.D.** (1996) - Determining large-scale sand bar behaviour, Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Lausanne, Switzerland, pp. 637-640.
- Belon R.** (2017) - Suivi de la dynamique des banquettes de posidonie et de leur impact sur l'évolution du trait de côte en Haute-Corse. Rapport final. BRGM/RP-67632 -FR, 53 p., 33 ill.
- Billy J., Coutin C., Garcin M., Paquier A-E., Mugica J.** (en cours) - Contribution du fleuve Golo à l'évolution du littoral de la Plaine orientale en Haute-Corse.
- Holland K.T., Holman R.A., Lippman T.C., Stanley J. and Plant N.,** (1997) -The application of video imagery to the study of nearshore processes. Oceanography. Vol. 16. No.3 p. 78-85.
- Holman, R.A., A.H. Sallenger Jr., T.C.Lippman, and J.W. Haines.** (1993) - The application of video image processing to the study of nearshore processes. Oceanography 6(3):78–85, <https://doi.org/10.5670/oceanog.1993.02>.
- Moisan M., Laigre T., Valentini N. et Grellier E.,** (2019) - Suivi des échouages de sargasse et de la dynamique du trait de côte par caméra autonome : Bilan de la phase d'installation. Rapport intermédiaire BRGM/RP-69416-FR, 51p., 45ill.
- Mugica J. et Koechler F. avec la collaboration de Laigre T., Bodéré G. et Manicacci T.** (2019) - Réseau d'Observation du Littoral de la Corse – Compte rendu de la campagne 2018. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-69318-FR, 237 p., 152 ill., 1 tab. 2 ann..
- Paquier A.E. et Mugica J.** (en cours) - Estimation de l'évolution potentielle du trait de côte aux horizons 2040 et 2100 sur la Plaine orientale en Haute-Corse. En cours.
- Stépanian, A., Balouin, Y., Belon, R. et Bodéré, G.,** (2011) ROL - Étude complémentaire sur le littoral de la Plaine orientale de Corse – Etat des connaissances sur les impacts des tempêtes sur le littoral. Rapport final. Rapport BRGM RP-59058-FR, 137 p., 64 ill., 4 ann..
- Valentini, N., & Balouin, Y.** (2020). - sessment of a Smartphone-Based Camera System for Coastal Image Segmentation and Sargassum monitoring. Journal of Marine Science and Engineering, 8(1), 23.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Direction régionale Corse
Immeuble Agostini
ZI de Furiani
20600 – Bastia – France
Tél. : 04.95.58.04.33