

Monographies des sites pilotes

Composante: T2

Action: T2 -6

Partenaire Responsable: BRGM

Date: 15/02/2019

Table des matières

Introduction.....	5
Site des Vieux Salins à Hyères-Les-Palmiers (Var, France)	9
Site de l’Anse du Vieux-Moulin à Grimaud (Var, France)	23
Site de la plage du Veillat à Saint-Raphaël (Var, France).....	35
Site de la Riviera du Levant (Ligurie, Italie)	45
Site entre Bocca di Magra et Marina di Massa (Toscane, Italie)	57
Site de Senzuno (Toscane, Italie).....	65
Site de Pratoranieri (Toscane, Italie)	73
Site de San Vincenzo (Toscane, Italie)	83
Site du Parc régional de la Maremma (Toscane, Italie)	93
Site de Calvi (Haute-Corse, France)	105
Site de Moriani (Haute-Corse, France)	115
Site de l’Arinella à Bastia (Haute-Corse, France)	125
Site d’Aléria-Ghisonaccia (Haute-Corse, France).....	133
Site-de Capo Altano (Sardaigne, Italie).....	141
Site-de Capo Mannu (Sardaigne, Italie).....	157
Site-de Sella del Diavolo (Cagliari, Sardaigne, Italie)	175
Site-du Villaggio Nurra (Sassari, Sardaigne, Italie).....	187
Site de Santa Margherita (Sardaigne, Italie).....	199
Site de Torre delle Stelle et Solanas (Sardaigne, Italie)	215
Conclusion	245

Introduction

Le projet MAREGOT

Les partenaires du projet MAREGOT se sont donnés pour objectif de travailler en réseau transfrontalier sur le périmètre MARITIMO sur la problématique de l'érosion côtière à différents niveaux tels que :

- sa caractérisation en termes d'intensité et/ou de période de retour;
- son suivi dynamique par des techniques de surveillance morphologique et morphodynamique adaptées;
- ses effets directs ou indirects sur la biodiversité littorale et côtière marine;
- ses conséquences en termes d'exposition et d'aggravation des risques côtiers, recul du trait de côte, érosion des falaises rocheuses, et submerison marine;
- les techniques de mitigation des risques côtiers ;
- les modes de gestion de l'érosion côtière.

L'érosion côtière et ses modes de gestion concernent l'ensemble des environnements littoraux, plages naturelles et plages urbaines, plages rechargées et plages artificielles, plages de poches et plages ouvertes, lidos sableux et cordon dunaire, falaises côtières meubles et falaises côtières rocheuses...

Cette analyse transfrontalière s'appuie sur un réseau de sites-pilotes sur lesquels vont être déployés dans la suite du projet des plans d'interventions qui sont divers en fonction des ambitions, des missions et des moyens de chacun des partenaires (mesures de suivi, plan de gestion, aménagement, stratégie de gestion).

Identification des sites pilotes

A travers le réseau partenarial du projet MAREGOT, l'ensemble de ces thématiques sont traitées sur un panel de sites pilotes, dont chacun est supervisé par un partenaire, qui sont répartis sur les littoraux français, dans les départements du Var et de Haute Corse, et italiens, en régions Ligurie, Toscane et Sardaigne (Illustration A).

Ces sites ont ainsi été sélectionnés par les partenaires au regard de :

- leur représentativité au niveau transfrontalier, en terme de prossiabilité de reproductibilité des plans d'intervention qui vont y être appliqués
- leur importance d'y adopter une stratégie transfrontalière par rapport à leurs caractéristiques liées aux thèmes des autres activités du projet MAREGOT (ondes de tempête, bilan sédimentaire, côtes hautes, habitats et écosystèmes côtiers et gestion du risque côtier).

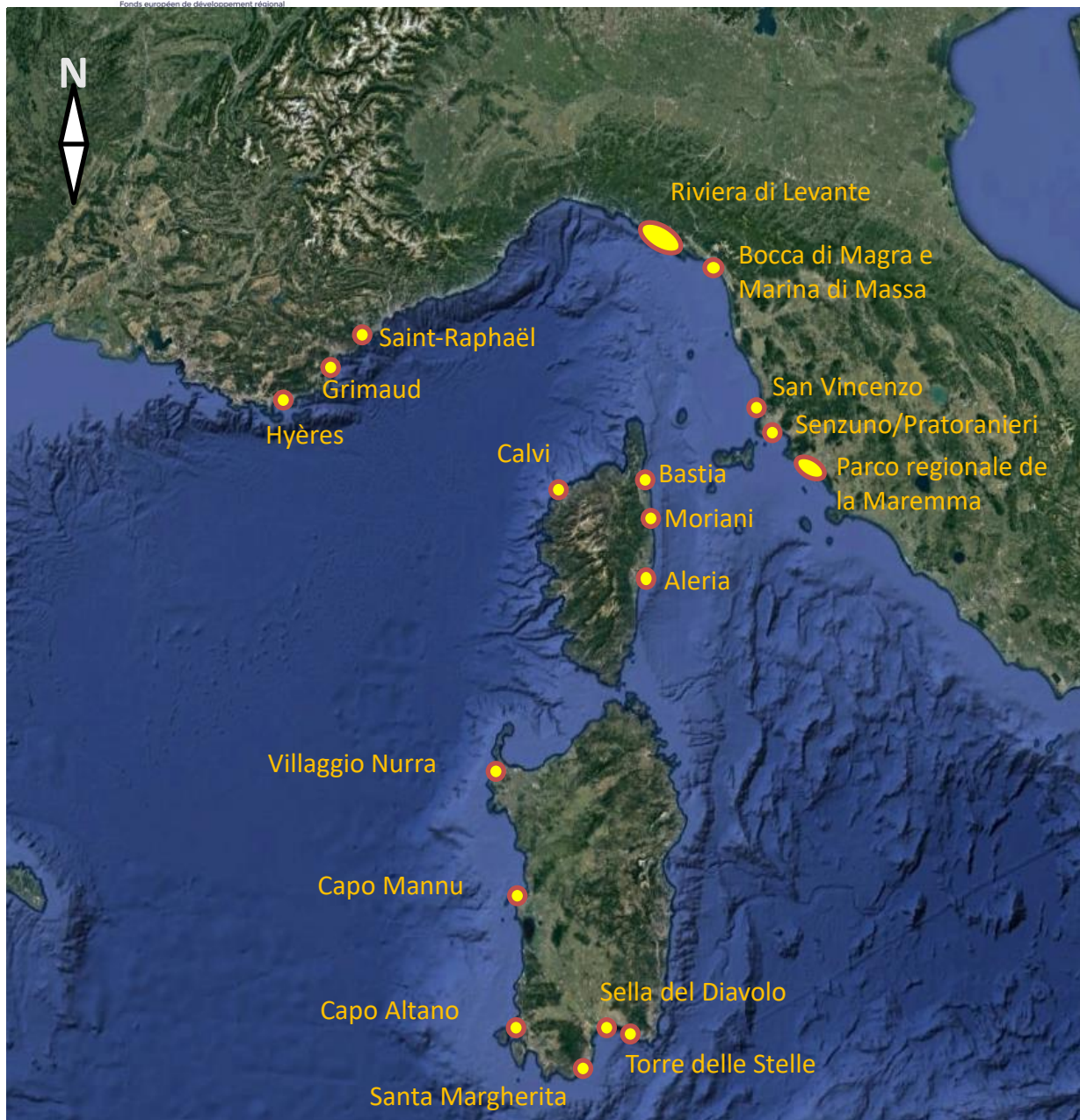


Illustration A : Localisation des sites pilotes du projet MAREGOT sur le périmètre MARITIMO

Contenu du rapport

Le présent rapport correspond au livrable de l'activité T2-6. Il contient les différentes monographies de chacun des sites pilotes, sous un format de compilation d'articles, produits par l'ensemble du partenariat MAREGOT.

Les sites sont présentés successivement en fonction de leur position géographique sur les littoraux :

- du Département du Var (France) ;
- de la région Ligure (Italie) ;

- de la région Toscane (Italie) ;
- de la région Corse (France) ;
- de la région autonome de Sardaigne (Italie).

Chaque monographie présente les caractéristiques principales des sites pilotes :

- Contexte physiographique, géologique et géomorphologique ;
- Particularités écosystémiques ;
- Données et connaissances disponibles sur les processus et les risques côtiers et ses caractéristiques géologiques ;
- Inventaire succinct des enjeux présents sur la zone littorale ;
- Tendances évolutives à moyen et/ou long terme du trait de côte sur les plages sableuses (côte basse) ou les falaises rocheuses (côte haute) ;
- Inventaire des risques côtiers et des plans de prévention et de gestion éventuellement mis en œuvre ;

Un rappel des problématiques principales des sites et de leur importance en termes de représentativité des secteurs littoraux de la zone MARITIMO est également réalisé. Elle doit permettre d'objectiver leur intérêt respectif dans la perspective d'une reapplicabilité, à l'ensemble de la zone, des différentes méthodologies d'intervention de gestion du risque côtier, qui sera mise en œuvre sur chacun des sites, dans la suite du projet projet MAREGOT 5 (Composante 3).

En fin de rapport, une synthèse succincte rappelle les grands enjeux de l'ensemble des sites et de leur importance dans la mise en place d'une stratégie transfrontalière.

Site des Vieux Salins à Hyères-Les-Palmiers (Var, France)

Présentation du site

Localisation

Le site des Vieux-Salins est situé sur la commune d'Hyères, dans le département du Var. Propriété du Conservatoire du littoral depuis 2001, ce site naturel de 350 hectares constitue, avec le salin des Pesquiers, la plus vaste zone humide entre la Camargue et l'Italie.



Illustration 1 : situation du site d'étude

Le littoral des Vieux Salins est sujet à érosion de plus de 1 m/an suite aux aménagements à l'est, de ports et épis, bloquant l'arrivée de sédiments issus de la dérive littorale (Illustration 2). Face à cette régression, cette partie de littoral a été enrochée dans les années 80 par la Compagnie des Salins du Midi, ex-proprétaire du site, afin de protéger l'activité salinière.



Illustration 2 : Vue aérienne des Vieux Salins et localisation du cordon littoral sujet à érosion (Source : IGN BD-ortho)

Cet enrochement des années 80 génère aujourd'hui une cellule d'érosion qui menace de rompre le cordon littoral et met à mal l'ensemble du site par une intrusion marine au niveau du canal d'alimentation des salins.



Illustration 3 : Vue aérienne de la partie érodée du cordon littoral avec risque d'intrusion marine au niveau du canal d'alimentation (en bleu).

Description géographique

Le littoral des salins d'Hyères appartient originellement à la cellule hydro-sédimentaire de la Rade d'Hyères délimitée à l'Est par la Pointe de l'Argentière, premier promontoire de la côte rocheuse vers le Cap Bénat, et à l'Ouest par le Cap de l'Esterel, qui délimite l'extrémité est de la presqu'île de Giens.

Dans la rade, le littoral est constitué par une suite de cordons littoraux qui ont séparé au fil du temps la mer de zones basses, fréquemment lagunaires, dont deux importantes formations où s'est développée la saliculture : l'Etang des Pesquiers et les Vieux Salins. Alimentés par les apports sédimentaires des trois fleuves côtiers, le Maravenne-Pansard, le Gapeau et du Roubaud, ces cordons sont étroits et peu développés. Ils sont donc, depuis leur formation, très sensibles tant aux actions naturelles qu'humaines.

La création d'aménagements portuaires dans la Rade et de multiples ouvrages de protection est venu modifier le comportement de ces cordons littoraux.

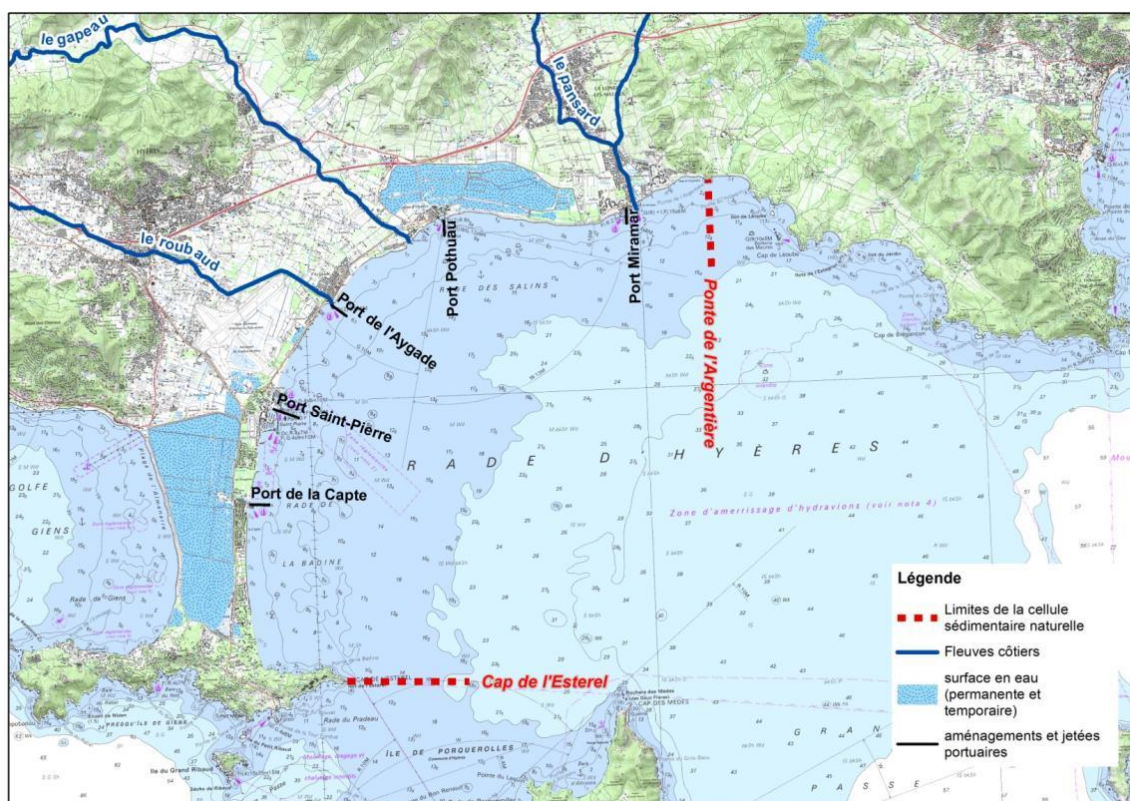


Illustration 4 : situation du site des Vieux Salins dans la cellule hydro-sédimentaire

Caractéristiques physiographiques/écosystémiques

Le site des Vieux-Salins est le témoin de l'activité salicole qui a constitué pendant longtemps un pilier du développement local. Exploités dès l'Antiquité, et ce jusqu'en 1995, les Vieux-Salins ont aujourd'hui retrouvé une vocation naturelle.

Le site reste à ce jour essentiellement composé de mosaïques de plans d'eau de profondeur, de surface et de salinité variables.

Le site constitue une zone humide d'intérêt international à très fortes potentialités écologiques répertoriée au titre de la convention « Ramsar ». Le Document d'objectif Natura 2000 FR 9312008 (Salins d'Hyères et des Pesquiers) approuvé le 29 avril 2008, précise les objectifs et opérations en faveur des espèces et habitats d'intérêt communautaire présents sur le site. Du fait de leur intérêt paysager, les Vieux-Salins font également l'objet d'une protection au titre **des** sites classés.

Connaissances disponibles

Une étude pilotée par TPM (Toulon Provence Méditerranée) en 2017 et confiée au Bureau d'étude Artelia a permis de réaliser un diagnostic complet de ce site à partir de données existantes et de données acquises sur site.

Ainsi, l'étude a permis de réaliser des levés sur la zone d'étude et a exploité les données antérieures suivantes :

Levés topo-bathymétriques :

- Levés bathymétriques mono-faisceaux réalisés sur la zone d'étude en 2007, 2008, 2009 et 2010 en suivant des lignes directrices tous les 50 mètres. Ces levés couvrent la partie maritime de zone d'étude jusqu'à des profondeurs d'environ 6 à 7 mètres, jusqu'aux épis présents au droit du camping le Pansard.

- Un levé topo-bathymétrique LIDAR (par voie aéroportée) a aussi été réalisé en 2015 dans le cadre du programme du suivi du littoral de la DREAL. Il couvre l'ensemble de la zone d'étude et a une résolution de 1 mètre.

8 levés topobathymétriques supplémentaires ont été réalisés selon le plan ci-dessous :



Illustration 5 : positionnement des levés topobathymétriques

Une campagne de prélèvements des sédiments composant les fonds superficiels a été réalisée par Eurofins le 20/07/2017. Une analyse granulométrique laser des échantillons collectés a été réalisée.

Vent :

Afin d'estimer la capacité de transport éolien de sables secs par mètre carré, les statistiques des mesures de vent de la station Météo-France n° 83137001, implantée au port de Toulon (43°06'12"N et 05°55'48"E) ont été établies.

La série temporelle de vents couvre la période s'étendant du 01/09/1995 au 31/10/2010, soit 15,15 ans de durée effective en tenant compte des lacunes de la série. Il s'agit de de vitesse et direction de vents maxima moyens quotidiens, mesurés à une hauteur de 10 m et moyennés sur 10 mn.

Marées :

Les niveaux de marées utilisés sont celles du Port de Toulon et du Port Pothuau via les observatoires du SHOM (SHOM, 2016).

Surcôte liée aux tempêtes :

Aux variations liées à la marée et à l'élévation du niveau des mers liée au réchauffement climatique, s'ajoute en période de tempêtes les surcotes liées à la houle, au vent et à la pression atmosphérique. Celles-ci ont été estimées par le CETMEF sur l'ensemble du littoral français en exploitant les mesures de niveaux marins suffisamment longues effectuées par le SHOM au niveau de ses observatoires. Proche du site des Salins, c'est à Toulon que les mesures sont les plus fiables.

La durée des mesures exploitées est de 1992 à 2011 et pendant cette période la surcote maximale mesurées est de 0,52 m a été enregistré le 19/02/2010

Dans le cadre de l'étude, on retient les estimations de la loi GDP en suivant les recommandions du BRGM (BRGM, 2014b) dans la caractérisation de l'aléa submersion marine.

On en déduit que le niveau maximal que la mer peut atteindre est de 1,34 m ZH dans la situation actuelle et 1,94 m ZH à l'horizon 2100.

Houle :

Les statistiques et extrêmes de houle ont été établis aux points P88, P99 qui sont localisés dans la rade d'Hyères et à la bouée de Porquerolles (cf. Illustration suivante):

- Le point P99 est utilisé pour caractériser le climat au droit de notre zone d'étude,
- Le point P88, situé plus à l'est de notre zone d'étude, est en position plus ouverte et a été utilisé afin de mettre en évidence la variation en intensité des houles le long du littoral, sous l'effet de protection de l'île de Porquerolles,
- Les données à la bouée de Porquerolles sont-elles utilisées afin de caractériser les conditions d'agitation au large, avant les processus de diffraction, de réfraction et de déferlement.

Les séries temporelles de 1979 à 2009, issues du modèle spectrale de propagation de la houle développé par le BRGM (BRGM, 2014b), ont été utilisées pour l'établissement des statistiques.



Illustration 6 : Localisation des points d'analyse

Photos aériennes :

La position du trait de côte, caractérisé par la position de la laisse de mer, a été identifiée en 1920, 1924, 1971, 1998, 2066, 2008, 2011, 2014, et 2017 par photo-interprétation (L. Velay, 2016, IGN, 2017).

La position relative des traits de côte a été exploitée afin de calculer les taux d'évolution en mètre par an en 86 points le long de ce littoral, soit en moyenne tous les 40 mètres environ.

Quatre périodes ont plus particulièrement fait l'objet de notre attention :

- De 1920 à 2017, pour établir les tendances à très long-terme.
- De 1920 à 1971 et de 1971 à 2017 ; les années 1970s étant la période de mise en place des enrochements sur la partie est de ce littoral (au droit de l'étang de l'Anglais), ces deux périodes sont prises en compte afin d'identifier l'influence de ces aménagements sur ce littoral.
- De 2011 à 2017, pour établir les tendances à moyen termes les plus récentes, et identifier un potentiel impact de l'enlèvement des enrochements sur cette partie du littoral.

Etat des connaissances

Aléas côtiers

Evolution du trait de côte

Echelle de temps historique 1920-2017

La position du trait de côte, caractérisée par la position de la laisse de mer, a été identifiée en 1920, 1924, 1971, 1998, 2066, 2008, 2011, 2014, et 2017 par photo-interprétation (L. Velay, 2016, IGN, 2017).

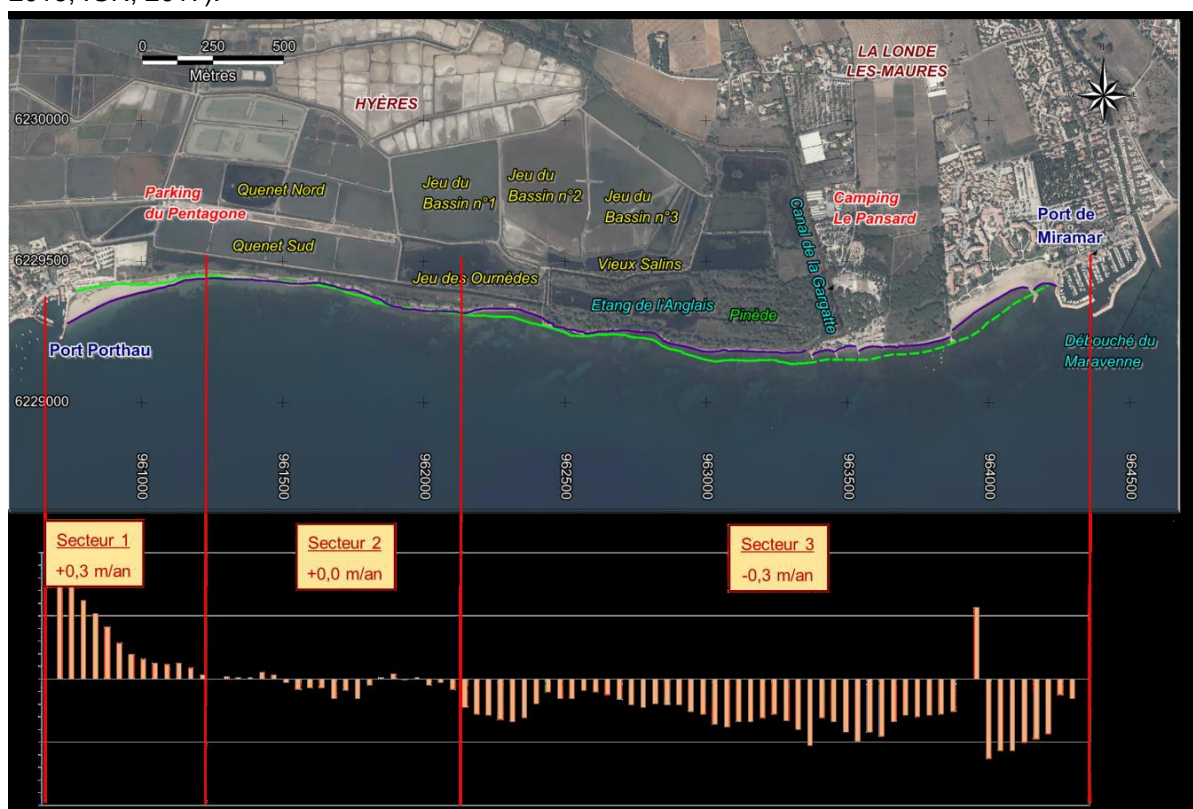


Illustration 7 : Evolution du trait de côte de 1920 à 2017

Suite à l'observatoire d'une régression du trait de côte dans le secteur 3, la compagnie des Salins du Midi avait, dans les années 80, mis en place un enrochement pour protéger le secteur 3 des entrées marines. Cet enrochement a permis de stabiliser l'évolution du trait de côte sur la partie est du site mais a aggravé la situation dans la partie centrale, proche du canal d'alimentation des Salins.

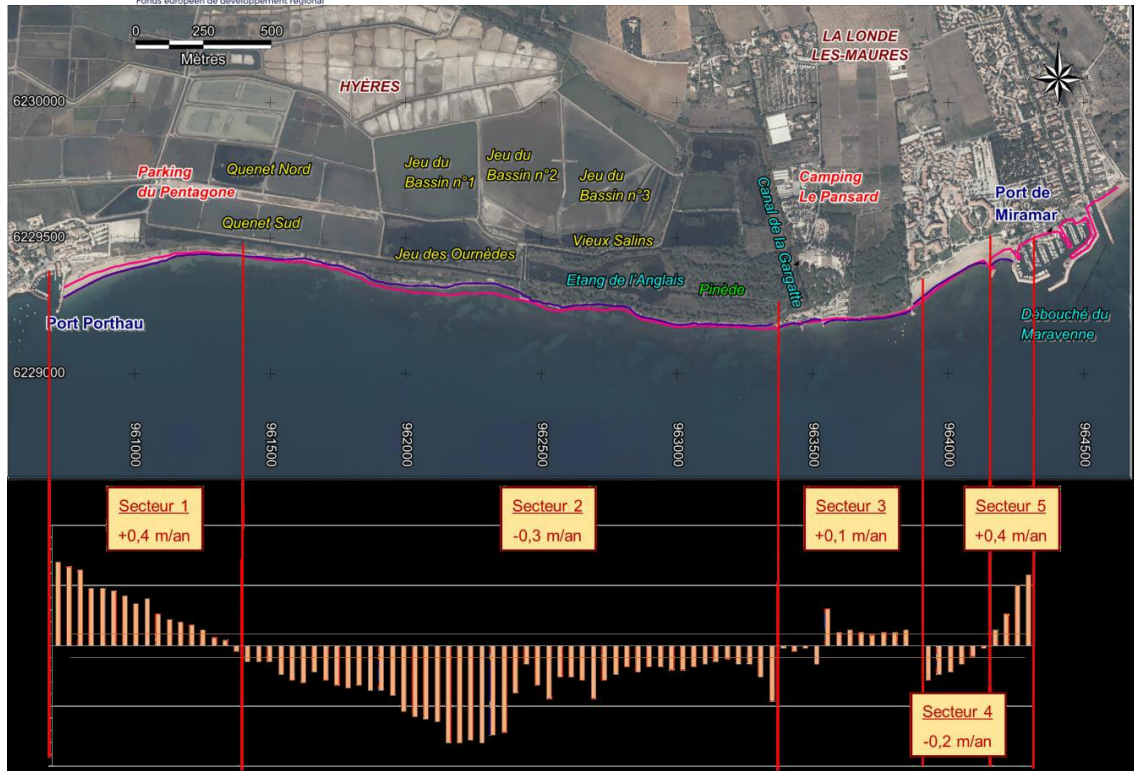


Illustration 8 : Evolution du trait de côte de 1971 à 2017

Evolution récente 2011-2017

L'illustration suivante donne la position et le phasage de l'enrochement du rivage située à l'est des Vieux Salins. L'illustration montre l'évolution de la section de rivage anciennement protégée par un mélange de béton/ gravats déposés dans les années 1970 et enlevés en 2011. On observe très clairement un recul du trait de côte de l'ordre de -0,8 m/an en moyenne mais jusqu'à -2,5 m/an sur la partie la plus à l'ouest du tronçon, soit environ 15 m de recul de 2011 à 2017.



Illustration 9 : Position du trait de côte au niveau du linéaire non protégé par des bétons/ gravats

L'illustration suivante donne les taux d'évolution moyen sur l'ensemble de la zone d'étude de 2011 à 2017. On retiendra que la zone centrale, allant du bassin central du Quenet sud et incluant les 160 m non protégés évoqué ci-dessus, est en forte érosion, de l'ordre de -0,7 m/an à -1,2 m/an en moyenne. Cette érosion est compensée légèrement par une avancée du littoral à l'est au niveau de la plage du Pentagone ; cette avancée trop limitée par rapport aux érosions observées indique des pertes de sables dans d'autres zones du littoral, probablement au-delà de la digue de Port Porthau.

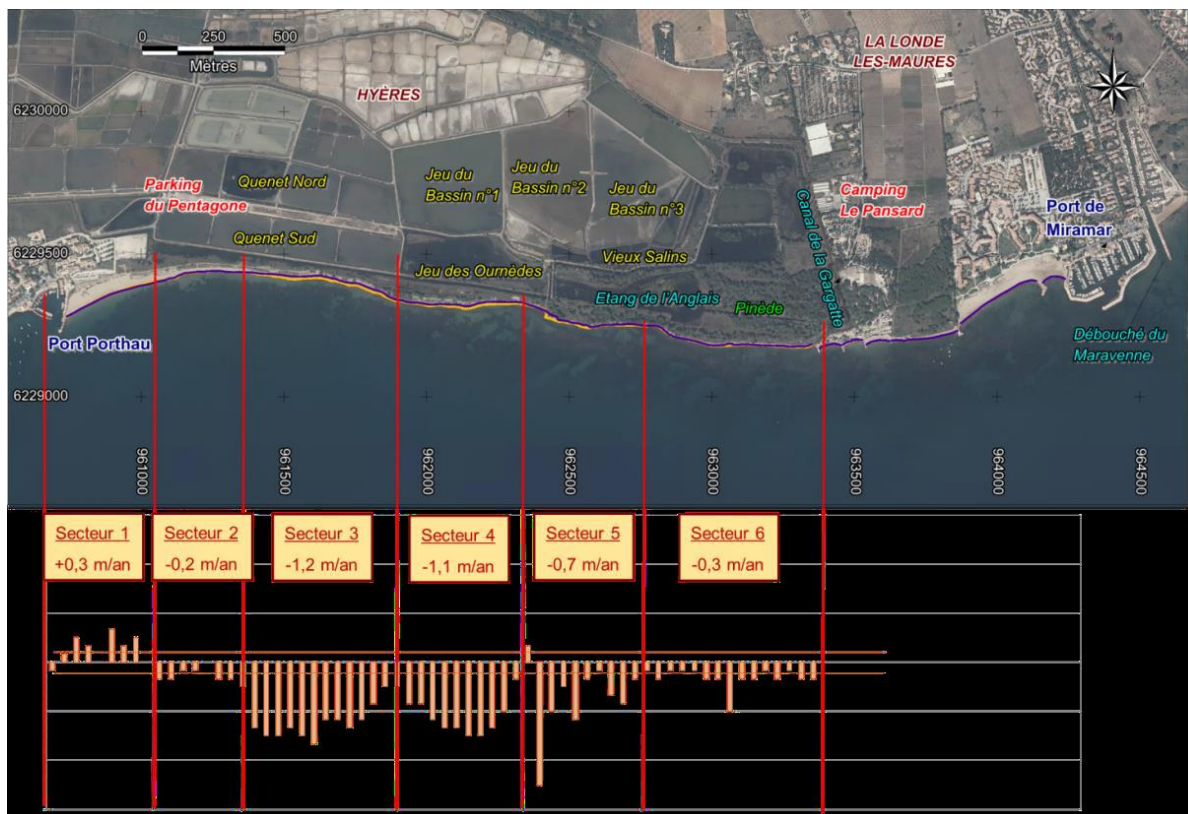


Illustration 10 : Taux d'évolution du trait de côte, 2011 – 2017

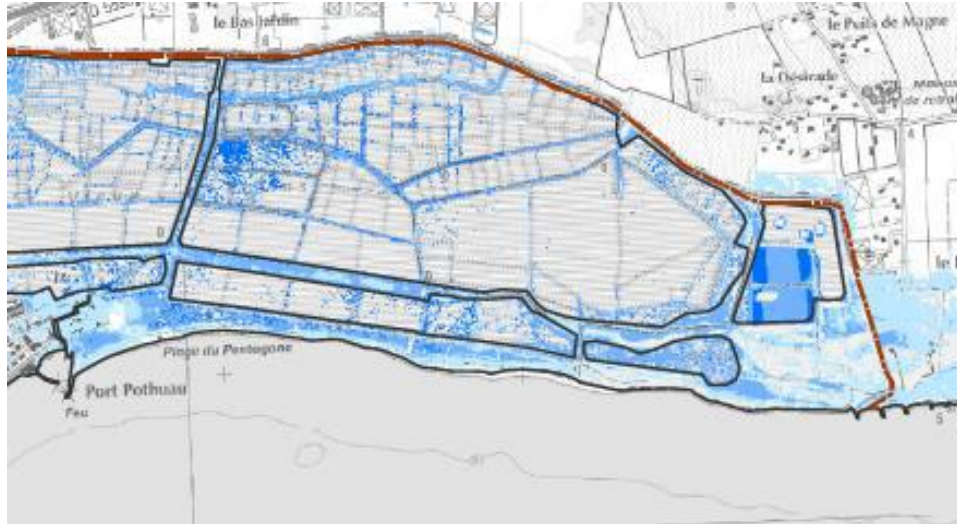
Submersion marine

L'illustration suivante présente la carte de submersion marine dans la situation présente. Il est tenu compte de: la surcote centennale et des caractéristiques des vagues de période de retour 100 ans, la bathymétrie des fonds étant issue des données GEBCO. Un niveau statique de +1,03 m IGN 69 est retenu et au niveau des plages, la surélévation du niveau d'eau liée à l'action des vagues, dénommé le *run-up*, est prise en compte en mettant en œuvre la formule de (Stockdom *et al.*, 2006).

Comme pour les autres territoires à risques d'inondation de la façade méditerranéenne, il a été retenu au titre de la Directive inondation, la méthodologie qui consiste à superposer le niveau statique de la mer à la topographie. Cette méthode est retenue en méditerranée au regard des temps d'exposition longs aux tempêtes qui ne sont pas contraints par les marées comme sur la façade atlantique.

Les zones submergées sont qualifiées « à risque » selon trois niveaux corrélés aux hauteurs de submersion : l'aléa est dénommé « faible », pour des hauteurs respectives inférieures à 0,5 m, « moyen » pour des hauteurs comprises entre 0,5 à 1 m et « fort » pour des hauteurs supérieures à 1 m. (BRGM, 2014b)

On se rend compte que sur l'ensemble du territoire des Vieux Salins et ses abords, la hauteur d'eau l'aléa est faible à moyen.





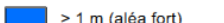
Cartographie de l'aléa submersion marine
SCoT Provence Méditerranée

Aléa pour la situation actuelle

- Surcote centennale
- Vagues de période de retour 100 ans
- Pas d'élévation du niveau marin liée au changement climatique global

Légende

Hauteur d'eau du niveau statique

	0 - 0.5 m (aléa faible)
	0.5 - 1 m (aléa moyen)
	> 1 m (aléa fort)



 Trait de côte HISTOLITT (SHOM)
 Limite de commune

Illustration 11 : Carte de submersion – situation actuelle (BRGM, 2014b)

Bilan de la dynamique hydrosédimentaire

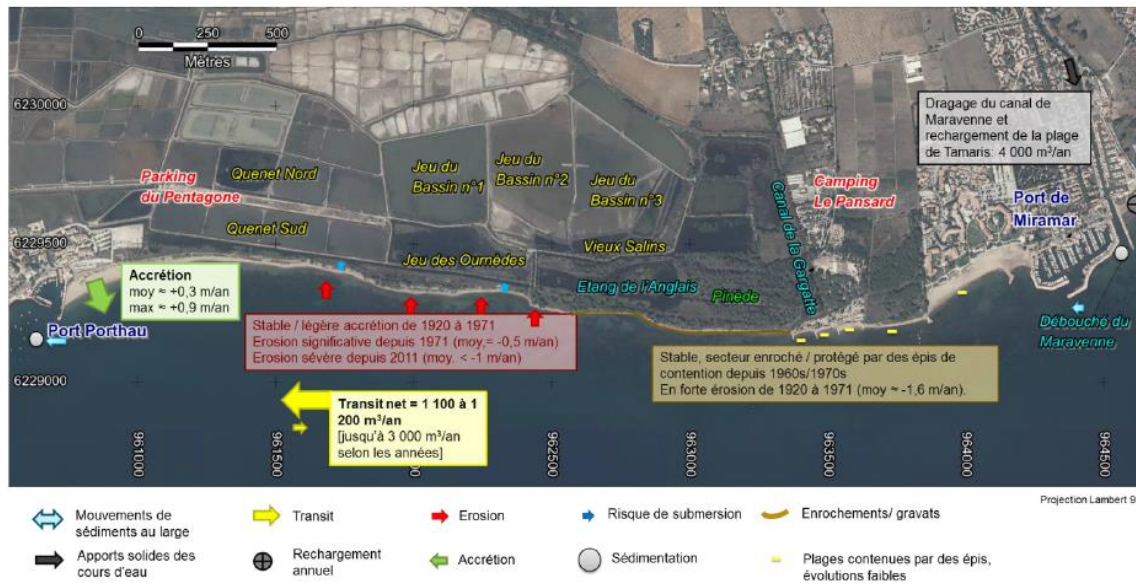


Illustration 12: Représentation du bilan de la dynamique hydrosédimentaire

Enjeux présents

L'étude Artelia montre une menace imminente de rupture du cordon littoral au niveau du canal d'alimentation des Vieux Salins qui mettrait à mal, non seulement l'ensemble du site des Vieux Salins, mais aussi et surtout, le village des Salins située à l'ouest du site. Cette menace de rupture est liée à une cellule d'érosion qui se forme directement après l'enrochement, comme souvent en aval d'ouvrages durs implantés sur substrat sablonneux.

Projection de la morphologie dans la situation actuelle et en 2025

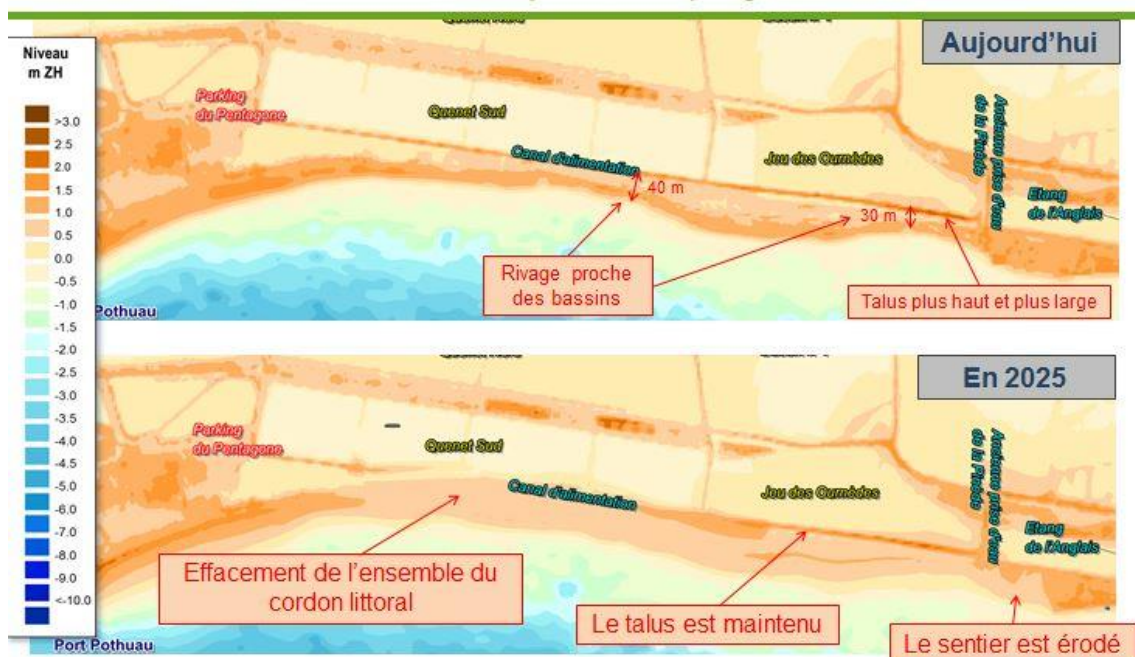


Illustration 13 : Mise en évidence de la disparition du cordon littoral et du risque de submersion accru : en l'absence d'action la situation est dès aujourd'hui très critique

Divers scénarios ont été étudiés sur ce site : scénario « aménageur » avec poursuite de l'enrochement voire création d'une digue, scénario de « laisser faire », scénario de désenrochement total ou partiel et scénario d'accompagnement de l'évolution naturelle.

Les simulations de désenrochement total (800 m) ou partiel (sur 550 m) montrent un déplacement de la cellule d'érosion et donc un évitement de cette intrusion marine dans le canal d'alimentation.

Le désenrochement a pour avantage de permettre de préserver à l'est les habitats prioritaires de pinède et de préserver le débouché du canal de la Gargate, contre lequel se situe un camping.

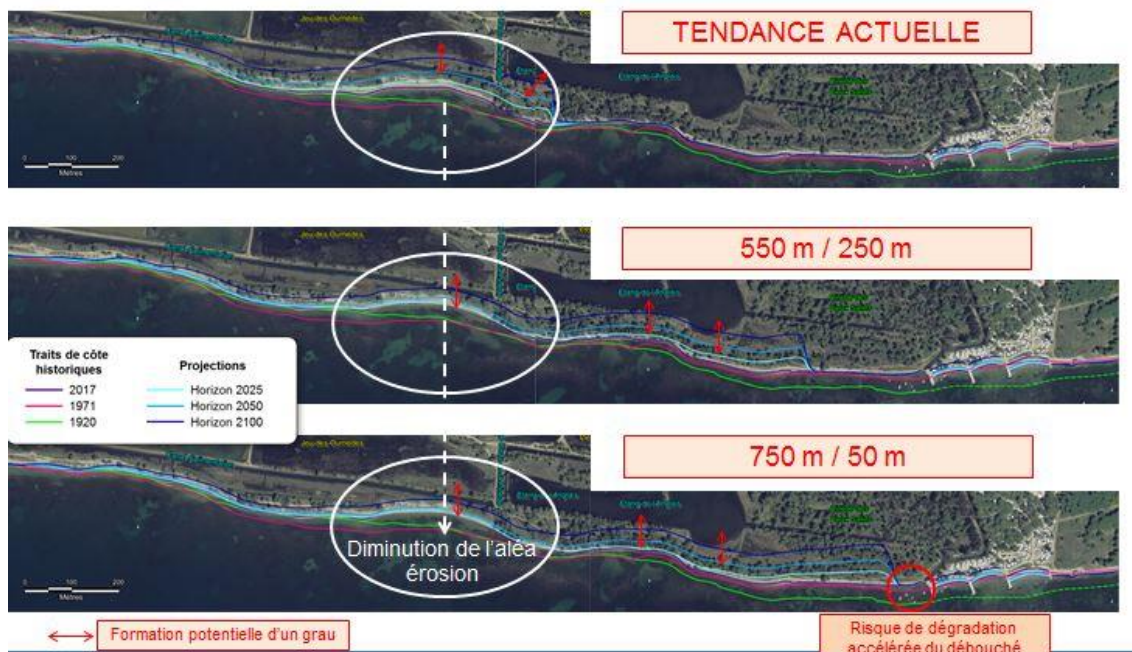


Illustration 14 : Evolution du trait de côte en fonction des différents scénarios possibles sur les ouvrages : On note que la solution d'enlèvement des enrochements sur 550 m permet un équilibre entre une réduction de l'aléa érosion/ submersion marine au droit du canal d'alimentation et une préservation du trait de côte au niveau de la pinède.

Conclusion

Rappel de la problématique du site et représentativité transfrontalière du site

Si l'enrochement mis en place par la Compagnie des Salins du Midi dans les années 80 permet de faire obstacle au recul du trait de côte sur le secteur enroché, il provoque dans le même temps la disparition de la plage située à l'ouest de l'ouvrage (apparition d'une cellule d'érosion). En raison de cette nouvelle configuration et des risques de franchissement du cordon dunaire par les eaux marines, une menace pèse aujourd'hui sur l'intégrité de l'aménagement hydraulique des anciens salins (notamment en raison du risque d'ensablement et obstruction du canal d'alimentation). Une submersion du canal pourrait également provoquer une remontée des eaux jusqu'au village des Salins. A noter également une discontinuité du cheminement littoral à prévoir si le cordon se rompt.

Pour redonner au paysage son aspect naturel et pour lutter contre l'érosion du littoral ouest au droit du canal d'alimentation, une partie de l'enrochement a été retirée en 2011 sur environ 150 mètres. Si cette première phase de travaux n'a pas permis d'enrayer le phénomène d'érosion chronique, elle l'a limité sur la zone la plus fragile du cordon.

Stratégiquement, 4 scénarios ont été étudiés sur ce site (scénario « aménageur », scénario de « laisser faire », scénario de désenrochement total ou partiel et scénario « d'accompagnement de l'évolution naturelle »). Le scénario de désenrochement avec des mesures d'accompagnement paraît le meilleur compromis : cette opération permettra de laisser la possibilité au trait de côte de reculer, par le retrait de la majeure partie de l'enrochement, et de rendre ainsi au littoral un fonctionnement dynamique naturel. La cellule d'érosion sera ainsi déplacée sur un secteur présentant moins d'enjeux. Le site y gagnera sur le plan paysager.

Ce site constitue un site pilote de renaturation du trait de côte sur un secteur ne présentant pas d'enjeux humains directs (pas d'habitation au droit de la zone désenrochée).

Dans un premier temps, il n'est pas prévu de renaturation du cordon littoral sur les secteurs présentant des enjeux humains (proximité du camping, débouché du canal de la Gargate). Un linéaire de 250 m d'enrochements devrait donc être conservé et suivi par des levés tous les trimestres avant d'engager la suite des travaux.

Bibliographie

ARTELIA. 2017-2018. Définition d'une stratégie de gestion du cordon littoral des Vieux Salin-Toulon Provence Méditerranée. Phase 1 : Diagnostic, 223 p.

ARTELIA. 2017-2018. Définition d'une stratégie de gestion du cordon littoral des Vieux Salin-Toulon Provence Méditerranée. Phase 3 : Elaboration du schéma opérationnel de gestion.

BRGM. 2014a. Evaluation des Risques Naturel Littoraux – SCoT Provence-Méditerranée – Evolution historique du trait de côte. Rapport final. RP-63952-FR.

BRGM. 2014b. Evaluation des Risques Naturel Littoraux – SCoT Provence-Méditerranée – Caractérisation de l'aléa submersion marine. Rapport final. RP-63949-FR.

BRGM. 2014c. Evaluation des Risques Naturel Littoraux – SCoT Provence-Méditerranée – Evaluation des stocks sédimentaires littoraux – Prospection géophysique. Rapport final. RP-63949-FR.

CETMEF. 2013. Analyse des surcotes extrêmes le long des Côtes métropolitaines. Surcotes liées à la baisse de pression atmosphérique et aux vents lors du passage d'une tempête. mais exclues l'effet des vagues.

Groupe régional d'experts sur le climat en Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-PACA). 2016. Climat et changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Sogreah 1988. Etudes sédimentologiques de la rade d'Hyères – Littoral de port porthuau au ruisseau du Pansard. Rapport général.

Unité de formation de Calais – Sciences et techniques de la mer et du littoral. 1988. Etude d'aménagement sur les vieux salins d'Hyères.

Fiche Ad'Apto – Dix démarches de gestion souple du trait de côte – Site : Vieux Salins d'Hyères – Département du Var (83)

L. Velay. 2016. Rapport Ad'Apto – Vers une gestion souple du trait de côte des vieux salins – Etat des lieux des connaissances et prospective. Pour le compte de Toulon Provence Méditerranée et le Conservatoire du littoral.

EOL. 2004. Site des vieux salins - Visualisation du site en 3-D & Analyse prévisionnelle de son évolution.

IGN. 2017. BD ORTHO® 50 cm.

Sabatier. 2011. Salins d'Hyères – Re-naturation du trait de côte au droit de la pinède des Vieux Salins. Note technique sur les impacts géomorphologiques du trait de côte. Conservatoire du Littoral.

C. Lemarchand. 2008. Université Aix Marseille 3. Caractérisation des habitats en front de mer des Vieux Salins et préconisations de gestion à court terme et moyen terme. Mémoire de projet environnemental.

Port-Cros Parc National. 2014. Reconnaissance de formations d'herbier de posidonie en rade d'Hyères : herbiers-frangeants et/ou récifs-barrières.

V. Noble et H. Michaud. 2016. Cartographie de la végétation et des habitats naturels du site Natura 200 « rade d'Hyères » FR9301613. – Actualisation des cartographies pour l'île du levant. Vieux-Salins. Salins des Pesquiers et tombolo de Giens. îlots de la rade.

Toulon Provence Méditerranée et le Conservatoire du Littoral. 2016. Compte-rendu d'enquête : Perception sociale des usagers du littoral des Vieux Salins. Hiver 2015 et été 2016.

Ville d'Hyères. Levés mono-faisceaux 2007. 2008. 2009 et 2010.

Ville d'Hyères. 2016. Carte des concessions des plages au niveau des Vieux Salins

Océanide – Arcadis – O.C.E. 2014. Elaboration d'une étude de recherche des causes d'ensablement du port de Miramar et d'érosion du littoral dit « Tamaris » et de proposition techniques pour enrayer les phénomènes. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie – Direction départementale des territoires et de la mer du Var – Commune de la Londe-les-Maures.

Stockdon, H.F.; Holman, R.A.; How, P.A.; Sallenger, A. H. Jr. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and run-up. *Coastal Engineering*, 53, pp. 573-588

Site de l'Anse du Vieux-Moulin à Grimaud (Var, France)

Présentation du site

Localisation

La plage de l'anse du Vieux Moulin est dans le golfe de Saint-Tropez (Commune de Grimaud, Département du Var) (Illustration 8). C'est une petite plage de poche (à peine plus de 200 m de long), limitée à l'ouest par des affleurements rocheux et à l'est par un épi perpendiculaire au rivage.

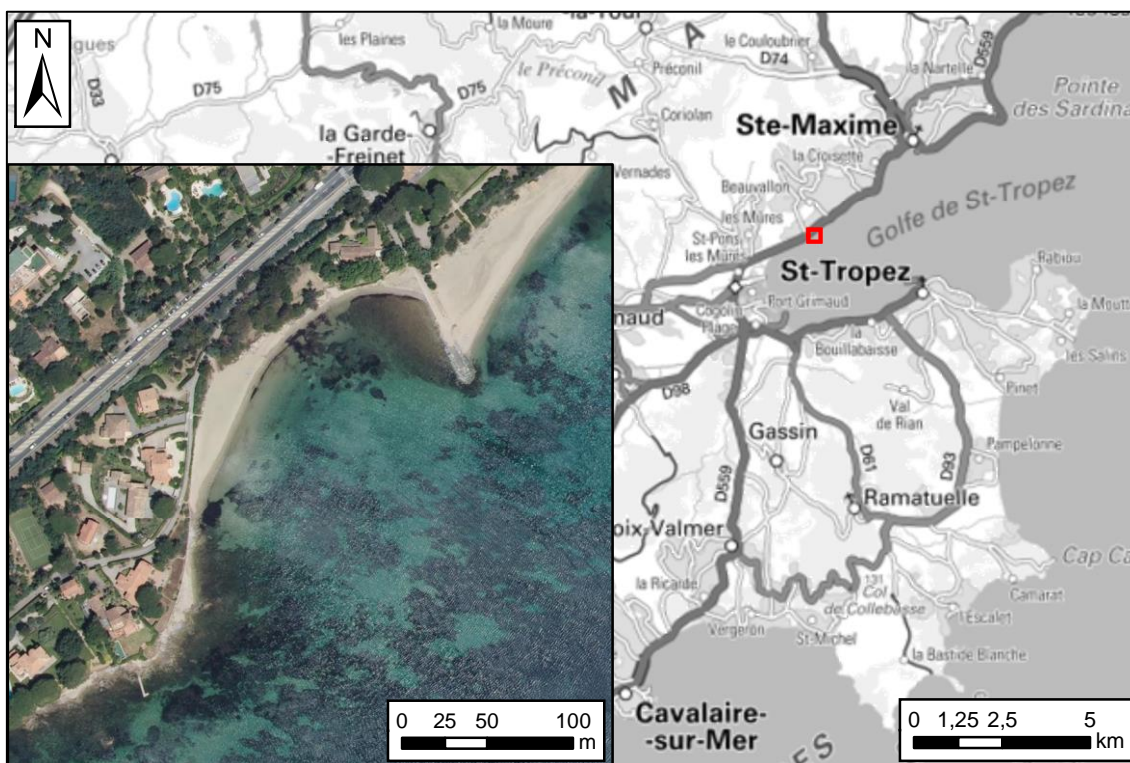


Illustration 1 - Vue aérienne et localisation de la plage du Vieux Moulin (Sources : IGN BD ORTHO® 2014 et SCAN EXPRESS®)

Description géographique

Vieux Moulin est une petite plage de poche dont la morphologie est largement contrainte par la présence d'un épi perpendiculaire au rivage, situé dans l'axe du chemin de Vieux Moulin descendant à la plage depuis la D559 (Illustration). Mis en place entre 1897 et 1924, il est rallongé en 1982 (Sogreah, 2008) : les plages de Vieux Moulin et de Beauvallon formaient une unité sableuse continue avant la construction de cet ouvrage, dont l'utilité première n'est pas connue. A l'ouest, la plage est bordée par le mur de soutènement du chemin des Embruns, tandis qu'au nord elle est délimitée par le mur d'enceinte d'une propriété privée.

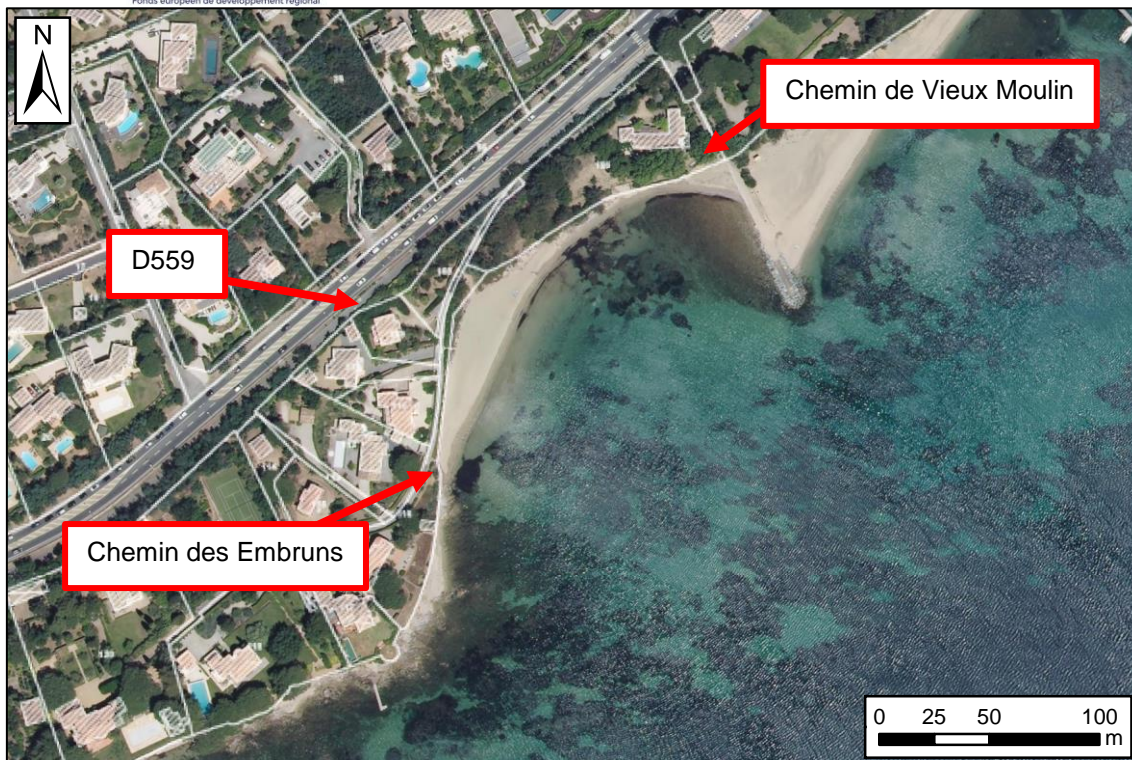


Illustration 2 - Parcelles cadastrales (Sources : IGN BD PARCELLAIRE® et BD ORTHO® 2014)

Caractéristiques physiographiques/écosystémiques

En septembre 2012, un prélèvement de sédiments sur la partie émergée de Vieux Moulin indique après analyse granulométrique (Eurofins, 2012) un D_{50} d'environ 1,4 mm (sables grossiers). En février 2017, le dragage de l'avant-port de Grimaud a permis de procéder à un rechargement des plages de la commune. C'est ainsi qu'environ 470 m³ de sables moyens (D_{50} à 0,29 mm) ont été régalés sur la plage de Vieux Moulin. En outre, la surface de la plage aérienne se trouve alors réhaussée de presque 20 cm (CISMA Environnement, 2017).

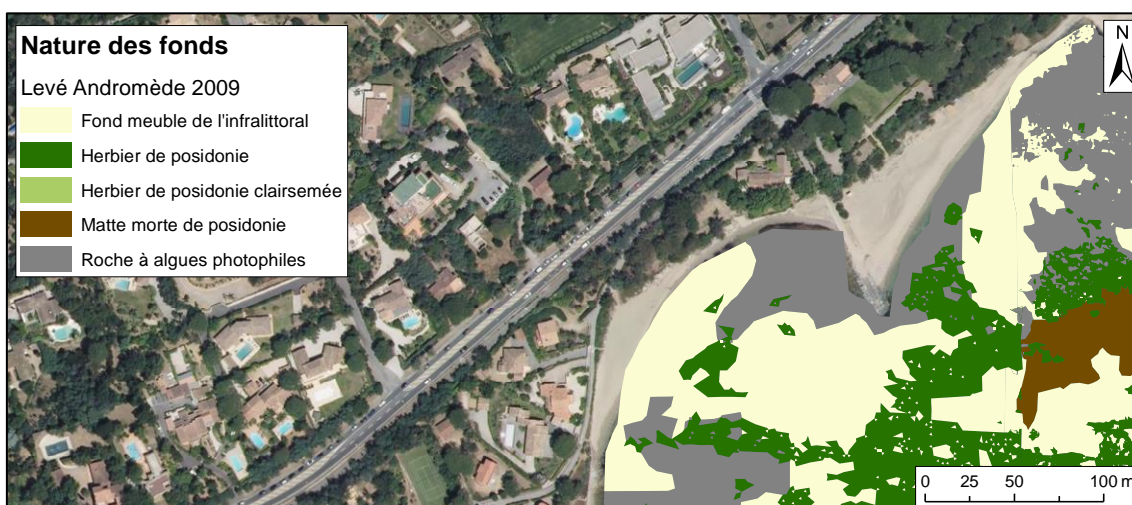


Illustration 3 - Cartographie de la nature des fonds (Source : Département du Var, 2011)

La plage du Vieux Moulin n'entre pas dans un périmètre NATURA 2000, ni dans une Zone de Protection d'espèce particulière (ZNIEFF, ZICO, ZPS). En revanche, dans sa partie immergée, la

présence d'herbiers de posidonie est bien identifiée, habitat d'intérêt patrimonial et espèce protégée (Illustration 3).

A l'occasion de l'*Etude pour la mise en valeur et la protection de la mer et du littoral* conduite par In Vivo en 2006, des profils topographiques ont été levés sur la partie subaérienne de la plage (Illustration 9). Le profil 55, levé dans le secteur le plus large de la plage, montre la présence d'un talus à l'origine du profil (côté terre), qui s'appuie en réalité contre le mur de soutènement du chemin des Embruns. On constate également la présence d'un bourrelet à proximité du plan d'eau (Illustration 5). Le profil 56 est revanche est plus lisse, et affiche une pente plus prononcée : ~15 %, contre ~6,5 % pour le profil 55.



Illustration 4 - Localisation des profils topographiques levés dans le cadre de l'*Etude pour la mise en valeur et la protection de la mer et du littoral* (Source : In Vivo, 2006)

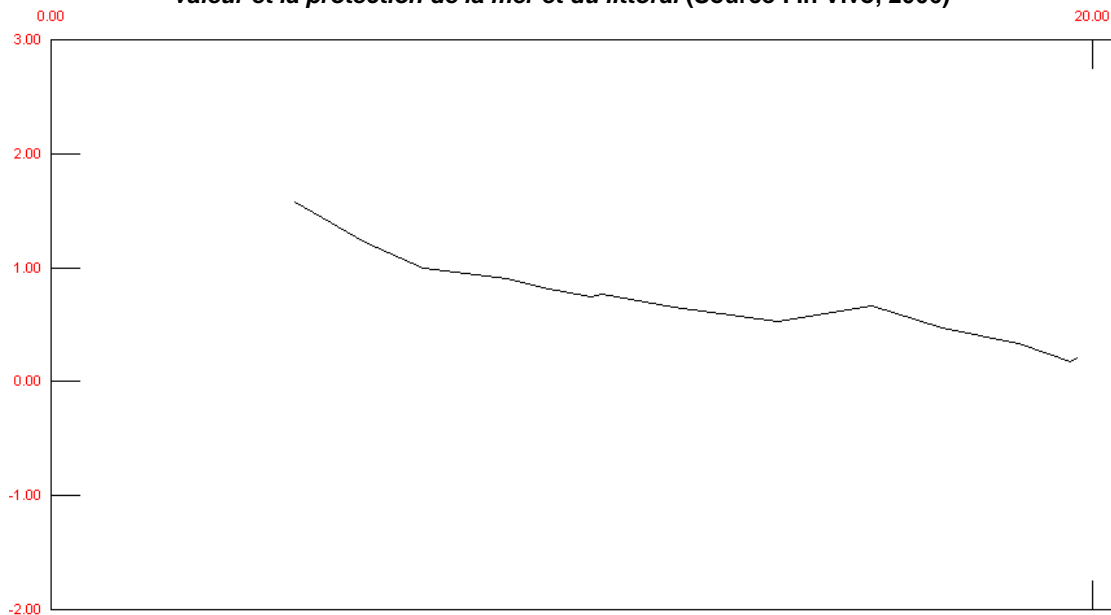


Illustration 5 - Profil topographique n°55 (cf. Illustration 4 ; source : In Vivo, 2006)

Ces profils levés sur la plage aérienne sont complétés par des profils topo-bathymétriques :



Illustration 7 - Localisation des profils topo-bathymétriques levés dans le cadre de l'Etude pour la mise en valeur et la protection de la mer et du littoral (Source : In Vivo, 2006)

La morphologie de la partie sous-marine de la plage s'avère complexe (Illustration) : si la cartographie de la nature des fonds indique une alternance de sable et de roche (Illustration 3), le profil topo-bathymétrique révèle qu'il y a sans doute une contrainte morphologique forte imposée par le substratum rocheux sous-jacents aux fonds sableux. Il est probable que celui-ci ne soit que superficiellement recouvert par des sédiments meubles.

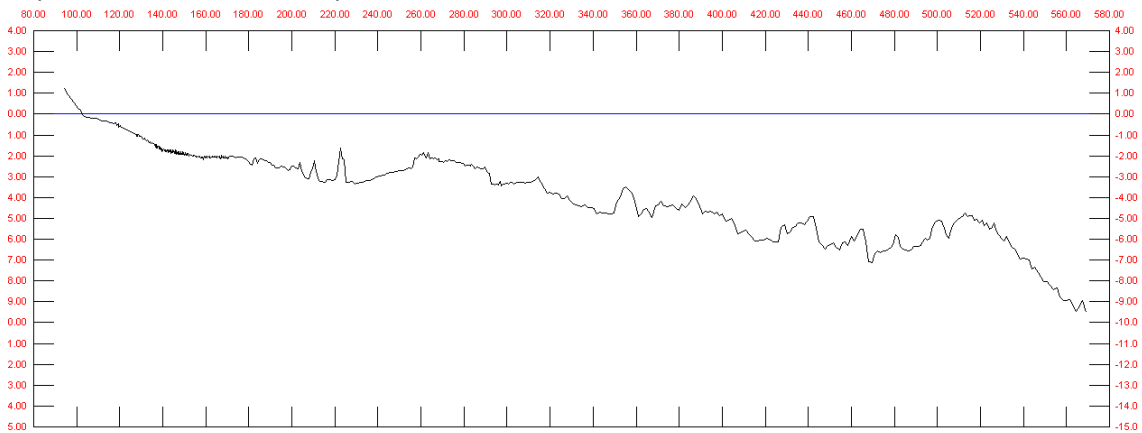


Illustration 8 - Profil topo-bathymétrique n°29 (cf. Illustration 7 ; source : In Vivo, 2006)

Dynamiques hydro-sédimentaires

La localisation de la plage du Vieux Moulin sur la bordure nord du golfe de Saint-Tropez contraint largement la direction de propagation des houles d'est en ouest. La première étude des conditions hydro-sédimentaires est menée par Sogreah (2008), en trois temps :

1. Acquisition de données de houle au large (observation météorologiques transmises par des navires en mer), couvrant une période de 40 ans (1961-2001) ;
2. Propagation des houles dans le golfe de Saint-Tropez à l'aide du modèle spectral de houle SWAN (Booij *et al.*, 1999), sur la base de la bathymétrie SHOM de 1988 ;

3. Calcul du potentiel de transport sédimentaire longitudinal (TSL) selon l'équation du CERC (1984).

D'après cette méthodologie, le potentiel de TSL résultant pour le secteur de l'anse du Vieux Moulin est estimé à 25000 m³/an.

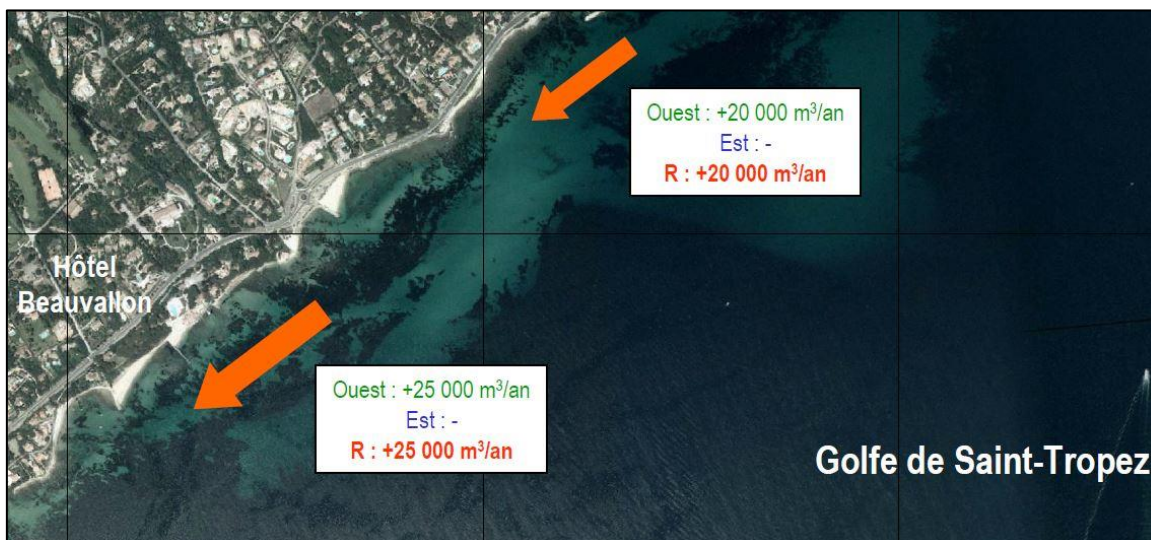


Illustration 9 - Estimation du potentiel de transport sédimentaire longitudinal d'après l'équation du CERC (1984) (Source : Sogreah, 2008)

Cependant, en raison des nombreuses critiques soulevées par l'approche du CERC (1984), synthétisées notamment par Kulling (2017), ACRI-IN a proposé en 2018 un travail basé sur la chaîne de calcul TELEMAC, qui se décompose comme suit :

- TELEMAC2D, module résolvant les équations de Saint-Venant, mis en œuvre pour la modélisation des courants générées par les vagues ;
- TOMAWAC, module résolvant l'équation de conservation de la densité d'action des vagues et tenant compte des processus physiques induits par les variations de fonds, les interactions entre vagues, la présence de courant et les variations des niveaux marins ;
- SISYPHE, module permettant d'estimer le transport sédimentaire par charriage et suspension et de résoudre l'équation de conservation de la masse de sédiment près du fond, afin de modéliser les évolutions bathymétriques.

La houle au large est cette fois tirée de la base de données GlobOcean (construite avec WaveWatch3), et couvre une période d'environ 20 ans (1992-2010). La chaîne de modélisation s'appuie cette fois sur la bathymétrie extraite du Litto3D® 2015 PACA. En considérant une houle au large de période de retour annuelle d'une part (direction : 75°N ; Hs : 2,8 m ; Tp : 7,8 s), et décennale d'autre part (direction : 75°N ; Hs : 3,7 m ; Tp : 9,5 s) les Illustrations 10, 11 et 12 indiquent respectivement pour l'anse du Vieux Moulin le plan des vagues, des courants et des mouvements sédimentaires.

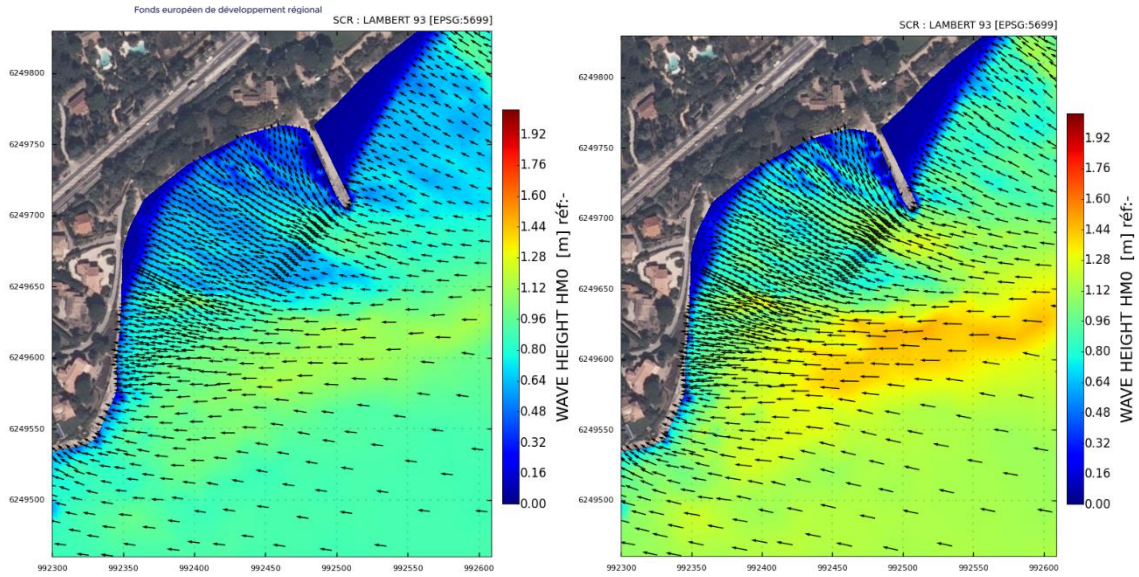


Illustration 10 - Plan des vagues dans l'anse du Vieux Moulin pour une houle au large de période de retour annuelle à gauche, décennale à droite (Source : ACRI-IN, 2018)

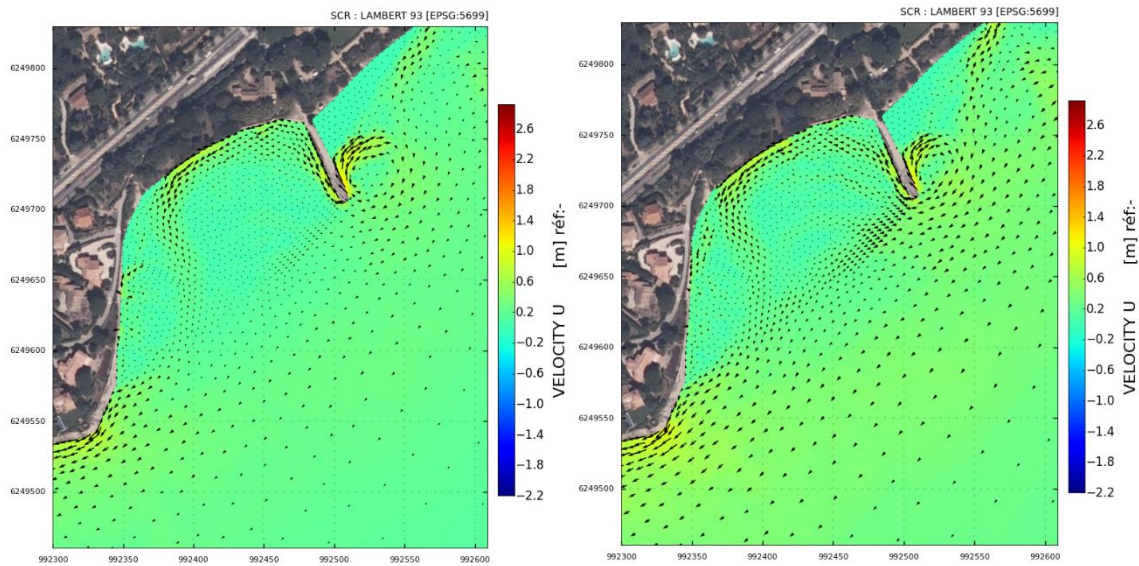


Illustration 11 - Courants dans l'anse du Vieux Moulin pour une houle au large de période de retour annuelle à gauche, décennale à droite (Source : ACRI-IN, 2018)

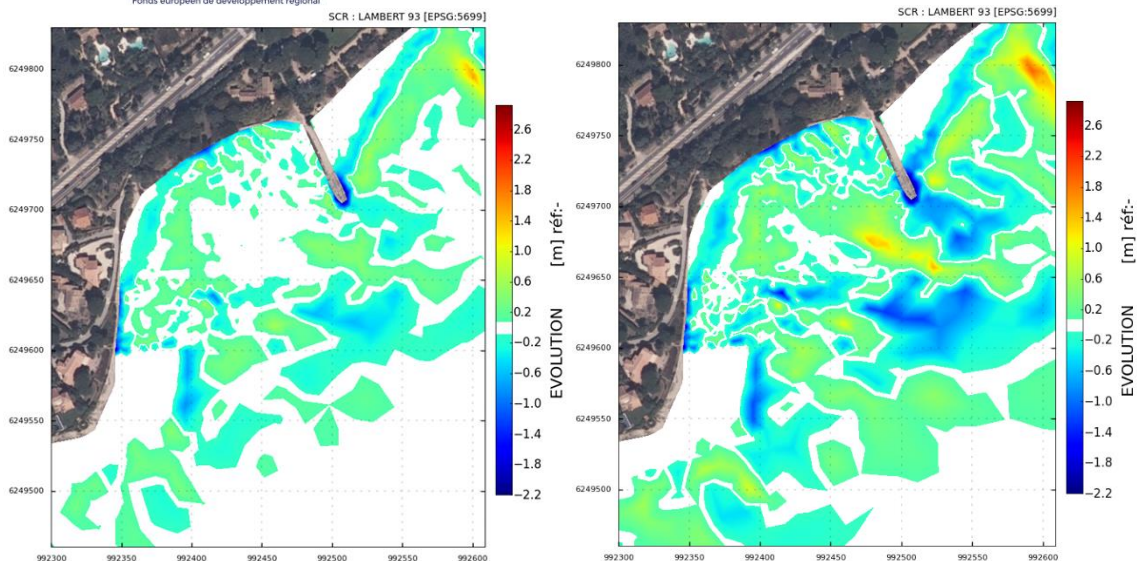


Illustration 12 - Bilan sédimentaire de l'anse du Vieux Moulin pour une houle au large de période de retour annuelle à gauche, décennale à droite (temps de simulation : 12h ; source : ACRI-IN, 2018)

Connaissances disponibles

La plage de l'anse du Vieux Moulin est finalement peu étudiée, ou de façon périphérique, dans le cadre d'études plus larges. Les principales connaissances acquises dans le domaine des risques côtiers et de la gestion du trait de côte sont rassemblées dans le tableau ci-dessous (Illustration 1). Ce sont ces données qui sont exploitées dans la suite du rapport pour qualifier le site MAREGOT de Grimaud.

Thème	Données	Nature des données	Période	Source	Bibliographie
Evolution du trait de côte	Traits de côte	Photographies aériennes	1924-2014	CD83	Département du Var (2017)
Evolution des plages	Topographie	Profils topographiques Levés D-GPS	2006	In Vivo	In Vivo (2006)
			2017	Buesa	CISMA (20017)
Evolution bathymétrique	Bathymétrie	Profils bathymétriques LiDAR topo-bathy	2006	In Vivo	In Vivo (2006)
			2015	SHOM/IGN	
Submersion marine	Cartographie 1/25000	Illustrations dans PDF	2017	BRGM	Stepanian <i>et al.</i> (2017)
Modélisation hydro-sédimentaire	Cartographie	Illustrations dans PDF		ACRI-IN	ACRI-IN (2018)

Illustration 1 - Connaissances disponibles sur le site de Vieux Moulin (Grimaud, Var). Les références bibliographiques complètes sont renvoyées en fin de rapport.

Etat des connaissances

Aléas côtiers

Erosion

Dans le cadre du projet MAREGOT, le Département du Var (2017) a réalisé un *Atlas de l'évolution diachronique du littoral varois (1924-2014)*. Dans ce travail, les variations du rivage sont abordées à travers l'étude de photographies aériennes pour différentes dates. Les lignes de rivages pour chaque année ont été digitalisées et sont comparées entre elles par une analyse diachronique quantitative menée grâce au logiciel MobiTC du Cerema (Pons & Trmal, 2018).

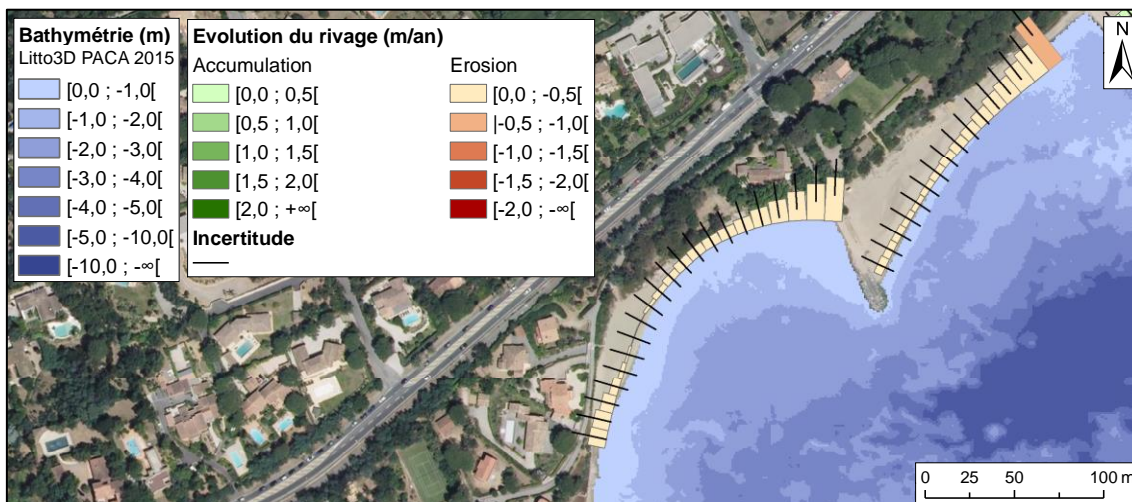


Illustration 2 - Evolution du trait de côte entre 1924 et 2014 (Sources : Département du Var (2017), IGN BD ORTHO® 2014 et SHOM/IGN Litto3D® PACA 2015)

Le recul est considéré comme fort si les vitesses sont supérieures à 0,5 m/an, et modéré pour des vitesses comprises entre 0,1 et 0,5 m/an. La plage est considérée stable pour des vitesses d'avancée ou de recul de l'ordre de 0,1 m/an. L'avancée est modérée pour des vitesses comprises entre 0,1 et 0,5 m/an, et forte si les vitesses sont supérieures à 0,5 m/an.

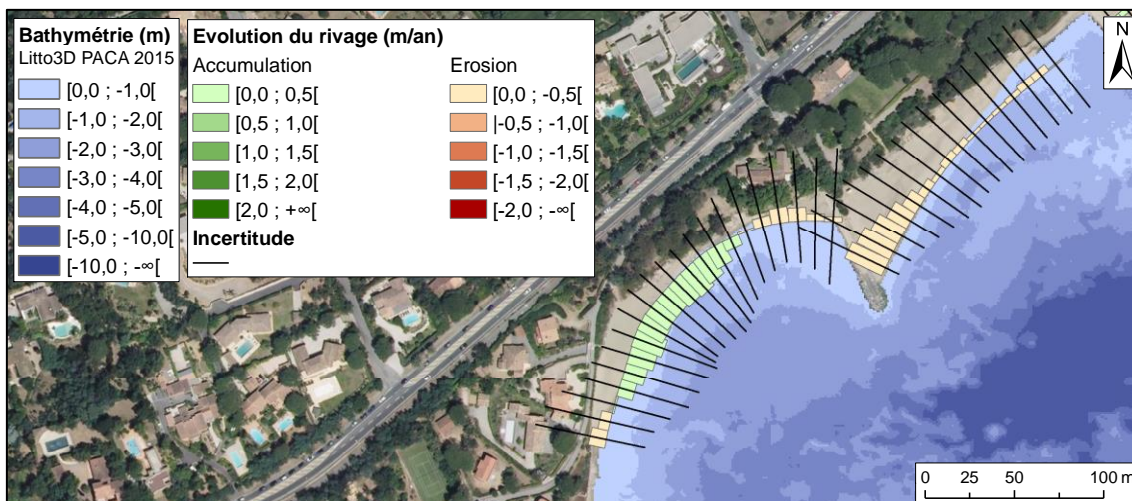


Illustration 3 - Evolution du trait de côte entre 1998 et 2014 (Sources : Département du Var (2017), IGN BD ORTHO® 2014 et SHOM/IGN Litto3D® PACA 2015)

Cette analyse met en évidence une dynamique érosive modérée mais cependant constante à l'échelle séculaire (Illustration 2). Toutefois, à échelle des 20 dernières années (1998-2014), s'il y a bien de l'accrétion dans la partie centrale de la plage, de l'érosion persiste au pied de l'épi ainsi qu'à l'extrémité sud-ouest (Illustration 3).

Par ailleurs, en cas de fortes précipitations, le ruissellement des eaux pluviales conduit à la formation de ravines sur la plage, aggravant ainsi la dynamique érosive liée aux houles. Néanmoins, ce phénomène n'a jamais fait l'objet d'une quantification par mesures *in-situ*.



Illustration 4 - Ravinement suite aux écoulements d'eaux pluviales (Source : Commune de Grimaud, 2018/03/16)

Submersion marine

N.B. : Le texte de cette section est adapté de Stepanian et al., 2017.

Pour affiner la compréhension des dynamiques de submersion sur la partie rocheuse du littoral de la région PACA, la DREAL PACA a souhaité produire un Porter à Connaissance de l'aléa submersion marine sur le périmètre régional. Ces données alimenteront aussi les Stratégies Locales de Gestion des Risques d'Inondations (SLGRI) des Territoires à Risques Importants d'Inondation (TRI) en matière d'amélioration de la connaissance du risque. Une cartographie des zones potentiellement affectées par un aléa de submersion marine d'occurrence centennale est ainsi produite à l'échelle régionale pour deux scénarios :

- un scénario, avec une élévation de +0,20 m du niveau marin actuel, défini comme « évènement moyen » ;
- un scénario à échéance 2100, avec une élévation de +0,60 m du niveau marin actuel, défini comme « évènement moyen avec prise en compte du changement climatique ».

La cartographie produite au 1/25000 ne permet pas de distinguer finement les espaces submergés dans l'anse du Vieux Moulin : elle n'est donc pas reproduite ici. Cependant, les simulations numériques menées par ACRI-IN (2018) montrent que la partie aérienne de la plage est significativement recouverte par les houles annuelles ou décennales, en particulier dans les secteurs les plus étroits, c'est-à-dire aux extrémités nord-est et sud-ouest (Illustration). A proximité de l'épi perpendiculaire au rivage, les modélisations révèlent la présence de courants d'une intensité approchant les 1 m/s par endroits (Illustration).

Plans de prévention

Malgré le caractère chronique de l'érosion côtière et un potentielle avéré de submersion marine en tempête, la plage de l'anse du Vieux Moulin ne fait pas l'objet d'une réglementation particulière de l'Etat en termes de prévention des risques littoraux. En particulier, il n'y a pas de Plan de Prévention des Risques Littoraux (érosion et/ou submersion marine) prescrits sur ce territoire. Cependant, comme sur tout le littoral français, un Porter à Connaissance des risques de submersion marine auprès des collectivités a été réalisé par les Services de l'Etat (DREAL PACA) dans le cadre de la mise en application de la Directive Inondation (Atlas des Zones Submersibles).

Enjeux présents

L'amaigrissement de la plage à proximité de l'épi expose aux houles de tempête le mur d'enceinte de la villa située en arrière plage : par conséquent, il est régulièrement affouillé à sa base, induisant un risque pour les usagers. En effet, le long de ce mur, la largeur de la plage aérienne se réduit parfois au point de disparaître, même par temps calme : les usagers sont alors contraints de longer un mur instable, dont l'effondrement peut survenir à tout moment.

En outre, du fait de l'érosion, la capacité d'accueil de la plage s'en trouve réduite : or, Vieux Moulin et Beauvallon sont deux des trois plages de Grimaud n'étant pas directement exposées aux nuisances liées à la circulation routière ou à la présence d'activités touristiques (campings, restaurants). L'érosion de l'extrémité sud-est de la plage ne permet plus aux usagers d'emprunter le sentier douanier : une partie du littoral grimaudois n'est donc plus accessible, ce qui induit une surfréquentation à Vieux Moulin.

Enfin, les données du réseau SURFSTAT (Andromède Océanologie, Agence de l'Eau RMC) montrent une nette régression des herbiers dans la partie sous-marine de la plage (Illustration 57). D'après Holon *et al.* (2015), 48,7% de cette dynamique peut être reliée à l'artificialisation du littoral (impacts directs et indirects). Même s'il est difficile de relier avec certitude la régression de l'herbier à la construction de l'épi au début du XX^{ème} siècle (qui modifie l'hydrodynamisme) et/ou à l'érosion continue de la plage (qui augmente la turbidité et/ou en recouvre les herbiers de sédiments), les gestionnaires s'interrogent sur les moyens à mobiliser pour enrayer cette érosion du patrimoine naturel.

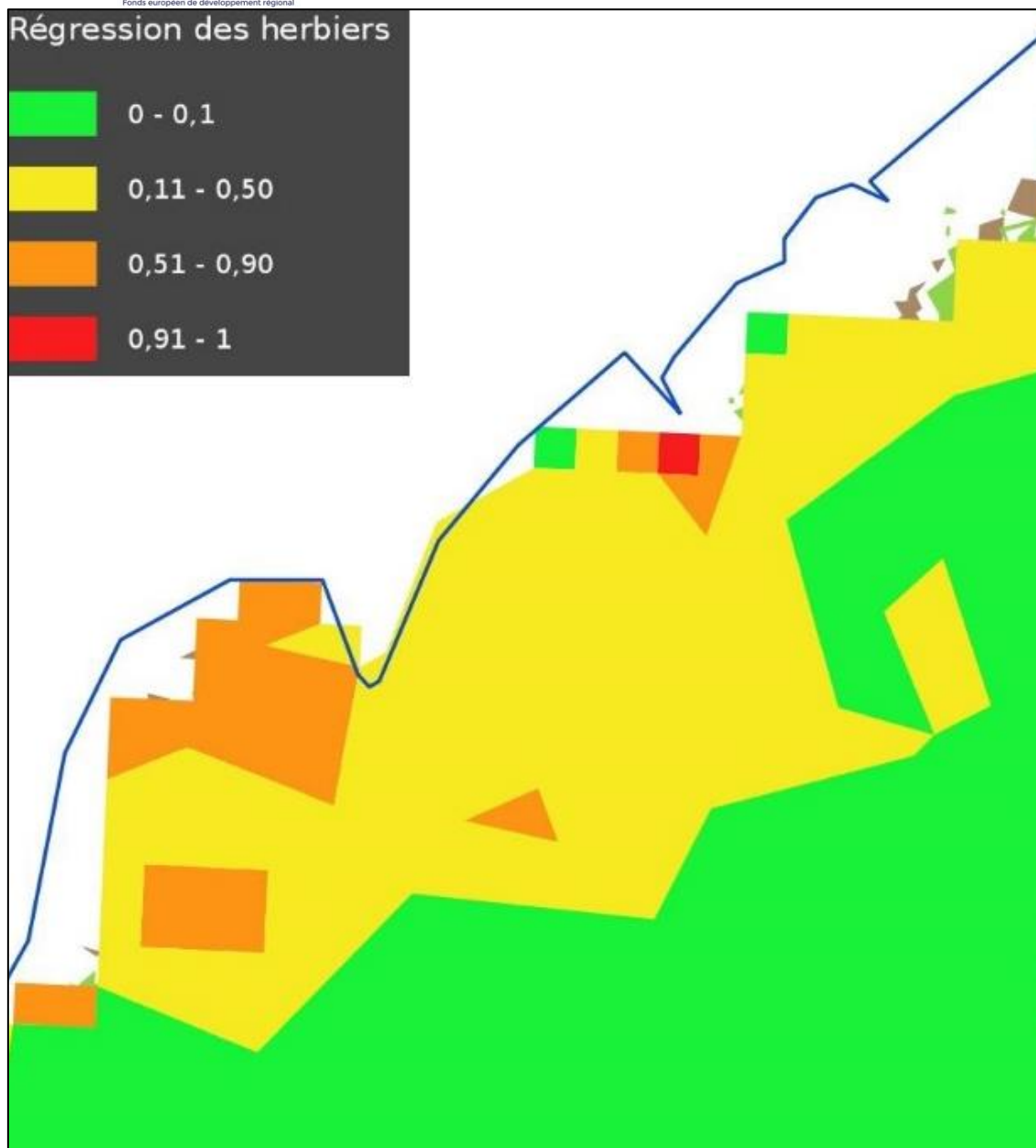


Illustration 5 - Cartographie de la régression des herbiers d'après le Réseau d'analyse surfacique habitats (SURFSAT) (Source : Holon *et al.*, 2015).

Conclusion

Rappel de la problématique du site

L'anse du Vieux Moulin est une petite plage de poche sujette historiquement à un phénomène d'érosion côtière chronique. Si les enjeux peuvent sembler faibles relativement à d'autres sites, la disparition progressive du patrimoine sédimentaire et naturel soulève néanmoins de vraies interrogations pour les gestionnaires. Ce site fait donc l'objet d'une réflexion au sujet de l'érosion côtière, en considérant à la fois l'usage récréatif de la plage mais aussi la sécurisation des personnes et du bâti, ainsi que la préservation des herbiers de posidonie. Cette plage est en outre

identifiée comme site « pilote » d'une démarche plus large de mise en valeur et de protection du littoral de Grimaud.

Représentativité transfrontalière du site

Le site de Vieux Moulin (Grimaud, Var) est représentatif des plages du littoral de l'espace Marittimo (plage de poche étroite partiellement aménagée). La présence d'enjeux touristiques et environnementaux, d'un aléa chronique à l'échelle séculaire, et la volonté d'initier une stratégie de gestion durable, constitue un site idéal pour l'expérimentation de moyens innovants de lutte contre l'érosion.

Bibliographie

- ACRI-IN (2018). Etude de la dynamique sédimentaire de la plage du Vieux Moulin. Rapport d'étude 1030-872 – R2. 111 p.
- Booij, N., Ris, R. C. et Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions. I- Model description and validation, *Journal of Geophysical Research*, 104(C4), pp. 7649-7666.
- CERC (1984). Shore Protection Manual - Volumes I et II, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- CISMA Environnement (2017). Etude avant-projet pour la poursuite du dragage dans la zone avant-port de Grimaud – Prédimensionnement et planification des travaux de dragage. Rapport 2017S35. 20 p., 2 ann.
- Département du Var (2011). Schéma Départemental de la Mer et du Littoral. 252 p., 5 ann.
- Département du Var (2017). Atlas de l'évolution diachronique du littoral varois (1924-2014).
- Eurofins (2012). Sable Vieux Moulin – Rapport d'analyse granulats. 3 p.
- Holon F., Boissery P., Guilbert A., Freschet E., et Deter J. (2015). The impact of 85 years of coastal development on shallow seagrass beds (*Posidonia oceanica* L. (Delile)) in South Eastern France: A slow but steady loss without recovery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, pp. 204-212.
- In Vivo (2006). Etude pour la mise en valeur et la protection de la mer et du littoral. 22 p., 14 planches.
- Kulling (2017). Déformation du rivage et dérive littorale des plages du Golfe du Lion, Thèse de doctorat, Aix-Marseille Université, 281 p.
- Pons F, et Trmal C. (2018). WikHydro - MobiTC - Cerema DterMed/DREC/SRILH, PCI Inondations et Aléas Côtiers. Article consulté le 3 mars 2018 : <http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/MobiTC>
- Sogreah (2008). Etude pour la mise en valeur et la protection du littoral de Grimaud – Phase 1 – Analyse de la situation et de son évolution. 110 p.
- Stepanian A., Louisor J., Lecacheux S., Nicolae-Lerma A., et Pedreros R. (2017). Caractérisation de l'aléa submersion marine sur le périmètre régional Provence-Alpes-Côte d'Azur. Rapport final. BRGM/RP-66550-FR, 74 p., 58 ill., 9 ann., 1 CD.

Site de la plage du Veillat à Saint-Raphaël (Var, France)

Présentation du site

Localisation

La plage du Veillat est située en fond de baie de Saint-Raphaël, en bordure du golfe de Fréjus. (Département du Var). C'est une petite plage urbaine de 400 m de long, dans le centre-ville de la commune de Saint-Raphaël. Adossée au mur de soutènement de la promenade piétonnière et de la D559 (*alias* « Corniche d'Or » ; +4,7 m IGN69), elle est latéralement contrainte par deux ouvrages en enrochements, perpendiculaires au rivage (Illustration 8).

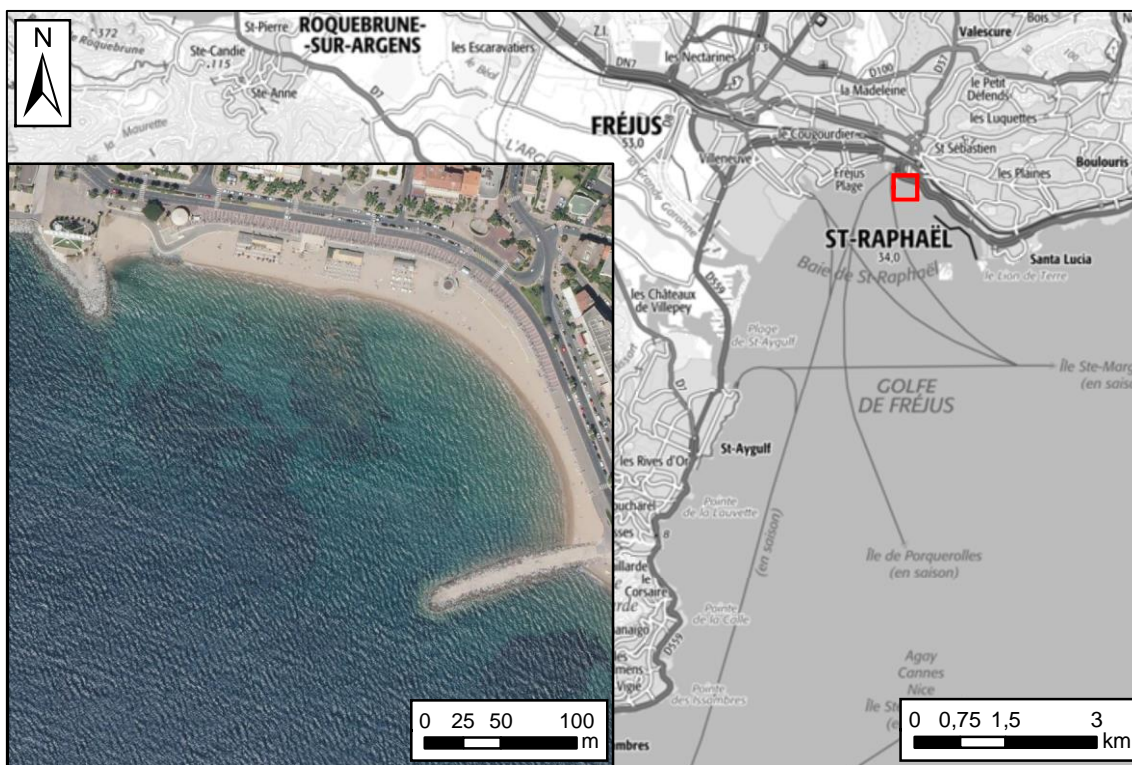


Illustration 6 - Vue aérienne et localisation de la plage du Veillat (Sources : IGN BD ORTHO® 2014 et SCAN EXPRESS®)

Caractéristiques physiographiques/écosystémiques

Des photographies anciennes permettent d'identifier des modifications significatives de la plage du Veillat. En effet, avant 1950-65, la plage semble enclavée dans une large encoche de la corniche, cette dernière étant en grande partie exposée directement à la houle. Au regard du bâti en arrière de la chaussée surplombant la plage, la plage ne paraît pas excéder une centaine de mètres (Illustration 7). Puis, les photographies aériennes historiques (1950 – 1965) montrent que la plage du Veillat isole complètement le mur de soutènement de la mer : le linéaire de rivage atteint alors 270 m (Illustration). Enfin, les aménagements réalisés avant 1972 donnent à la plage son aspect actuel.

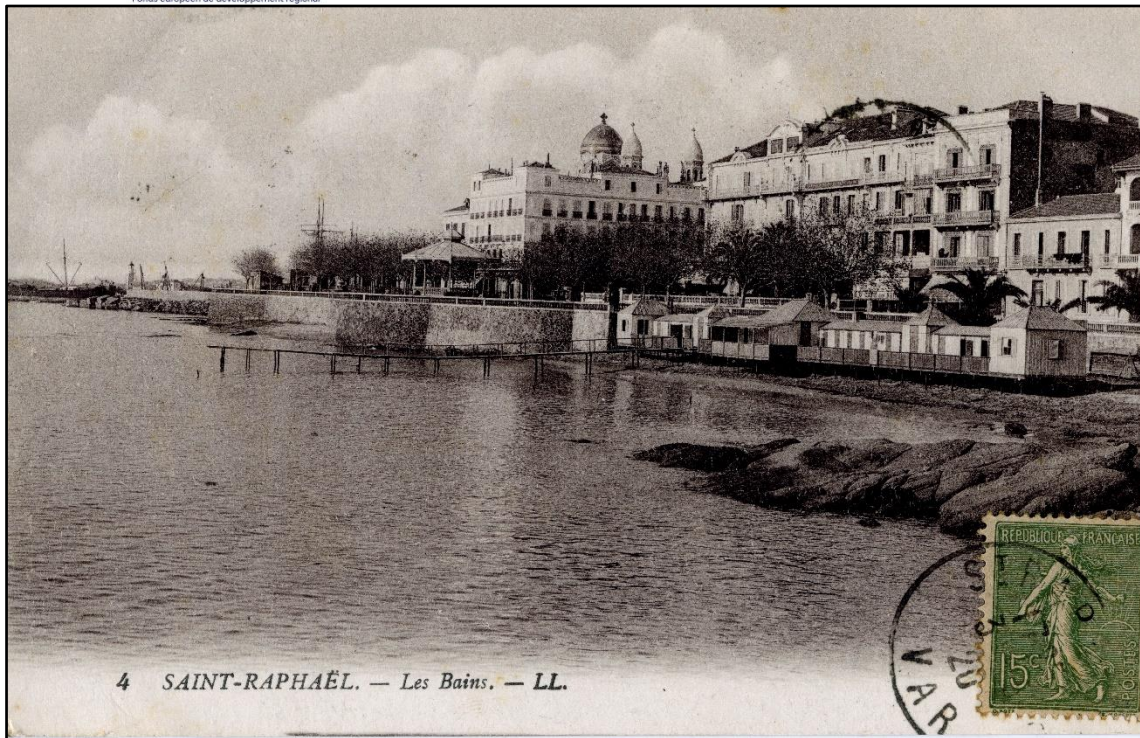


Illustration 7 - Photographie de la plage du Veillat reprise en carte postale, affranchie en 1920 (Source : Carvin, 2018)



Illustration 3 - Photographie aérienne historique de la plage du Veillat (Source : IGN)

Le Litto3D® PACA 2015 ainsi que la cartographie de la nature des fonds révèlent la présence d’affleurements rocheux dans la partie centrale de la plage immergée (Illustration et Illustration 3). En outre, les profils topo-bathymétriques révèlent une pente dans la partie sous-marine de l’ordre de 4,5 % (Illustration).



Illustration 4 - Carte topo-bathymétrique de la plage du Veillat (Source : IGN/SHOM Litto3D® 2015 PACA)

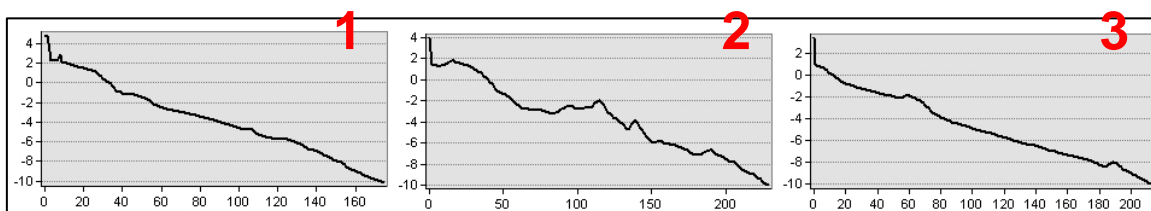


Illustration 5 - Profils extraits du Litto3D® 2015 PACA (cf. Illustration 4)

Cette plage urbaine n'entre pas dans un périmètre NATURA 2000, ni dans une Zone de Protection d'espèce particulière (ZNIEFF, ZICO, ZPS). En revanche, la partie immergée comporte de l'herbier de posidonie, habitat d'intérêt patrimonial et espèce protégée (Illustration 3).

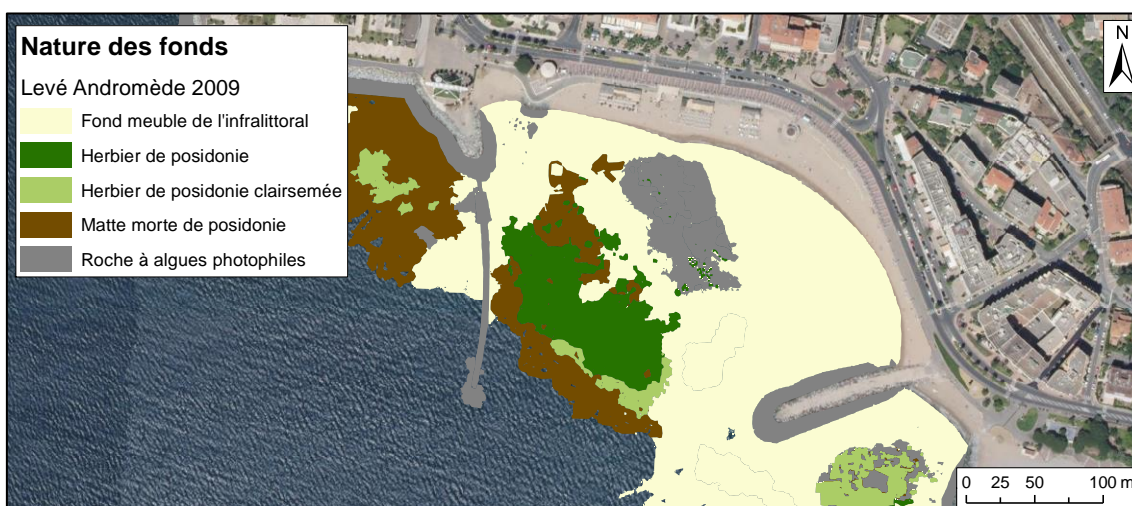


Illustration 6 - Cartographie de la nature des fonds (Source : Département du Var, 2011)

La cartographie de la nature des fonds actualisée en 2017 (SEMANTIC TS) révèle la présence d'herbiers de cymodocées absents ou non détectés en 2009 (Illustration).

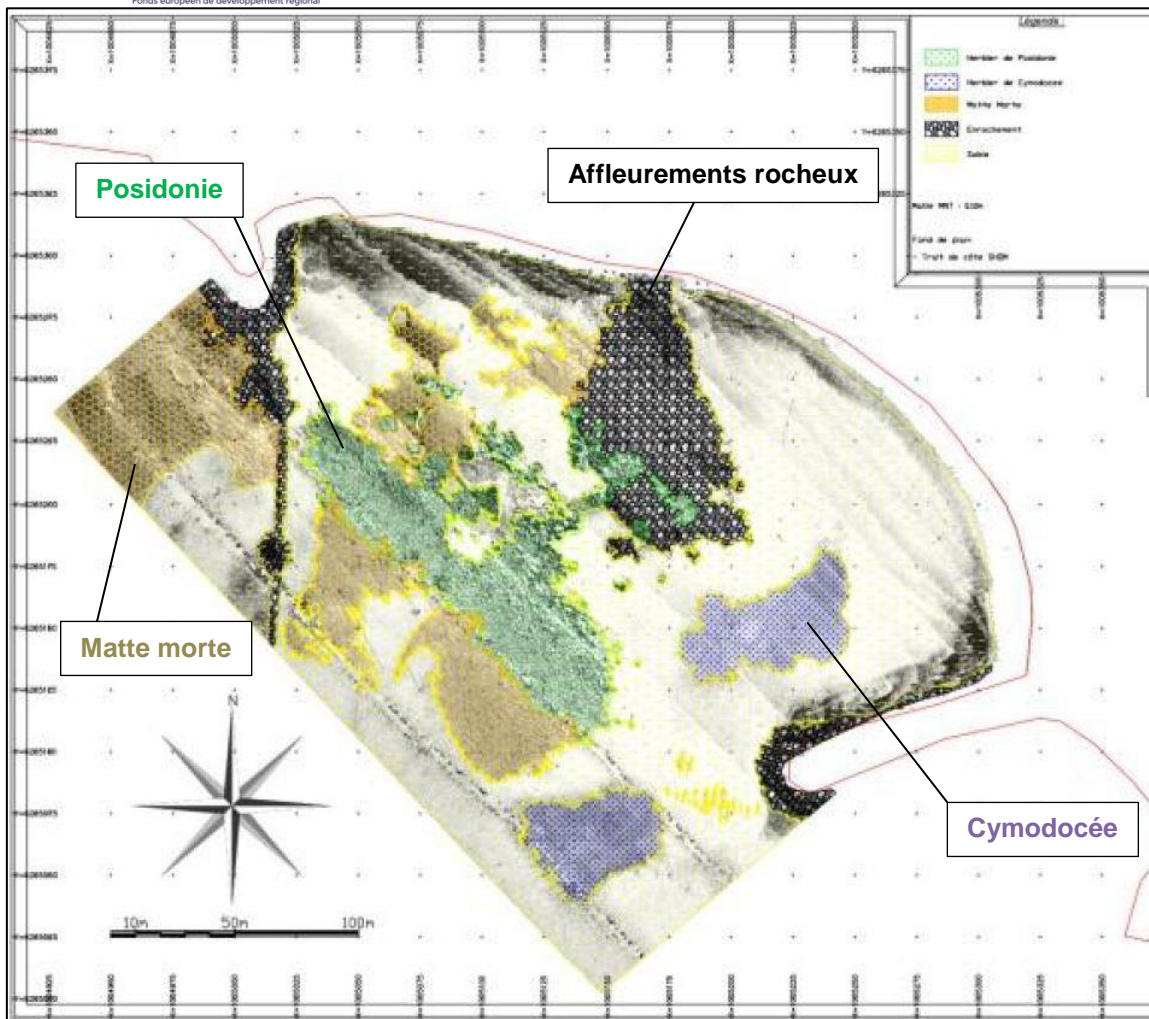


Illustration 7 - Cartographie de la nature des fonds au 2017/10/17 (Source : Corinthe Ingénierie, 2018)
 En 2018, des analyses granulométriques commandées par Corinthe Ingénierie sur des échantillons prélevés sur la plage aérienne, aux deux extrémités est et ouest ainsi qu'au centre de la plage, indiquent une décroissance du D_{50} d'est en ouest (0,9 mm, 0,5 mm, 0,4 mm). Dans la plage sous-marine, les échantillons montrent également une diminution de du D_{50} vers le large, de 0,9 mm (~-0,5 m IGN69) à 0,2 mm (~-2 m IGN69).

Ces informations corrént le plan de vagues reproduit par Corinthe Ingénierie (2018) où les houles de direction 180°N ont une hauteur significative plus importante à l'extrémité est de la plage, et s'affaiblissent vers l'est (Illustration).

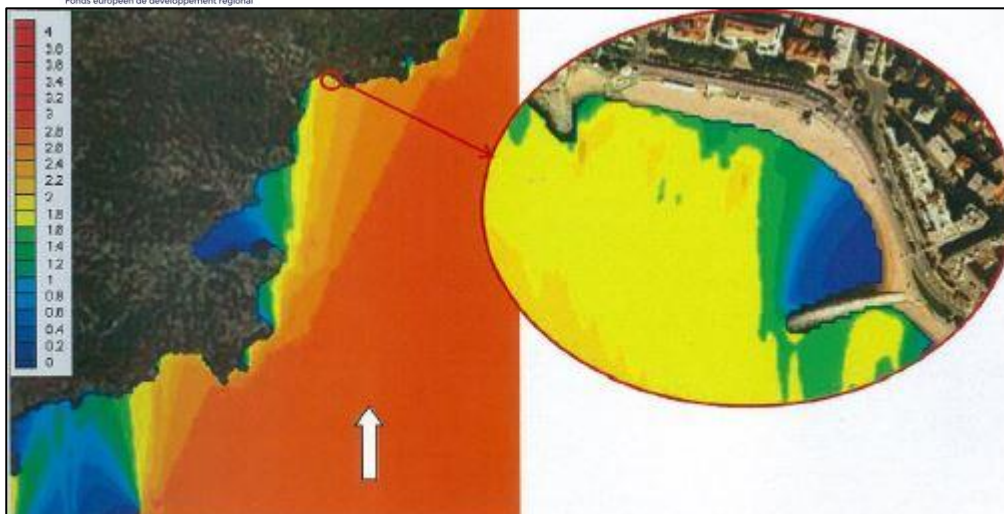


Illustration 8 - Propagation des houles de direction 180°N vers la plage du Veillat (Source : Corinthe Ingénierie, 2018)

Connaissances disponibles

La plage du Veillat est finalement peu étudiée : les principales connaissances acquises dans le domaine des risques côtiers et de la gestion du trait de côte sont rassemblées dans le tableau ci-dessous (Illustration 1). Ce sont ces données qui sont exploitées dans la suite du rapport pour qualifier le site MAREGOT de Saint-Raphaël.

Thème	Données	Nature des données	Période	Source	Bibliographie
Evolution du trait de côte	Traits de côte	Photographies aériennes	1972-2014	CD83	Département du Var (2017)
Evolution des plages	Topographie	LiDAR topo-bathy	2015	SHOM/IGN	
Evolution bathymétrique	Bathymétrie	LiDAR topo-bathy	2015	SHOM/IGN	
Submersion marine	Cartographie 1/25000	Cartes PDF	2017	BRGM	Stepanian <i>et al.</i> (2017)
Enjeux					

Illustration 9 - Connaissances disponibles sur le site du Veillat (Saint-Raphaël, Var). Les références bibliographiques complètes sont renvoyées en fin de rapport.

Etat des connaissances

Aléas côtiers

Evolution du trait de côte

Dans le cadre du projet MAREGOT, le Département du Var (2017) a réalisé un *Atlas de l'évolution diachronique du littoral varois (1924-2014)*. Dans ce travail, les variations du rivage sont abordées à travers l'étude de photographies aériennes pour différentes dates. Les lignes de rivages pour chaque année ont été digitalisées et sont comparées entre elles par une analyse diachronique quantitative menée grâce au logiciel MobiTC du Cerema (Pons & Trmal, 2018).

Le recul est considéré comme fort si les vitesses sont supérieures à 0,5 m/an, et modéré pour des vitesses comprises entre 0,1 et 0,5 m/an. La plage est considérée stable pour des vitesses d'avancée ou de recul de l'ordre de 0,1 m/an. L'avancée est modérée pour des vitesses comprises entre 0,1 et 0,5 m/an, et forte si les vitesses sont supérieures à 0,5 m/an.

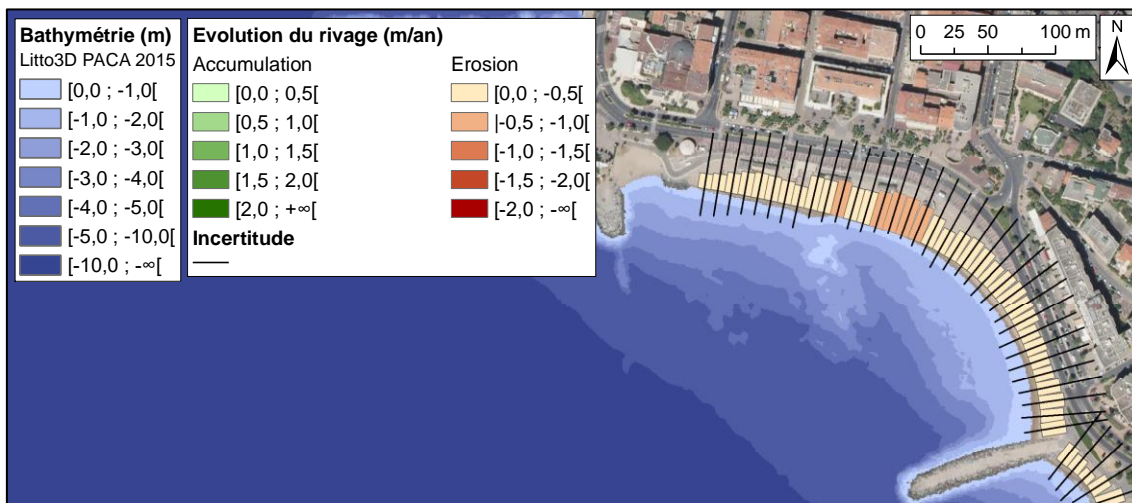


Illustration 10 - Evolution du trait de côte entre 1998 et 2014 (Sources : Département du Var (2017), IGN BD ORTHO® 2014 et SHOM/IGN Litto3D® PACA 2015)

Cette analyse met en évidence sur les 20 dernières années une dynamique érosive modérée (Illustration 3), qui tend toutefois à être plus forte au centre de la plage, sans doute en lien avec la présence des affleurements rocheux (cf. Illustration 3) qui peuvent induire de la réfraction et/ou de la diffraction. A noter que ces vitesses de recul peuvent éventuellement être biaisées par la stratégie de gestion des sédiments adoptée par la Ville de Saint-Raphaël : en effet, avant les premiers coups de mer hivernaux, les services de la ville procèdent chaque année à un retroussage des sables vers le haut de plage (Illustration). Cependant, aucun monitoring *in-situ* ne permet d'évaluer l'impact de cette manœuvre.



Illustration 11 - Sables "retroussés" sur le haut de plage (Source : SEMANTIC TS, 2017/10/17)

Submersion marine

N.B. : Le texte de cette section est adapté de Stepanian et al., 2017.

Pour affiner la compréhension des dynamiques de submersion sur la partie rocheuse du littoral de la région PACA, la DREAL PACA a souhaité produire un Porter à Connaissance de l'aléa submersion marine sur le périmètre régional. Ces données alimenteront aussi les Stratégies Locales de Gestion des Risques d'Inondations (SLGRI) des Territoires à Risques Importants d'Inondation (TRI) en matière d'amélioration de la connaissance du risque. Une cartographie des zones potentiellement affectées par un aléa de submersion marine d'occurrence centennale est ainsi produite à l'échelle régionale pour deux scénarios :

- un scénario, avec une élévation de +0,20 m du niveau marin actuel, défini comme « évènement moyen » ;
- un scénario à échéance 2100, avec une élévation de +0,60 m du niveau marin actuel, défini comme « évènement moyen avec prise en compte du changement climatique ».

La cartographie produite au 1/25000 ne permet pas de distinguer finement les espaces submergés sur cette plage de centre-ville : elle n'est donc pas reproduite ici.

Plans de prévention

Malgré le caractère chronique de l'érosion côtière et un potentielle avéré de submersion marine en tempête, la plage du Veillat ne fait pas l'objet d'une réglementation particulière de l'Etat en termes de prévention des risques littoraux. En particulier, il n'y a pas de Plan de Prévention des Risques Littoraux (érosion et/ou submersion marine) prescrits sur ce territoire. Cependant, comme sur tout le littoral français, un Porter à Connaissance des risques de submersion marine auprès des collectivités a été réalisé par les Services de l'Etat (DREAL PACA) dans le cadre de la mise en application de la Directive Inondation (Atlas des Zones Submersibles).

Enjeux présents

La plage du Veillat, de par sa localisation dans le centre-ville de Saint-Raphaël, constitue un atout socio-économique de premier plan pour la commune : 3 lots de plage (Illustration) sont en effet concédés jusqu'en 2020 (depuis 2009) afin d'être exploités au cours de la saison estivale (mai - octobre).

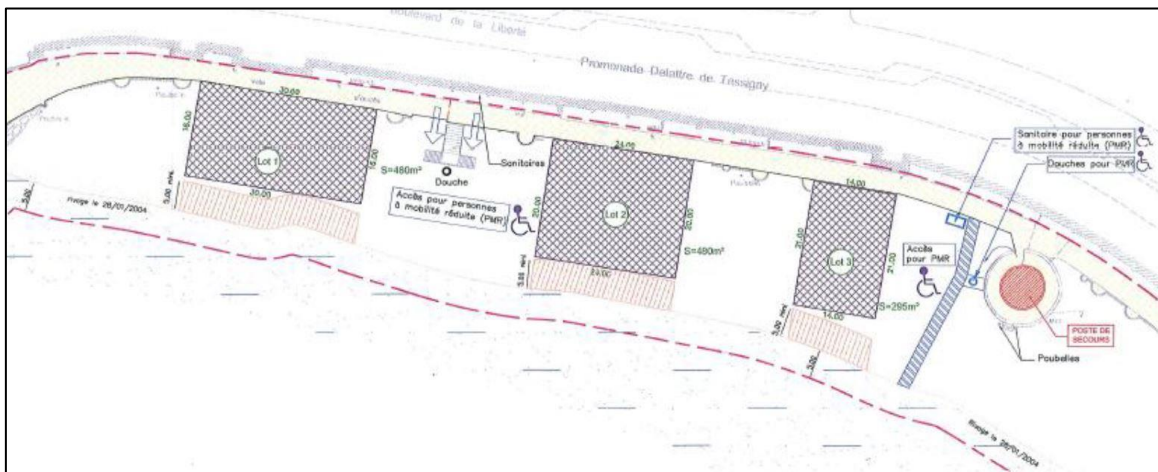


Illustration 12 - Plan des concessions de la plage du Veillat (Source : Corinthe Ingénierie, 2018)

Par ailleurs, les données du réseau SURFSTAT (Andromède Océanologie, Agence de l'Eau RMC) montrent une nette régression des herbiers dans la partie sous-marine de la plage (Illustration 5). D'après Holon *et al.* (2015), 48,7% de cette dynamique peut être reliée à l'artificialisation du littoral (impacts directs et indirects). Même s'il est difficile de relier avec certitude la régression de l'herbier à la construction des épis (qui modifient l'hydrodynamisme) et/ou à l'érosion de la plage (qui augmente la turbidité et/ou en recouvre les herbiers de sédiments), les gestionnaires s'interrogent sur les moyens à mobiliser pour enrayer cette érosion du patrimoine naturel.

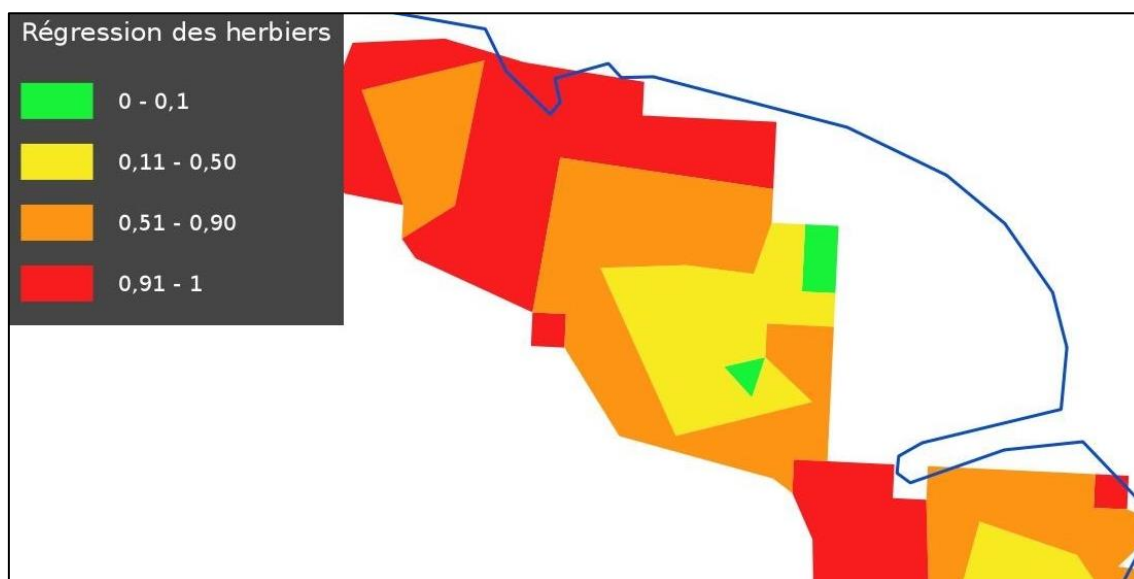


Illustration 13 - Cartographie de la régression des herbiers d'après le Réseau d'analyse surfacique habitats (SURFSAT) (Source : Holon *et al.*, 2015).

Conclusion

Rappel de la problématique du site

La plage du Veillat est une petite plage de poche aujourd'hui complètement artificielle, sujette à un phénomène d'érosion côtière chronique depuis plusieurs décennies. La disparition progressive du patrimoine sédimentaire et naturel soulève néanmoins de vraies interrogations pour les gestionnaires. Ce site fait donc l'objet d'une réflexion au sujet de l'érosion côtière, en considérant à la fois l'usage récréatif de la plage mais aussi la préservation des herbiers de posidonie.

Représentativité transfrontalière du site

Le site de Saint-Raphaël (Var, France) est représentatif des plages du littoral de l'espace Marittimo (plage de poche, urbaine et artificielle). La présence d'enjeux touristiques et environnementaux, d'un aléa chronique à l'échelle pluri-décennale, et la volonté d'initier une stratégie de gestion durable, constitue un site idéal pour l'expérimentation de moyens innovants de lutte contre l'érosion.

Bibliographie

Corinthe Ingénierie (2018). Protection des plages du Veillat. Rapport EDL-02-0. 35 p.

Département du Var (2011). Schéma Départemental de la Mer et du Littoral. 252 p., 5 ann.

Département du Var (2017). Atlas de l'évolution diachronique du littoral varois (1924-2014). 304 p.

Holon F., Boissery P., Guilbert A., Freschet E., et Deter J. (2015). The impact of 85 years of coastal development on shallow seagrass beds (*Posidonia oceanica* L. (Delile)) in South Eastern France: A slow but steady loss without recovery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, pp. 204-212.

Pons F, et Trmal C. (2018). WikHydro - MobiTC - Cerema DterMed/DREC/SRILH, PCI Inondations et Aléas Côtiers. Article consulté le 3 mars 2018 : <http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/MobiTC>

Carvin M. (2018). Article consulté le 27 mars 2018 : <https://www.geneanet.org/cartes-postales/view/5906785#0>

Stepanian A., Louisor J., Lecacheux S., Nicolae-Lerma A., et Pedreros R. (2017). Caractérisation de l'aléa submersion marine sur le périmètre régional Provence-Alpes-Côte d'Azur. Rapport final. BRGM/RP-66550-FR, 74 p., 58 ill., 9 ann., 1 CD.

Site de la Riviera du Levant (Ligurie, Italie)

Présentation du site

Cadre géographique

La zone se trouve dans l'extrême partie orientale de la Ligurie et comprend la bande du versant ligurien-tyrrhénien qui inclut la partie terminale de la province de Gênes et toute la province de La Spezia.

En mer, la zone pilote est délimitée à ouest par le promontoire de Punta Baffe, qui sépare la baie de Riva Trigoso de celle de Moneglia. A l'Est, elle s'étend jusqu'à la région Toscane, au niveau de Marinella di Sarzana. La partie de côte s'étend sur environ 65 km et est répartie en sept unités physiographiques (Illustration 1).

Cadre géologique et géomorphologique

La zone choisie est marquée par une hétérogénéité importante dans les caractéristiques géologiques et morphologiques.

Du point de vue géologique, la zone appartient à un segment des Apennins septentrionaux, dont les caractéristiques géologiques sont complexes, avec une gamme extrêmement ample de formations rocheuses. D'Ouest en Est, les formations rocheuses émergent en séquence. Elles sont dues aux unités tectoniques des Ligurides internes, du Super-groupe de la Vallée de Vara, des Ligurides externes, et de la Nappe Toscane (Abbate 1969 ; Abbate *et al.*, 2005). Ces unités sont formées de successions de formations sédimentaires et ophiolitiques, exposées le long de la côte à proximité des têtes des nombreux promontoires ou le long des fréquents bouts de côte rocheuse (Terranova 1987).

Du point de vue géomorphologique, la zone qui s'étend de Moneglia à Portovenere est caractérisée par une succession de bassins côtiers d'ampleur modeste, en raison de la présence de la ligne de partage des eaux très proche de la côte (les altitudes maximales varient entre environ 400 et 800 m au-dessus du niveau de la mer).

Les bassins versants les plus amples sont le bassin du Torrent Castagnola (25 km²) auprès de Deiva Marina et celui du Torrent Ghiararo (15 km²) à Levanto. La séquence de bassins côtiers a des versants très escarpés, avec des cours d'eau brefs et de régime torrentiel, caractérisés souvent par des parcours très conditionnés par la tectonique.

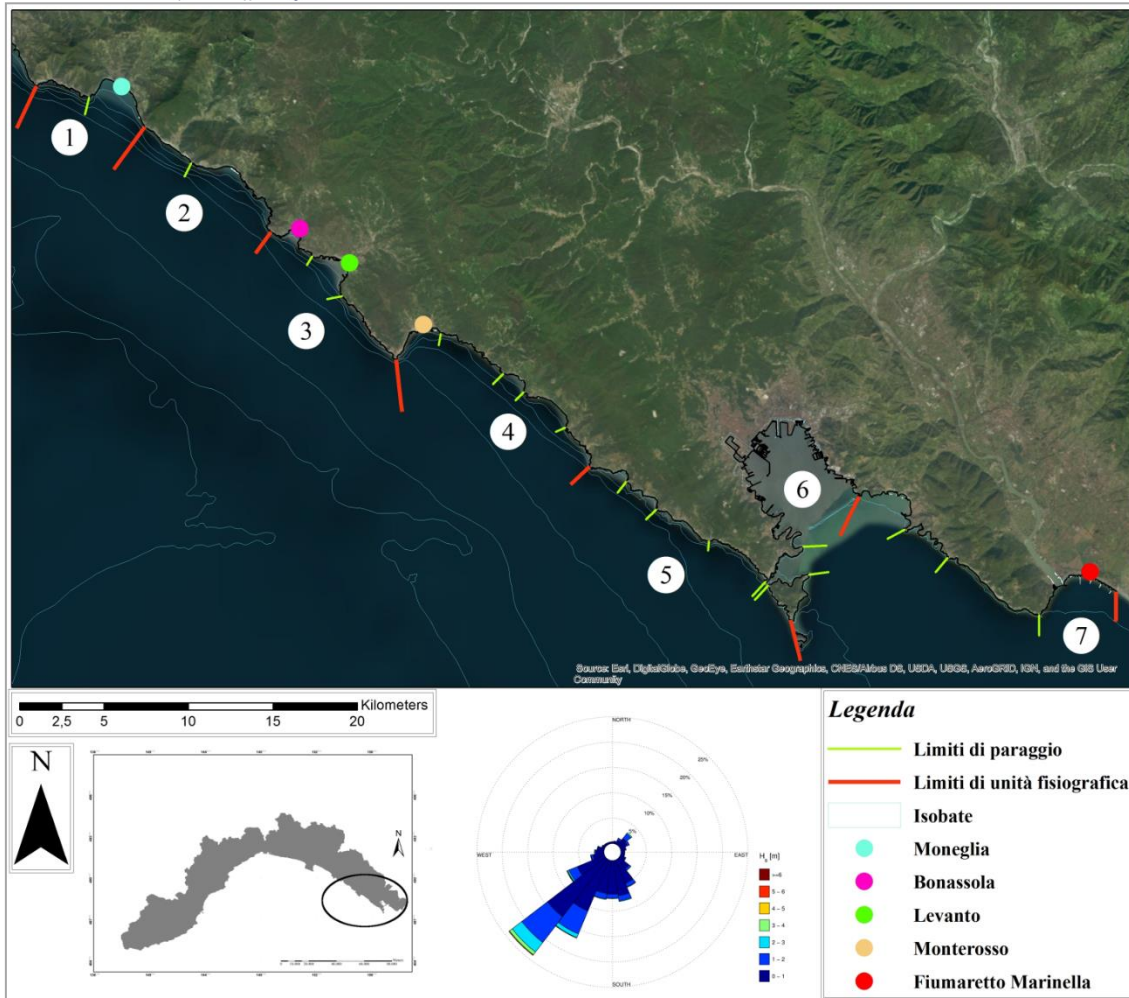


Illustration 1 - Site pilote ; Unités physiographiques : 1 - Punta Baffe - Punta Rospo ; 2 - Punta Rospo - Punta Monte Grosso ; 3 - Punta Monte Grosso - Punta Mesco ; 4 Punta Mesco - Capo Monte Negro ; 5 Capo Monte Negro – Ile Palmaria ; 6 Ile Palmaria – Golfe de La Spezia ; 7 Golfe de La Spezia – Limite avec la Toscane ; Diagramme polaire du climat des vagues.

A proximité du littoral, il y a des plaines alluviales côtières qui, dans les parties terminales, ont permis le développement de plages. En continuant vers la partie orientale extrême de la région, la continuité des caractéristiques morphologiques est interrompue par l'apparition du Golfe de La Spezia et de la partie terminale de la Vallée du Fleuve Magra. Les deux zones se trouvent au niveau de dépressions d'origine tectonique allongées vers la direction nord-ouest et sud-est (Raggi 1985 ; Giammarino& Giglia 1990). Dans ces zones il y a des vallées plus amples, à l'intérieur desquelles les apports fluviaux ont développé des milieux de plaine alluviale délimités vers l'embouchure par des zones de plage.

Les caractéristiques et l'évolution de la morphologie côtière sont étroitement liées à l'hétérogénéité élevée des caractéristiques lithologiques, stratigraphiques, et structurelles des formations rocheuses que l'on rencontre le long de la côte et à l'action de la houle (Terranova 1987).

En fonction de la différente exposition aux vagues, des caractéristiques stratigraphiques, et du degré de fracturation, les parois des falaises peuvent manifester des processus d'érosion sélective et des phénomènes de chute de blocs rocheux (éboulements, basculements, glissements plans et banc-sur-banc) à cinématique rapide (Cevasco 2007). Aux pieds des falaises les plus instables, on

observe fréquemment la présence de vastes accumulations de matières charriées mobilisables par la houle.

Grâce aux processus de dérive littorale, elles représentent souvent un élément important d'entrée sédimentaire des plages qui sont à l'intérieur de petits golfes enfermés entre des promontoires rocheux. Le long de la frange côtière concernée on observe, en outre, la présence de phénomènes d'éboulement à cinématique lente et très lente, dont le pied s'étend jusqu'à la ligne de côte. Les deux exemples les plus représentatifs sont l'éboulement de Lemeglio, près de Deiva Marina, et l'éboulement de Guvano qui se trouve à proximité de Vernazza, dans le territoire du Parc National des Cinque Terre (De Stefanis *et al.*, 1978 ; Federici *et al.*, 2001 ; Cevasco 2007 ; Raso *et al.*, 2016).

Du point de vue de la morphologie côtière, dans la zone pilote on a la prédominance des morphologies typiques de la côte à falaises hautes, en alternance avec des portions découpées de falaises raides et criques occupées par des plages de poche (Terranova 1987). Dans la partie plus orientale, au niveau de l'embouchure du fleuve Magra et des zones près de la région Toscane, les côtes rocheuses laissent l'espace à des plages étendues. Des campagnes granulométriques antérieures ont montré que les principales plages présentes dans la partie qui va de Punta Baffe à Ile de Palmaria sont caractérisées par des textures sablonneuses avec des graviers, tandis que pour les littoraux à proximité de la Toscane la texture est celle de la classe des sables.

La houle est caractérisée par les mers provenant de sud-ouest (Libeccio), tandis que les vagues secondaires viennent du sud (Midi). Les agitations qui viennent de sud-est sont peu incisives sur les dynamiques côtières, car le *fetch* est limité (Ferrari *et al.*, 2014). Conformément à L'*Atlante delle Spiagge Italiane* (Fierro *et al.*, 1999), la dérive littorale est dominée par une direction d'ouest en est, à la différence de la côte entre le fleuve Magra et la limite avec la Toscane où la dérive est dirigée vers le sud.

Côte entre Punta Baffe et Punta Monte Grosso

Côte haute

Au niveau des promontoires rocheux qui délimitent le Golfe, on observe des séquences de falaises rocheuses hautes et très raides, parfois verticales ou sub-verticales. Dans les parties de falaise active, on trouve des morphologies et des éboulements importants dus à l'érosion sélective provoquée par la houle sur les bancs de grès alternés à des paquets de schistes (Formation des *Arenarie del Gottero*). En raison de l'action érosive importante de la houle sur les couches alternées argileuses qu'on rencontre entre les bancs de grès, en position verticale (Illustration 2A), la falaise active est périodiquement concernée par des phénomènes de glissement ou d'écroulement de plaques et blocs de grès (Illustration 2B). Les processus d'érosion sélective ont parfois favorisé la formation de grottes entre les strates avec l'ouverture de boyaux et de galeries par la houle (Terranova 1987). Aux pieds des falaises actives, on trouve souvent des accumulations et des cônes de matières charriées produites par les éboulements.



Illustration 2 – Falaise active auprès de Punta Baffe (A) et exemples d'éboulements dus à glissement planaire (B) (de Région Ligurie, photos prospectives de la côte 2010)

La crique de Deiva s'étend de Punta Rospo jusqu'aux parois des Apicchi. Dans cette partie de falaises, la formation des *Arenarie del Gottero* apparaît à travers les surfaces de stratification qui s'immergent vers la mer, avec des inclinaisons variables entre 40° et 70°, géométriquement superposées à leur tour à la formation des *Scisti Zonati*. Les amas rocheux présents qui se succèdent le long de la côte sont concernés par de nombreux systèmes de fractures et failles qui les préparent au développement de mécanismes d'instabilité due à éboulement (Terranova 1987). La bande côtière entière est, en outre, exposée de front à la houle, qui exerce une activité érosive importante au niveau des bandes les plus fracturées entre les couches de schistes de la formation des *Arenarie del Gottero*.

Côte basse

La plage de Moneglia présente certaines des vulnérabilités déjà décrites. La zone côtière est très anthropisée, car il y a trois barrières parallèles d'environ 1,0 m de haut, situées peu loin de la ligne de rivage et l'arrière plage est limitée par le tissu urbain. Des études récentes ont démontré la faible fonctionnalité des ouvrages, car le littoral est en érosion et les ouvrages eux-mêmes sont en conditions de conservation précaire. En outre, un processus d'affaiblissement au pied des barrières a été identifié. Ce processus pourrait déterminer un effondrement de la structure.

Le littoral de Deiva Marina, différemment de celui de Moneglia, ne présente pas d'ouvrages de défense et est dans une position très avancée. Le maintien du littoral est essentiellement dû à son orientation, qui permet de recevoir de front la houle principale, de manière à limiter le transport latéral et les pertes sédimentaires associées (Fierro *et al.*, 2015). Cependant, tout en n'excluant pas la perte de matériau, l'équilibre morpho-dynamique est assuré par les apports naturels.

Côte entre Punta Monte Grosso et Punta Mesco

Côte haute

Le Golfe de Levante se trouve dans la partie de côte délimitée à l'Est par le promontoire de M. La Guardia et à l'Ouest par le promontoire de Mesco. Dans le promontoire oriental, du golfe on observe des falaises en serpentins pouvant atteindre 130 m de haut dans les parties les plus élevées. Dans l'ensemble, la côte à falaises se présente découpée en raison de l'intense activité érosive exercée par les vagues au niveau des zones de failles et bandes caillouteuses ou de zones de contact avec les gabbros. Le cap oriental est constitué du Promontoire du Mesco, caractérisé par une forme rectangulaire et étendu en moyenne 1,5 km en haute mer. Il s'agit d'un promontoire

formé d'un grand noyau d'ophiolites surmontés de formations sédimentaires et concerné par une activité dynamique géomorphologique. De hautes falaises façonnées en *Arenarie del Gottero* (Illustration 3A) se succèdent dans le segment qui se trouve sur le côté oriental du Golfe de Levanto. Les falaises sont assujetties à une érosion sélective et à l'affaiblissement au pied par la houle. L'action de la houle est marquée au niveau de bandes de roche plus fracturées ou à l'intérieur des entre couches de schiste. Cela provoque des phénomènes de glissements qui évoluent rapidement en écroulements ou renversements. Dans les parties les plus élevées des parois rocheuses on observe les nombreux côtés de détachements des phénomènes d'instabilité (Terranova 1987). Le long du versant du promontoire sur le Golfe de Monterosso on observe des accumulations étendues et puissantes de matières charriées (Illustration 3B), résultant de mouvements d'éboulement actifs dont les niches de détachement peuvent parfois atteindre 175-180 m de haut (Terranova 1987).

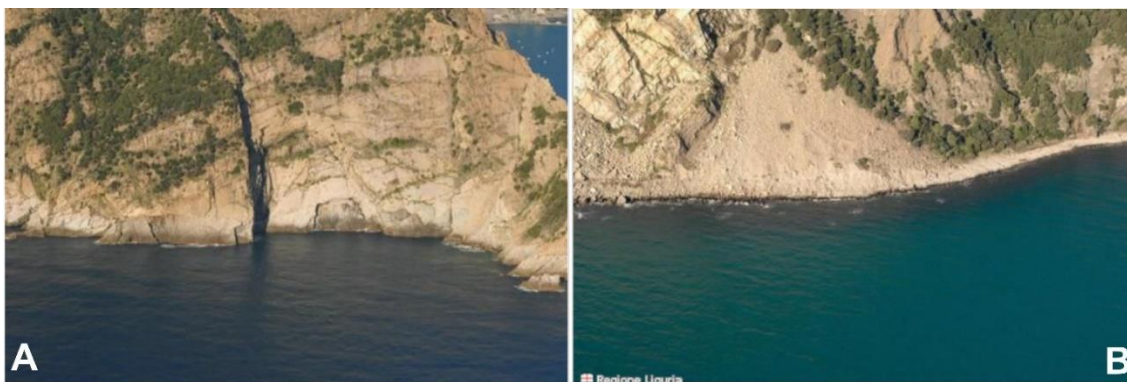


Illustration 3 – Falaises actives au niveau du Promontoire du Mesco (A); accumulations de matières charriées à la base des falaises dans le versant du Promontoire du Mesco sur le Golfe de Monterosso (B) (Région Ligurie, photos prospectives de la côte 2010)

Côte basse

Dans l'unité physiographique 3, qui s'étend de Punta Monte Grosso à Punta Mesco, il y a deux milieux, celui de Bonassola et celui de Levanto. Le premier est très étroit, en raison de la présence des deux promontoires saillants, qui déterminent une perte faible de matériau et une protection partielle des agitations des houles (Mucerino *et al.*, 2016).

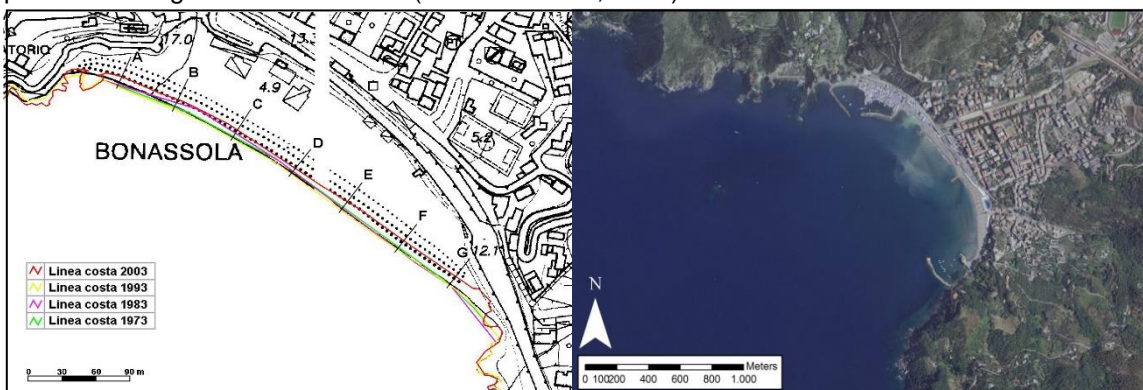


Illustration 4- Gauche : Variation de la ligne de rive de la plage de Bonassola; Droite: la plage de Levanto

Des études récentes (Illustration 4) ont montré la lente tendance érosive qui a concerné la plage émergée de 1973 à 2003 (Balduzzi *et al.*, 2014). Probablement, le recul est dû à la réduction des apports fluviaux qui est une conséquence de l'urbanisation de la zone côtière. La plage présente une granulométrie gravelo-sableuse et une forte pente des profils topographiques. Cela rend vulnérable le tissu urbain vis-à-vis des vagues extrêmes.

La plage de Levanto présente des caractéristiques complètement différentes de celles de Bonassola. Le littoral est exposé surtout aux vagues et est constitué de différents types d'ouvrages de défense nécessaires pour le maintien de l'équilibre morphodynamique (Schiaffino *et al.*, 2015). Cette plage, qui s'étend sur 900 mètres de long, est limitée latéralement par deux promontoires saillants : Punta Mesco et Punta Levanto. La présence de trois épis interrompt la continuité de la partie de côte, ultérieurement influencée dans son évolution par les restes de deux défenses parallèles submergées, mises en œuvre au niveau des deux plages occidentales.

La granulométrie de la plage émergée est essentiellement formée de sables et graviers, tandis que la plage submergée, au-delà de la zone de brisant, est sableuse. Dans cette partie de côte, il y a un port de plaisance également utilisé par les pays limitrophes. Des études récentes ont montré que le transport solide fluvial du torrent Ghiararo et ses ouvrages de défense, rigides aussi bien que déformables, déterminent un équilibre morpho-dynamique modéré qui rend le littoral de Levanto le plus ample du site pilote. Il faut quand même considérer la condition de dégradation des ouvrages, car des programmes d'entretien ordinaire n'ont pas été planifiés.

Partie de côte entre Punta Mesco et Capo Monte Negro

Côte haute

Il s'agit d'une partie de côte rocheuse orientée à nord-ouest et sud-est ayant un développement linéaire d'environ 20 km entre le promontoire de Punta Corone (Illustration 5A) et Punta Persico et faisant partie du territoire du Parc National des Cinque Terre.

Pour toute la quasi-totalité de son développement, elle est caractérisée par des côtes très raides, parfois verticales, formées de formations sédimentaires relatives à la Nappe Toscane. Les rares plages, formées de dépôts caillouteux et graveleux, sont courtes et étroites et sont alimentées périodiquement par des matériaux d'éboulement ou par le transport des cours d'eau. La bande de côte est exposée de front aux vagues de Libeccio, de Sirocco et du Sud, même si en moindre intensité pour les dernières. Souvent la côte est très haute et raide, avec des falaises qui atteignent parfois 100 m de haut. L'orientation et les caractéristiques structurelles des falaises actives ainsi que les caractéristiques géométriques du réseau de fracture contribuent à déclencher des phénomènes d'instabilité, tels que les écroulements, les glissements de plaques ou glissement-dièdre (Cevasco 2007). On observe des niches d'arrachement fréquentes dues à des phénomènes précédents ou en cours. Aux pieds des parois rocheuses on rencontre souvent des amas de rochers qui émergent de l'eau ou peu submergés qui témoignent du rôle fondamental joué par la houle dans le déclenchement de phénomènes ébouleux, surtout pendant les tempêtes les plus intenses.

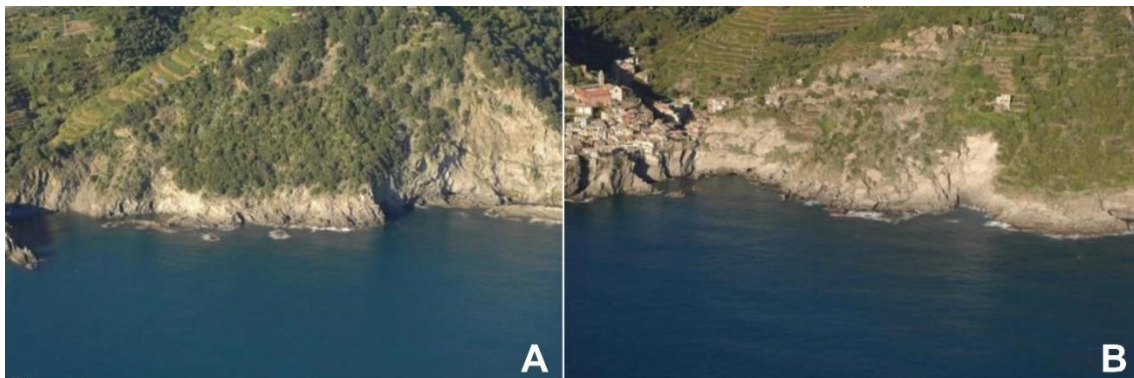


Illustration 5 – Partie de côte auprès de Punta Corone (A); éboulement à La Tagliata auprès de Vernazza (B).

Des accumulations charriées et des niches de détachement actives, résiduelles, et inactives sont très répandues le long de toute la partie de la côte. Un exemple typique est représenté par l'éboulement de Vernazza, en localité Tagliata, où l'on peut observer des glissements banc-sur-bancs répétés dans les *Arenarie del Macigno*, avec une formation de cônes de blocs soumis à l'érosion marine (Illustration 5B).

Le long de la partie de côte en question on observe aussi des amas ébouleux résiduels et inactifs d'une certaine importance, tels que ceux situés dans les localités de Macereto, Rodalabia, et Guvano (De Stefanis *et al.*, 1978 ; Federici *et al.*, 2001 ; Cevasco 2007).

Côte basse

A l'intérieur de cette zone il y a peu de littoraux sableux, et parfois de nature éphémère. La seule partie de côte basse ample et stable est celle des environs de Monterosso (Illustration 6). Celle-ci est fortement conditionnée par les interventions humaines, en particulier dans la cellule orientale de Fegina. Même si plusieurs interventions ont été faites sur cette plage au cours des dernières années, d'importants signaux de vulnérabilité sont évidents. En fait, la présence du terre-plein semble soustraire la plage de l'alimentation naturelle résultant de l'érosion des falaises du promontoire du Mesco (Fierro *et al.*, 2015). Dans la plage du centre historique, la dynamique est très réduite, en raison des ouvrages de défense et du quai d'accostage.



Illustration 6- Région de Monterosso

Comme dans d'autres cas, les ouvrages de défense sont en conditions de conservation précaires et sont peu fonctionnels. Les plages restantes ont été toujours caractérisées par une condition précaire dépendant de facteurs contingents. Toutes les plages des bourgs restants de Vernazza, Corniglia, Manarola, et Rio Maggiore ont désormais disparu ou sont réduites à un dépôt résiduel de cailloux et blocs surtout en raison de la conformation des anses empêchant la stabilisation des littoraux et facilitant le transport solide littoral.

Partie de côte entre Capo Monte Negro et la Toscane

Côte haute et côte basse

La partie de côte suivante est caractérisée par la présence du golfe de La Spezia (Illustration 7). En négligeant la rade portuaire, complètement anthropique, les parties côtières principales sont Portovenere, San Terenzio, et Lerici.

La partie principale à côte haute est celle qui va de Punta Persico à Portovenere, entièrement aménagée sur la série de la Falda Toscana, qui émerge avec une succession serrée de formations

sédimentaires. Dans certains secteurs, les falaises atteignent des hauteurs maximales de 300 m. Les parties concernées par des phénomènes de déséquilibre géomorphologique sont nombreuses, comme montré par les différentes niches inactives et actives, les amphithéâtres de vidange, et les vastes accumulations de matières charriées qui atteignent la ligne de brisement des vagues et qui sont concernées par l'érosion et le transport littoral par les tempêtes (Terranova 1987).

Si on exclut Portovenere, protégée par l'île de Palmaria, les littoraux sont exposés à une sédimentation dynamique importante et sont très anthropisés. En outre, la réduction des apports a conditionné drastiquement la stabilité de la côte.

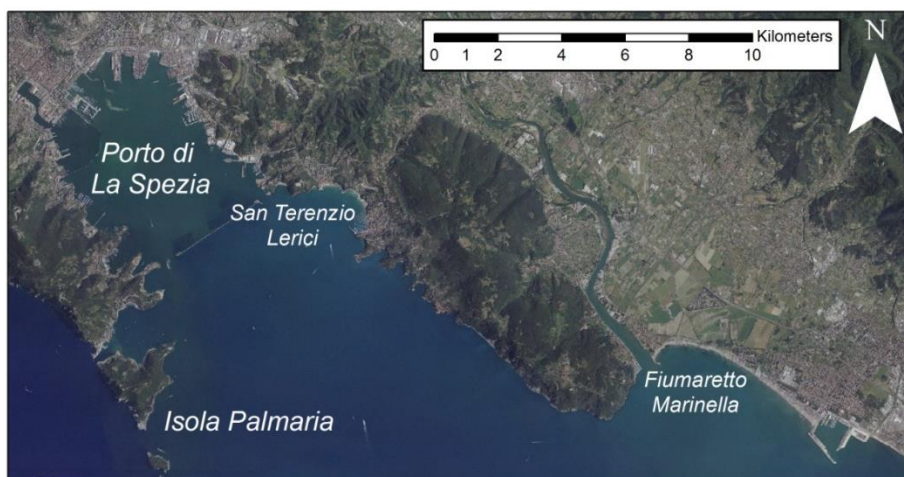


Illustration 7 - Golfe de La Spezia et Embouchure du Fleuve Magra

La dernière unité physiographique (7) est constituée des plages de Fiumaretta et Marinella, qui ont atteint un degré de stabilité modérée, car elles sont concernées par les interventions récentes de rétablissement. En fait, en 2011 un rechargement de 10 000 m³ a été réalisé avec du matériel dragué de l'embouchure du fleuve Magra. Par le passé cette zone a subi une profonde crise érosive (Illustration 8), avec un recul important le long de toute la partie ligurienne (Perna *et al.* 2017).

Aujourd'hui, la partie de côte se présente en avancement par rapport à 2010 moyennant les ouvrages de défense, parallèles ainsi que perpendiculaires qui rendent le littoral très anthropique. En outre, étant donné le secteur de vent de travers et les dimensions du fetch, ce littoral est assujéti à de forts phénomènes météorologiques marins qui dans les années précédentes ont endommagé les structures présentes sur les plages.

Finalement, les plus grandes vulnérabilités de cette zone sont étroitement liées au transport de matières organiques et de polluants par le cours d'eau. La proximité de l'embouchure du fleuve Magra génère, pendant les inondations, une accumulation de matériaux et d'ordures de différent type qui rendent ces plages en conditions désastreuses.



Illustration 8 - Evolution de la ligne de rive 1878 - 2010

Caractéristiques relatives à l'écosystème

Pour l'étude de l'écologie des fonds marins-côtiers on s'est référé à l'Atlas des Habitats Marins de la Ligurie (Diviacco & Coppo, 2006). L'Atlas donne une base de connaissances des prairies et peuplements principaux et des prairies de posidonie océanique. En ce qui concerne les phanérogames marines, il faut souligner que la présence de *Posidonia oceanica* est réduite par rapport aux autres provinces de la Ligurie, car elle a une extension d'une centaine d'hectares.

Les herbiers sur des mattes plus étendues se trouvent à Moneglia, Monterosso, et Levanto, respectivement de 23 hectares, 20 hectares, et 37 hectares. Les dimensions réduites sont dues probablement aux dimensions exigües des plages submergées qui limitent les possibilités d'enracinement des phanérogames. En résumé, la partie côtière est 81 km de long, dont 9 km seulement sont bordés par des prairies de *Posidonia oceanica*, à savoir 11%.

L'extension des herbiers de *Cymodocea nodosa* est étroitement liée au développement ou à la régression des herbiers de *Posidonia Oceanica*. La *Cymodocea nodosa* est considérée une espèce secondaire dans la série évolutive climatique des prairies de *Posidonia oceanica* (Molinier et Picard, 1952). Cette espèce occupe 7 km (8%) de la partie côtière et est enracinée à l'abri de petites baies de dimensions modestes (40 hectares au maximum).

La présence des peuplements typiques du coralligène est sporadique et de dimensions réduites. De petits noyaux ont été cartographiés auprès de Punta Monte Grosso, Punta Mesco, Capo Monte Negro, et auprès des îles de l'archipel de La Spezia.

Etat de la connaissance

Dans la zone pilote, les premières recherches concernant la dynamique géomorphologique de la côte remontent à la fin du dernier siècle. Pour la plupart, il s'agit d'études centrées sur l'identification et l'analyse des caractéristiques géomorphologiques de la bande côtière ou d'enquêtes sur les mouvements ébouleux individuels résiduels et inactifs (De Stefanis *et al.*, 1978; Terranova 1987 ; Federici *et al.*, 2001).

Toutefois, des études et recherches plus détaillées sur les phénomènes d'instabilité qui concernent les parois des falaises sont peu diffusées et sont limitées à des zones individuelles. Les seules analyses approfondies des facteurs qui prédisposent et déclenchent des phénomènes côtiers d'instabilité sont disponibles pour la partie des Cinque Terre grâce à l'étude de Cevasco (2007),

qui a donné un cadre détaillé de la position et de la typologie des phénomènes éboulés concernant les falaises et leurs rapports avec les caractéristiques géologiques-structurales et avec les principaux ouvrages de défense sur la mer. Actuellement on dispose d'une cartographie assez détaillée de la distribution des phénomènes éboulés concernant la bande côtière réalisée au sein du projet (Inventaire des Phénomènes Eboulés en Italie) par ISPRA et la Région Ligurie.

Les seules informations qui concernent la propension à l'instabilité sont contenues dans la documentation relative au plan de bassin – extrait sur le risque hydrogéologique, rédigé en accomplissement aux dispositions du décret-loi n°180 du 11/6/1998, converti avec modifications dans la loi n. 267 du 03/08/1998, avec laquelle a été effectuée la cartographie du risque d'instabilité pour les côtes hautes. Toutefois, on souligne que les critères pour la détermination du risque d'instabilité utilisés dans les plans de bassin ne tiennent pas en compte le mouvement des vagues. Enfin Regione Liguria, dans le cadre du projet REMOVE, effectue le monitoring des déplacements de deux éboulements côtiers à lente cinématique (éboulement de Lemoglio, éboulement de Guvano).

Pour les côtes basses, des recherches disponibles détaillées sont disponibles sur des environnements spécifiques. Ces études sont centrées sur l'analyse de l'évolution morphodynamique et sur l'application des systèmes de monitoring afin d'identifier les vulnérabilités les plus importantes.

Dans le cadre du projet *BEACHMED-e / OptIMAL* (2005 - 2008) a été installé un outil de vidéo-monitoring pour l'évaluation et l'analyse de la plage et pour déterminer l'efficacité des ouvrages de défense sur le littoral de Levanto (AAVV, 2009). Successivement le Projet ResMAr (Giugno 2010 - Luglio 2013) a effectué le relevé, avec un système de vidéo-monitoring, du parage de Moneglia. Cette étude, générée dans le domaine du programme Maritime Italie-France, a prévu la mise en réseau d'un système intégré de vidéo-monitoring sur neuf sites d'enquête. (Brignone *et al.*, 2012).

Le PRIN (Programme de Recherche Nationale) 2010-2013, réalisé par l'Université de Gênes, a souligné l'évolution morphodynamique du parage de Bonassola. Pendant l'implémentation du projet, on a effectué des relevés bathymétriques avec cadence annuelle, des analyses des sédiments, en identifiant une lente tendance d'érosion du littoral. (Balduzzi *et al.*, 2014).

Enfin, récemment, la Région Ligurie a mis à disposition une analyse du rivage des années 1944 à 2015 sur tout le site pilote, réalisée grâce à la cartographie, relevés du terrain et techniques de télédétection. En outre ils sont disponibles des relevés topo-bathymétriques, pour des études de cas spécifiques, qui permettent d'évaluer l'évolution de la morphologie de la plage.

Conclusion

Synthèses des problématiques du site

Dans la zone retenue, en raison des facteurs géologiques et anthropiques, de l'augmentation de l'attrait touristique, l'érosion et le risque de glissements de terrain, représentent des phénomènes nécessitant une attention particulière. Comme souligné précédemment, la zone pilote présente nombreuses vulnérabilités et différentes conditions de risque, qui rendent le territoire côtier fragile et en déséquilibre. L'impact anthropique joue un rôle déterminant dans les dynamiques côtières des littoraux et dans plusieurs cas en détermine la dégradation. La réduction des apports sédimentaires, causés par l'urbanisation des zones côtières, a comme conséquence l'augmentation du déficit sédimentaire; en plus, l'entretien insuffisant ou la mauvaise réalisation des ouvrages de défense tendent à accélérer les phénomènes d'érosion en cours. L'interaction entre la dynamique géomorphologique des falaises rocheuses, des structures anthropiques et les activités touristiques déterminent des fréquentes conditions de risque géomorphologique.

Le système d'œuvres de mitigation présente dans la zone étudiée est le résultat d'une planification fragmentée et sectorielle, basée sur des ouvrages issus, d'une planification de période insuffisante et souvent réalisés pour limiter des situations d'urgence.

L'application d'une gestion intégrée de la côte pourrait réduire l'état de vulnérabilité présent, grâce aux analyses des vulnérabilités basées sur des études conduites à l'échelle du bassin qui puissent permettre une planification de programmes d'intervention pluriannuels (par exemple plans de rechargement ou de rétablissement / modification des ouvrages de défense).

Représentativité transfrontalière du site pilote

L'hétérogénéité morphologique et géologique de la côte et des bassins d'alimentation, la présence d'importantes structures anthropiques (établissements balnéaires, ports touristiques et un important port commercial) en plus des zones avec une élevée valeur culturelle / environnementale comme le territoire du Parco Nazionale delle Cinque Terre et les Parcs Régionaux de Portovenere et Montemarcello Magra, rendent la zone optimale pour la définition des méthodologies intégrées pour l'analyse de l'érosion côtière et des relatifs risques.

Dans une perspective de coopération, la zone est de plus stratégique car elle se trouve en continuité avec Region Toscane.

Bibliographie

- AAVV, (2009) - Beach Monitoring Results from BEACHMED-e/ OpTIMAL Project. Nuova Grafica Fiorentina.
- Abbate, E. (1969) - Geologia delle Cinque Terre e dell'entroterra di Levanto (Liguria orientale). Memorie della Società Geologica Italiana 8 (4): 923-1014.
- Abbate E., Fanucci F., Benvenuti M., Bruni P., Cipriani N., Falorni P., Fazzuoli M., Morelli D., Pandeli E., Papini M., Sagri M., Reale V. & Vannucchi P. (2005) - Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000, Foglio 248, La Spezia. Regione Liguria-Dipartimento Ambiente Edilizia e Lavori Pubblici, Servizio Politiche dell'Assetto Territoriale, Genova.
- Balduzzi I., Cavallo C., Corradi N., & Ferrari M. (2014) - L'érosion des plages de poche de la Ligurie: le cas d'étude de Bonassola (La Spezia, Italie). *Geo-Eco-Trop*, 38(1), 187-198. Diviacco, Giovanni, and Stefano Coppo. *Atlante degli habitat marini della Liguria*. Grafiche Amadeo, 2006.
- Brignone M., Schiaffino C. F., Isla F. I., & Ferrari M. (2012) - A system for beach video-monitoring: Beachkeeper plus. *Computers & Geosciences*, 49, 53-61.
- Cevasco A. (2007) – I fenomeni d'instabilità nell'evoluzione della costa alta delle Cinque Terre (Liguria Orientale). *Studi Costieri* 13: 93-109.
- De Stefanis A., Marini M., Terranova R., & De Luigi G. (1978) - I movimenti franosi di Guvano e Rodalbia nelle Cinque Terre e i loro riflessi sulla morfologia della costa ligure e sugli insediamenti. *Memorie della Società Geologica Italiana* 19: 161-167.
- Federici P.R., Baldacci F., Petresi A., & Serani, A. (2001) - *Atlante dei Centri Abitati Instabili della Liguria – Provincia della Spezia*. CNR GNDCI, Regione Liguria, Università degli Studi di Pisa.
- Ferrari M., Ferri S., Pranzini E., Rosas V., & Schiaffino C. F. (2014) - Dinamica sedimentaria della spiaggia di Alassio e valutazione dell'idoneità dei sedimenti di cava per il suo ripascimento artificiale. *Studi costieri*, 22, 125-133.
- Fierro G., D'Alessandro L., & Landini B. (1999) - "Atlante delle spiagge italiane." CNR-MURST SELCA, Firenze.

Fierro G., Berriolo G., & Ferrari M., (2015) - Le spiagge della Liguria centro-orientale - analisi evolutiva. Regione Liguria.

Giammarino S. & Giglia G. (1990) - Gli elementi strutturali della piega di La Spezia nel contesto geodinamico dell'Appennino Settentrionale. Bollettino della Società Geologica Italiana 109: 683-692.

Molinier R. & Picard J. (1952) - Recherches sur les herbiers de Phanérogames marines du littoral méditerranéen français. Masson.

Raggi, G. (1985) - Geomorfologia, idrogeologia e geotecnica nell'area spezzina. Memorie della Società Geologica Italiana 30: 35-62.

Mucerino L., Carpi L., Besio G., Ferrari M. & Firpo M. (2016) - Coastal Vulnerability Assessment. Study case: Bonassola- La Spezia Italy. SGI - 7-9 September Napoli.

Perna M., Brandini C., Cipriani L., Grasso V., Mammi I., Pelliccia F., Pranzini E., Vitale G. (2017) - La percezione dell'impatto dell'erosione costiera da parte degli esercenti del litorale compreso tra la foce del F. Magra e Marina di Carrara. Studi costieri 2017 - 27: 17 - 32.

Raso E., Brandolini P., Faccini F., & Firpo, M. (2016) - The Guvano complex landslide in the Cinque Terre National Park, Italy: Geomorphological characterization, GNSS monitoring and risk management. Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future 2:1287-1292.

Terranova, R. (1987) - Escursione lungo la costa della Liguria Orientale. Atti della Riunione del Gruppo Nazionale di Geografia Fisica e Geomorfologia – Guida alle Escursioni- Quaderni dell'Istituto di Geologia dell'Università di Genova, Anno 8, n. 5: 105-232.

Schiaffino C. F., Dessy C., Corradi N., Fierro G., & Ferrari M. (2015) - Morphodynamics of a gravel beach by a detached low-crested breakwater. The case of Levanto (Eastern Ligurian Sea, Italy). Italian Journal of Engineering Geology and Environment 15(1): 31-39.

Site entre Bocca di Magra et Marina di Massa (Toscane, Italie)

Presentation

Motivation

Ce site a une très grande extension et a été choisi en référence aux activités T2.1 du projet et notamment pour tester les méthodologies décrites dans le rapport T2.1.1 (risques côtiers à court terme ou risques de tempête) pour l'évaluation des risques pour la vie humaine et l'environnement naturel et artificiel.

Localisation

Le site pilote est situé entre l'embouchure du fleuve Magra et Marina di Massa (Fig. 1), sur la côte italienne entre la Ligurie et la Toscane, sur une longueur d'environ 12 km, dont plus de 1 km occupées par les structures du port de Marina di Carrara. Sur cet endroit se trouvent les localités de Fiumaretta di Ameglia, Marinella di Sarzana, Marina di Carrara et Marina di Massa.



Figura 1. La côte entre l'embouchure du fleuve Magra et Marina di Massa (Google Earth).

Dynamique du littoral

Le fleuve Magra, long de 62 km, est le principal responsable de l'alimentation sédimentaire de la partie nord de l'unité physiographique de Punta Bianca - Livourne. Le fleuve se jette, à la limite nord-ouest de la zone d'étude, où commence la côte rocheuse vers le nord-ouest. Le transport sédimentaire par le fleuve a été estimé à 125 000 m³/an (charge en suspension) et à environ à 9000 m³/an pour le transport par charriage (Rinaldi, 2005). Les rivières Parmignola et Fossa Maestra, qui amènent des volumes sédimentaires peu significatifs à la côte, sont situés au nord du port. Au sud, les rivières Carrione, Fosso Lavello, Ricortola, Brugiano, Frigido et Magliano, apportent également une faible contribution.

Le transport côtier potentiel qui en résulte est dirigé vers le sud et il a été estimé environ 85 000 m³/an (DEAM-UNIFI, 2007). Le port de Marina di Carrara, qui intercepte une partie de ce flux sédimentaire, a arrêté la tendance érosive de ce littoral, évidente avant la construction des premiers piliers du port.

Les données les plus récentes concernant l'évolution du littoral ont été acquises en 2017 (Regione Toscana, LaMMA). Elles indiquent pour la partie nord une progression moyenne de la plage de +7,2 m par rapport à 2005, avec un taux annuel moyen de 0,6 m/an, de manière non-uniforme. De 1984 à 2005, une partie de la côte avait atteint un équilibre précaire (+0,1 m/an). La mise en œuvre de nombreux ouvrages de défense et de rééquilibrage des côtes a contribué à cet équilibre. Ces interventions sont des épis transversaux, des brise-lames émergents et des rechargements de plages qui ont été réalisés en plusieurs phases, avec des sédiments provenant de carrières terrestres du bassin du Pô et du dragage du barrage terminal de Magra, jusqu'à atteindre un volume d'environ 120 000 m³.

Au sud du port, entre 2005 et 2017, il y a eu une perte moyenne d'environ 2 m, avec un taux annuel inférieur à 0,2 m/an.

Connaissances disponibles

Géomorphologie et sédimentologie

La plage de Marina di Carrara a récemment été étudiée dans le projet CAMP-Italy (2016), grâce aux activités de surveillance menées par le consortium LaMMA avec la collaboration scientifique de Département des Sciences de la Terre (DST) de l'Université de Florence. Dans les années précédentes, le DST avait réalisé plusieurs études à la fois sur la plage de Marina di Carrara et sur celle de Marina di Massa, pour la municipalité de Carrara, de Massa, pour l'autorité portuaire de Marina di Carrara et la province de Massa-Carrara, tandis que des données sur la ligne de rivage sont disponibles, extraites par photo-interprétation. Dans les années 90s, environ 2000 études ont été menées, comprenant souvent des études morphologiques et sédimentologiques, pour compte de génie civil maritime et de l'autorité de bassin de fleuve Magra.

Argomento	Dati	Natura dei dati	Periodo	Fonte
Evol. ligne de rivage	Ligne de rivage	Photointerpretation	Da anni '30 a anni '80	UniFi/RT
Evol. ligne de rivage sedimentologie	Ligne de rivage, levé morpho-bathymétrique, données sédimentologiques (Massa)	Levé topographique et echantillonnage de sable	1996-1997	UniFi
Evol. ligne de rivage sedimentologie	Ligne de rivage, levé morpho-bathymétrique, données sédimentologiques (Carrara)	Levé topographique et echantillonnage de sable	1998 - 1999	Genio Civile Opere Marittime
Evol. ligne de rivage sedimentologie	Ligne de rivage, levé morpho-bathymétrique, données sédimentologiques (Massa)	Levé topographique et echantillonnage de sable	1999-2005	Comune di Massa
Evol. ligne de rivage sedimentologie	Ligne de rivage, levé morpho-bathymétrique, données sédimentologiques (Carrara)	Levé topographique et echantillonnage de sable	2000-2004	Aut.Bacino Magra
Evol. ligne de rivage sedimentologie	Ligne de rivage, levé morpho-bathymétrique, données sédimentologiques (Massa)	Levé topographique et echantillonnage de sable	2004-2016	Provincia di Massa-Carrara
Evol. ligne de rivage sedimentologie	Ligne de rivage, levé morpho-bathymétrique, données sédimentologiques (Carrara)	Levé topographique et echantillonnage de sable	2005 - 2009	Aut.Port.Carrara
Evol. ligne de rivage sedimentologie	Ligne de rivage, levé morpho-bathymétrique, données sédimentologiques (Carrara)	Levé topographique et echantillonnage de sable	2006 - 2015	Comune di Carrara
Evol. ligne de rivage sedimentologie	Ligne de rivage, levé morpho-bathymétrique, données sédimentologiques (Carrara)	Levé topographique et echantillonnage de sable	2016	LaMMA
Evol. ligne de rivage	Ligne de rivage	Photointerpretation	2017	LaMMA

Tableau 1 - Connaissances disponibles pour le site ente Bocca di Magra et Marina di Massa.

Connaissances de vague et des courants

Les données marines et météorologiques disponibles pour la région proviennent de:

- modèles de calcul validés (y compris ceux du consortium LaMMA)
- mesures du mouvement des vagues (bouées)

En ce qui concerne ces dernières, la plus longue série chronologique de données mesurées, près du site, a été collectée de la bouée de La Spezia (située au sud de l'île de Palmaria), opérationnelle depuis 1989 jusqu'en 2014, mais cela ne fonctionne plus récemment. De 1989 à 2001, une bouée directionnelle Wavec a été utilisée, et à partir de 2004, des bouées Triaxis™. Les données sont disponibles sur le portail du réseau ondametric national (RON) géré par ISPRA. À partir de 2008, une bouée a été installée près de l'île de Gorgona. Il s'agit d'une bouée directionnelle de type Datawell gérée par le Centre fonctionnel - Service hydrologique de la Région Toscane (CFR-RT).

Il n'y a pas d'observation à l'échelle côtière le long de la côte. Le point de mesure côtière le plus proche se situe à Gombo - San Rossore (ADCP) et se trouve à environ 40 km au sud de la zone en question. Cependant, ces données peuvent en tout cas être utilisées pour la validation / calibration de modèles de calcul, pour la transposition du climat de vagues au large et près de la côte et pour l'évaluation de l'incertitude inévitablement présente dans les modèles.

Etat des connaissances

Risque côtier

Connaissances météorologiques et des vagues

Dans cette région, du fait de son exposition, les événements significatifs sont généralement caractérisés par un courant de vent superficiel du sud et du sud-ouest (Libeccio), souvent associés à un courant occidental de l'Atlantique ouest. Ces événements sont accompagnés des tempêtes les plus intenses (Fig. 2).

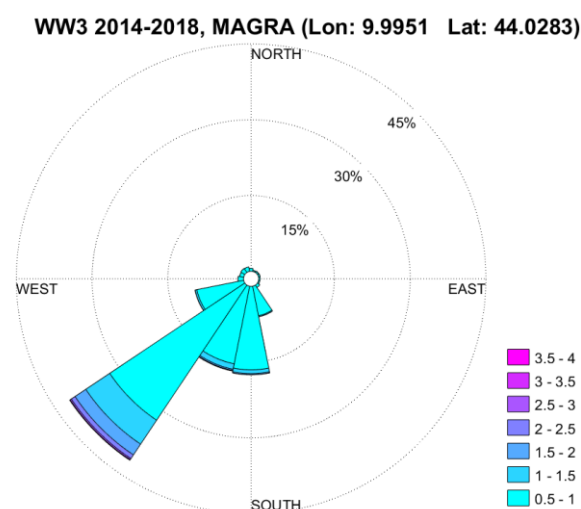


Figura 2. Représentation du climat des vagues caractéristiques dans le site étudié (données extraites du modèle WW3-LaMMA)

Le Consortium LaMMA a réalisé une classification des types de conditions météorologiques en Italie, divisée en 9 types, correspondant chacun à des caractéristiques spécifiques de l'atmosphère, en suivant les indications du projet européen COST Action 733, ce dernier concernant le choix des méthodes de classification du climat et leurs liens avec les variables climatiques de surface (Vallorani et al., 2018).

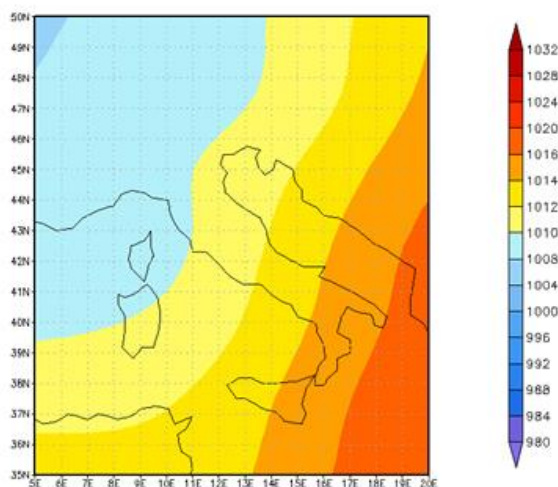


Figura 3. Structure caractéristique du type de temps associé au Libeccio (type de temps 4)

L'application de cette méthodologie a permis de souligner que :

- 1) le type de temps associé statistiquement aux écoulements atlantiques et au "Libeccio" sur les côtes du nord-ouest de la Méditerranée (figure 3) est généralement caractérisé par un bloc anticyclonique sur la péninsule des Balkans;
- 2) les fortes tempêtes sur les côtes de la Ligurie et de la Toscane peuvent être associées à des événements de ruissellement très intenses. Les tempêtes les plus intenses peuvent entraîner une augmentation significative du niveau de la mer près de la côte, ce qui peut nuire au débit normal des fleuves. La combinaison de ces deux facteurs constitue donc un facteur de risque d'inondation côtière, non seulement à cause des tempêtes, mais également des zones proches des embouchures de rivières.

Inondations côtières

Sur la côte, entre l'embouchure du Magra et de Marina di Massa, il n'y a pas de cordons de dunes pour protéger la zone située derrière la plage. Le littoral est caractérisé par des structures d'établissements balnéaires situés près de la route côtière, à une altitude proche du niveau de la mer, en favorisant les inondations en cas de phénomènes météorologiques exceptionnels.

Ce facteur de risque est particulièrement préoccupant parce que la plage n'est pas assez large pour absorber les grandes tempêtes, comme il est arrivé dans les dernières années, par exemple à Marinella di Sarzana. L'élévation du niveau de la mer, et par conséquent le niveau de l'eau à l'embouchure des rivières, associé à de grandes houles, peut être une cause importante d'inondation des rivières en raison de fortes précipitations. Cette côte a toujours été sujet à des phénomènes d'inondation, parmi lesquels, dans ces dernières années, nous rappelons ceux causés par l'inondation de Torrente Carrione en 2014 qui coule juste au sud du port de Carrare, et du fleuve Magra dans le 2011.

Le risque d'inondation dans la zone a également été analysé dans d'autres projets, notamment Risc-Kit (FP7), dans lequel des méthodologies et des modèles ont été adoptés et constituent une référence importante pour les activités spécifiques de MAREGOT sur ce site pilote. (De Angeli et al. 2018).

Rip-currents et ouvrages de protection côtière

Alors que les ouvrages rigides constituaient, d'une part, une défense contre l'érosion côtière, d'autre part, ils ont entraîné un raidissement considérable de la côte, ajoutant des éléments de danger.

Par exemple, la formation de courants de retour, qui peuvent aussi se vérifier dans des littoraux sans ouvrage, est favorisée en présence de cellules formées de séquences des épis et des brise-lames le long de la côte. De même, les vides entre des ouvrages parallèles peuvent être à l'origine d'écoulements transversaux. Ces courants peuvent être extrêmement dangereux pour les nageurs, qui sont rapidement transportés loin de plage, où il est très difficile de nager pour rentrer. Des cellules côtières artificielles sont présentes dans la zone d'étude à Marinella di Sarzana et à Marina di Massa. Dans toute la zone d'étude, il y a des nombreux ouvrages à la fois parallèles et transversaux, émergés et submergés. Les ouvrages de défense rigides peuvent être sources de danger pour les personnes (nageurs, plongeurs, ...) particulièrement en tempête.

Plans de prévention

Du point de vue du risque d'érosion, plusieurs travaux de rééquilibrage du littoral ont été effectués dans la zone d'étude, à partir des années 1930, lorsque le premier ouvrage (brise-lame) a été construit pour défendre la côte au point où la route de Sarzana atteignait la côte. À partir des années 40s, des structures rigides (ouvrages longitudinales et parallèles et combinaisons) ont commencé à être massivement installés.

Actuellement, il existe 31 structures dans la partie nord du port, presque toutes dans la zone ligure, et 50 dans la partie sud jusqu'au ruisseau Magliano. A cela, il faut ajouter les structures du port de Carrara.

En ce qui concerne le risque de tempête, la région Toscane publie un bulletin d'alerte spécifique qui inclut également le risque de tempêtes violentes. L'alerte de tempête marine est attribuée aux territoires correspondant à des "zones hydrologiques homogènes" (dans ce cas, les territoires examinés sont tous compris dans la zone appelée "Versilia").

Dans le cadre de l'activité à mener sur ce site pilote, il sera proposée une évaluation des risques de tempête, en partant de la subdivision du rivage en zones plus petites, représentatives de l'incidence effective des vagues et de ses principales conséquences sur la vie humaine et sur l'environnement naturel et bâti (vent, tempête).

Activités, assets

Dans ce site, on développera une activité de modélisation pour la caractérisation des risques côtiers liés aux tempêtes, à partir de l'utilisation des modèles opérationnels de prévision des vagues existants, de la circulation météorologique et hydrodynamique. Des différents modèles de prévision spécifiques à haute résolution, pour l'évaluation de l'impact des vagues le long de la côte et de la circulation hydrodynamique à l'échelle côtière, seront mis en œuvre, tant du point de vue de comparaison des méthodes et des modèles d'évaluation des risques que pour évaluer leur efficacité en termes opérationnels. Les modèles seront comparés avec toutes les données météorologiques disponibles et, si possible, avec les données des webcam côtières pour l'estimation de l'impact de vagues et de l'élévation du niveau de la mer le long de la côte.

Conclusions

Résumé du problème du site

Il s'agit d'un littoral qui a eu longtemps besoin de réaliser des ouvrages de défense contre l'érosion côtière, avec des résultats quelque fois positifs. L'environnement est fortement anthropisé, compte tenu de la présence du port de Marina di Carrara et de l'absence de dunes en tant que ressource de sédiments pour la plage et de protection de la zone d'arrière-plage, où l'on trouve plusieurs structures d'établissements balnéaires et des rues côtières.

Le site est également affecté par des tempêtes marines déclenchées par des vents violents de libeccio (et d'autres), souvent aussi associés à des inondations intenses. Ces événements se sont répétés au cours des saisons précédentes, avec des risques pour les structures et les personnes.

Représentativité transfrontalière du site

La zone de coopération transfrontalière se caractérise par divers sites d'intérêt économique et social liés à la présence de ports adjacents à des zones d'intérêt touristique (Gênes, Toulon, Livourne, ...). Le site pilote combine des aspects économiques et commerciaux et des aspects touristiques liés à la présence de plages aménagées, protégées par des ouvrages de défense du littoral.

Bibliographie

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, DEAM (2007) - Stima delle profondità di chiusura lungo le coste toscane, pp. 138.

ISPRA (Rete Ondametrica Nazionale): <http://dati.isprambiente.it/dataset/ron-rete-ondametrica-nazionale/>

Regione Toscana, LaMMA, Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze (2016) - Progetto CAMP – Italy Elaborazione e interpretazione dei dati morfologici e sedimentologici finalizzati alla stima del bilancio sedimentario dei tratti di litorale oggetto delle azioni individuali del progetto CAMP-Italia. Rapporto di Progresso n° 2.

Regione Toscana, LaMMA (2016) - Progetto CAMP – Italy. Final report.

Regione Toscana, LaMMA (2017) - Monitoraggio a scala regionale dell'evoluzione della linea di riva da remoto.

Vallorani, R. , Bartolini, G. , Betti, G. , Crisci, A. , Gozzini, B. , Grifoni, D. , Iannuccilli, M. , Messeri, A. , Messeri, G. , Morabito, M. and Maracchi, G. (2018) - Circulation type classifications for temperature and precipitation stratification in Italy. *Int. J. Climatol*, 38: 915-931. doi:10.1002/joc.5219

De Angeli, S., D'Andrea, M., Cazzola, G., Dolia, D., Duo, E., Rebora, N., Coastal Risk Assessment Framework: Comparison of modelled fluvial and marine inundation impacts, Bocca di Magra, Ligurian coast, Italy, *Coastal Engineering*, Vol. 134, 2018, pp. 229-240,

Site de Senzuno (Toscane, Italie)

Présentation du site

Localisation

Le site pilote de Senzuno (Illustration 1a) est situé sur le côté oriental du golfe de Follonica, dans la province de Grosseto et s'étend sur environ 4 km.

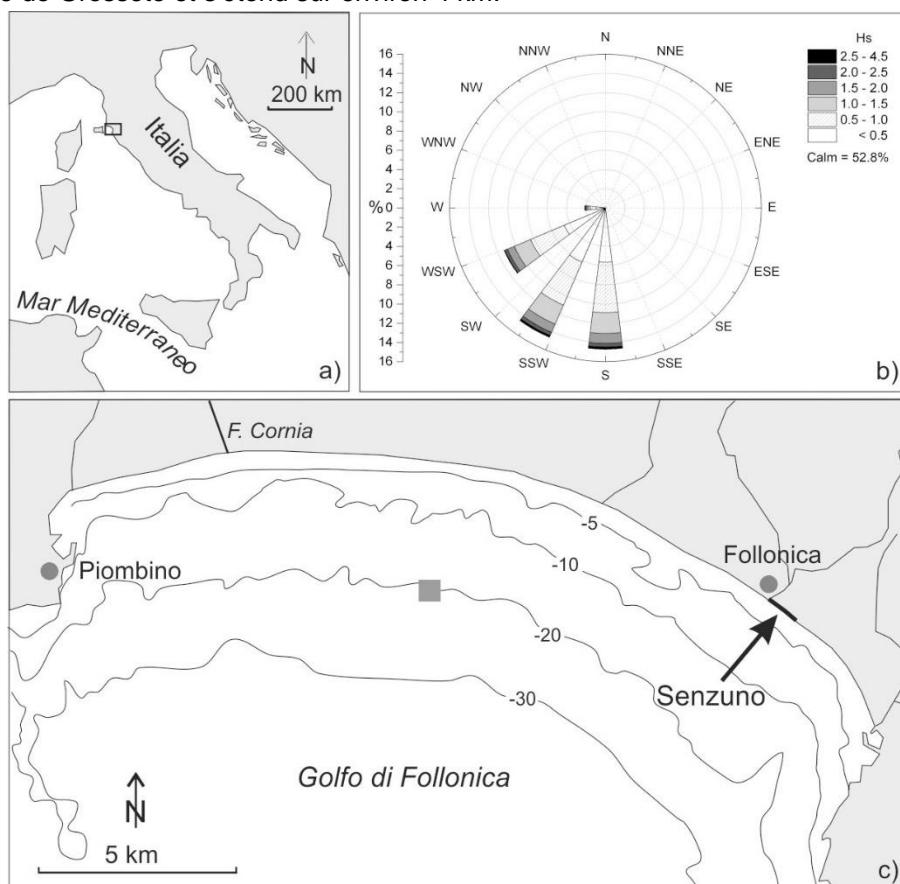


Illustration 1. Emplacement de la plage de Senzuno et distribution directionnelle du mouvement houleux dans les eaux intermédiaires (position indiquée par le carré dans l'illustration en bas)

Caractéristiques physiographiques / de l'écosystème

La côte du golfe de Follonica, dans la mer Tyrrhénienne, est protégée au large du promontoire de Piombino, de l'île d'Elbe au nord-ouest et de la Corse et de la Sardaigne à l'ouest. Le site est situé près de la bordure du golfe, où l'orientation de la côte est nord-ouest / sud-est (Illustration 1c).

Données d'agitation

Les directions de provenance des vagues au large (Illustration 1b) indiquent que le potentiel de transport de sédiments est similaire dans les deux directions le long de la côte. Les vagues dans le golfe de Follonica sont limitées en raison de la proximité des terres et de la bathymétrie peu profonde. La hauteur des vagues dépasse 1,7 m 1,7% du temps et dépassent 0,5 m dans 47,2% des cas. La marée, interpolée par les valeurs de Livourne et Civitavecchia (IIM 2003), est de l'ordre

de 0.37 m. Des échantillons de sédiments prélevés sur la plage en mai 2007 (Ferri, 2008) indiquent la présence de sables fins et moyens, jusqu'à une profondeur de 3 m.

Le tronçon concerné par le projet a récemment vu la modification des structures de défense côtières (Illustration 2).

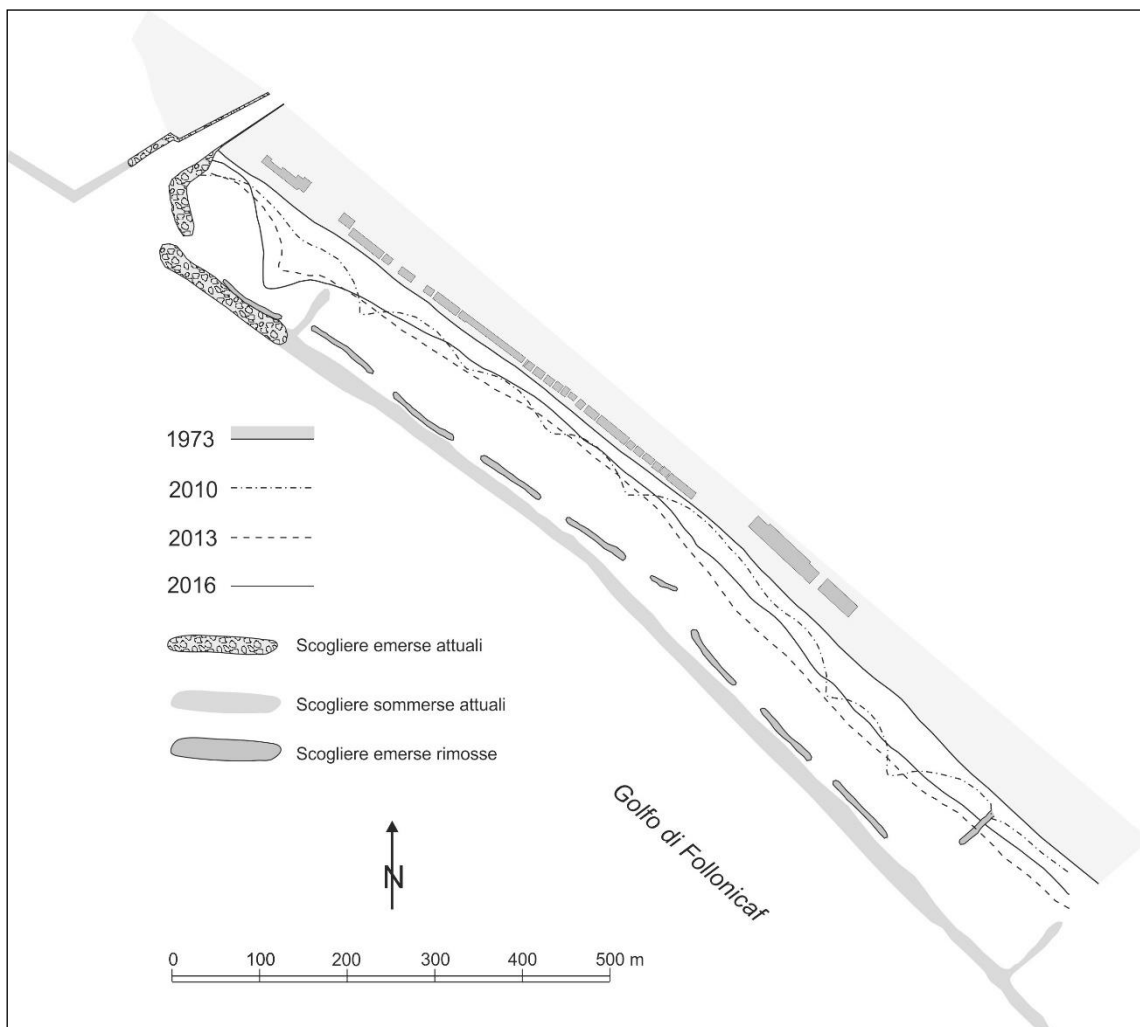


Illustration 2. Le projet de modification des ouvrages de défense et d'évolution de la ligne de rivage

Connaissances disponibles

La plage de Follonica a été étudiée dans le cadre du programme CNR Régime et dynamique des côtes (Bartolini *et al.*, 1976a, b, 1986) et a ensuite fait l'objet de recherches promues par la Région Toscane (Pranzini, 2001) et par la Province de Grosseto (Pranzini, 2009) Par la suite, il y a des travaux réalisés dans le domaine de la recherche à l'Université de Florence (par exemple, Aminti *et al.*, 2002; Cipriani *et al.*, 2011, Pranzini *et al.*, 2018).

La récente reconfiguration des ouvrages de défense, conçue par la province de Grosseto, s'est servie de la modélisation numérique réalisée par Sintesis (2015).

Thème	Données	Nature des données	Période	Source	Bibliographie
Evol. Linea riva,		Restituzione linee di riva,	Anni '70		Bartolini et al (1976)
Geomorfologia		Indagini geomorfologiche e sedimentologiche	Anni '80		
Province petrografiche		Indagini petrografiche			Gandolfi e Paganelli (1975, 1976, 1979)
Opere di difesa					. Aminti <i>et al.</i> , 2002
Geomorfologia		Telerilevamento	Anni '80		
Trasporto sedimentario		Modellistica numerica	Anni 2000		DEAM (2007)
Geomorfologia		Morfologia, Petrografia, ecc.			TEI/Regione Toscana
Evol. Linea di Riva	Linee riva 1954, 1976, 1981, 1984	Carta topografica	1938-1984		Regione Toscana (1989)
Petrografia		Analisi petrografiche			Regione Toscana
		Progetto del porto			
Gestione		Linee di riva e opere di difesa			Cipriani et al, 2011
		Modellistica numerica			Sintesis, 2005
Erosione/difesa		Evoluzione linea di riva e dei fondali			Pranzini <i>et al.</i> (2018)

Tableau 1. Connaissances disponibles pour le site de San Vincenzo Les références bibliographiques complètes se trouvent à la fin du chapitre

Etat des connaissances

Risque côtier

Evolution de la ligne de rivage

La plage a été menacée par une érosion modérée mais continue depuis le début du XXe siècle en raison de la déviation des rivières qui alimentent cette côte au XIXe siècle pour récupérer les lagunes côtières (Bartolini *et al.*, 1977). La construction de structures de protection côtière (principalement des brise-lames et des épis parallèles) a commencé dans le golfe de Follonica dans les années 1960, augmentant souvent l'érosion sur les plages adjacentes non protégées. Les brises-lames parallèles de Senzuno ont été construites entre 1983 et 1987. Les huit structures originales mesuraient chacune 60 m de long espacés de 60 m. Le brise-lames 6 (Illustration 2) était de plus en plus court et continuait jusqu'au sol avec un épi légèrement émergent. Cela a été démolé en 1991; un neuvième ouvrages a été construite en 2007.

Les brise-lames d'origine ont été prolongées pour réduire les espaces à 35 m, en obtenant la configuration illustrée à L'illustration 2. Les digues d'origine ont été construites en construisant une structure émergente longue et continue pour faciliter le transport des rochers par les véhicules. de ces rochers pour créer les lagunes. Certains blocs ont été laissés dans les espaces vides pour

fournir un seuil à environ -1,8 m de profondeur afin de limiter le courant qui circule entre les falaises.

Les plages ouvertes étaient étroites et relativement escarpées; ceux qui étaient abrités par les digues étaient plus larges et moins pentus (Illustration 3). Il était donc nécessaire de redonner une largeur raisonnable aux plages les plus étroites et de former un littoral plus naturel mais avec une protection plus grande que celle fournie par une plage naturelle. Les brise-lames segmentés ont été reconfigurés en une structure submergée continue avec une crête à -0,5 m s.l.m.

Cette submersion a été choisie suite au succès d'une structure similaire réalisée (par des modifications similaires) dans la partie plus intensément développée de Follonica à l'ouest de Senzuno (Illustration 1c). L'érosion des plages était anticipée, avec un volume estimé à 7 000 m³ tous les 5 ans (Sintesis, 2005).

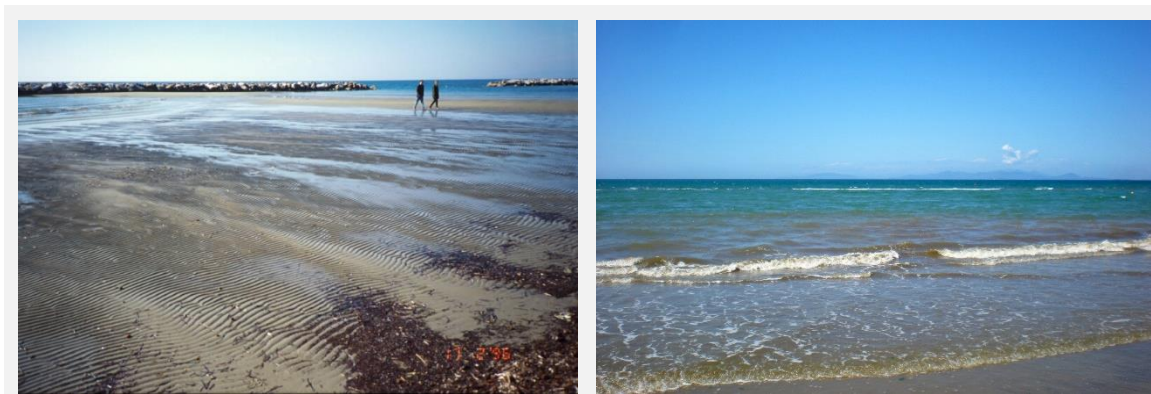


Illustration 3. La plage de Senzuno avant (à gauche) et après (à droite) l'abaissement des falaises

Les rochers des anciennes digues ont été utilisés pour créer la structure submergée. Les cinq brises-lames les plus à l'ouest ont été déplacés de septembre 2011 à mai 2012. La partie ouest de la digue (Illustration 2) a été relevée au-dessus de 1.m.m. pour fournir une plus grande protection à une zone d'amarrage de bateau.

Les brises-lames au sud-est ont été retirées de septembre 2012 à mai 2013. L'interruption du projet était due à la nécessité de suspendre les travaux pendant la saison touristique. La nouvelle digue est placée à environ 20 m de la précédente, mais les distances dans les points individuels ne sont pas les mêmes en raison du nouvel alignement (Illustration 2). Environ 10 000 m³ de sable fin ont été dragués juste au large des nouvelles digues et répartis sur la plage émergée ou dans la partie nord-ouest du tronçon. La plage émergée a ensuite été retravaillée par les bulldozers pour niveller partiellement la côte. Du sable a été pris du sol derrière la digue n. 9 et placé vers la terre de la digue n. 6.

L'intervention n'a pas été suivie d'un suivi spécifique, mais certaines mesures prises par le Département des Sciences de la Terre de l'Université de Florence ont conduit à une évaluation initiale de la réponse de la plage.

La côte, avant la construction des premiers brise-lames (1973), était relativement droite (Illustration 2), mais après la construction des structures parallèles (2005) elle a changé avec l'extension d'environ 24 m et la formation de encoches au niveau des digues uniques.

Une grande partie des sédiments qui ont provoqué l'accrétion après 1973 auraient pu entrer dans la plage au nord-ouest de Senzuno avant l'extension des piliers de drainage du canal de drainage, construit en 1996/1997 et prolongé en 2005.

Les relevés effectués après la modification des structures en 2013 et 2016 révèlent que les saillants ont émoussé, sauf sur le sol de la partie rocheuse qui a été relevée pour protéger le point d'amarrage, où il y a une sédimentation intense (Illustration 2) .

Certains réalignements du littoral pourraient être attribués au remaniements effectués par les bulldozers. La superficie de la plage émergée a augmenté en 2013 (tableau 1), tandis qu'entre 2013 et 2016, le rivage a reculé en moyenne de 12,9 m (~ 4,3 m / an) le long de la côte segment. Les relevés bathymétriques réalisés en 2015, deux ans après le dernier, l'abaissement des dernières défenses (Illustration 4), révèlent une rectification des isobares près de la côte et la présence d'une dépression vers le sol de la nouvelle structure.

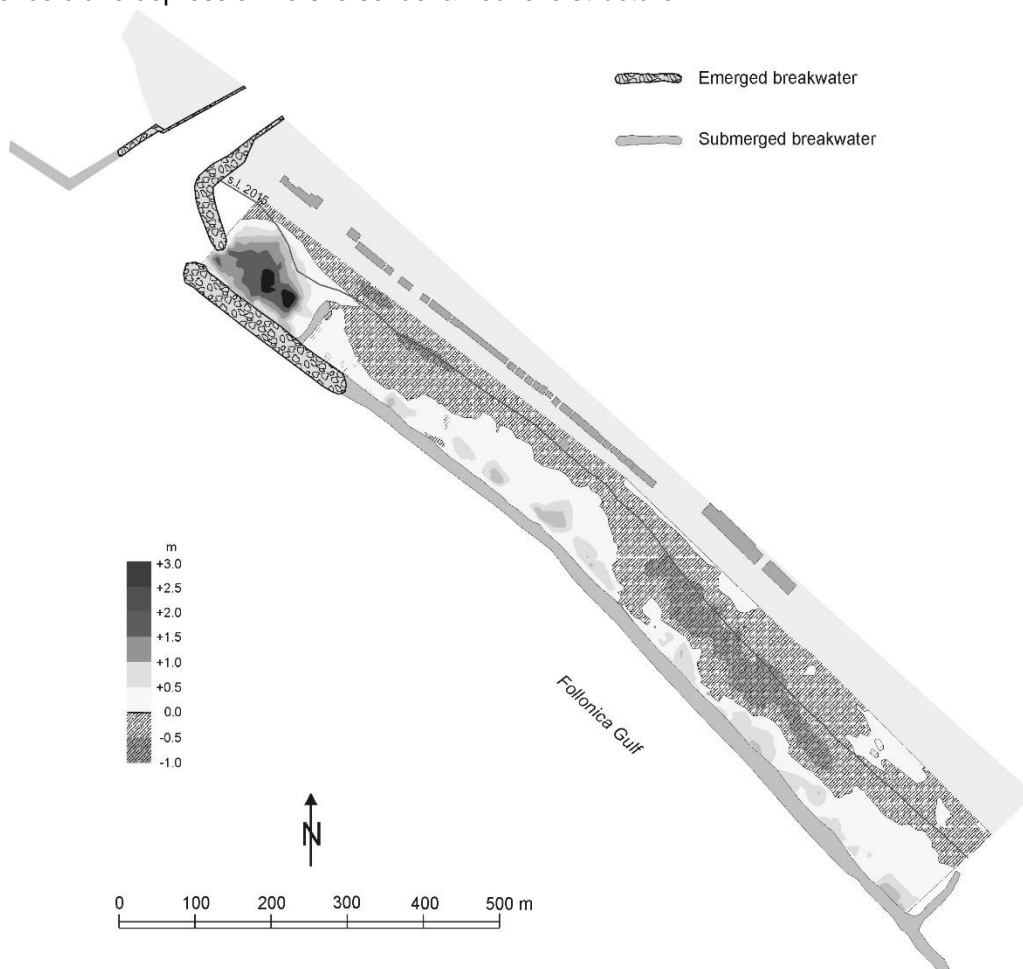


Illustration 4. Variations d'altitude sur la plage émergée et sur le fond marin à la suite du remodelage des falaises

Le creux qui longe approximativement la ligne des anciens brises-lames et qui est causé par l'enlèvement des roches. La dépression continue à travers les lagunes précédentes.

Les changements verticaux copté terre de la nouvelle barrière submergée de 2013-2015 (Illustration 4) révèlent l'érosion des positions des saillants précédents. La variation nette du volume au sol de la partie submergée était de 7 671 m³.

La construction d'épis aux extrémités du système d'endiguement peut avoir limité la perte de sédiments, mais ces structures ne sont pas reliées à la rive, ce qui permet un certain transit littoral. La large arête (20 m) du nouveau plafond contribue à l'atténuation des vagues, réduisant la possibilité de former un sillon sur le dos; le remplissage du canal résultant de l'enlèvement de la structure précédente a également été noté.

Les entretiens réalisés auprès des visiteurs traditionnels de cette plage et auprès des gestionnaires des établissements balnéaires indiquent que l'intervention a fait l'objet d'une évaluation positive, notamment pour l'homogénéité conférée à la côte et la disparition des ouvrages impactant le paysage.

Inondation côtière

La présence d'un cordon dunaire bien développé prévient l'inondation des eaux, au niveau de la partie méridionale du tronçon étudié, qui correspond à l'embouchure de la rivière Pecora, dans laquelle s'étend la Scarule di Scarlino.

Plans de prévention

Avec le document opérationnel pour la récupération et le rééquilibrage du littoral, le projet «Scarborough beach restoration» 2016-2010 était prévu. Il s'agit d'élaborer un projet préliminaire pour lequel les résultats des études et suivis prévus par le Projet MAREGOT seront importants

Activités, atouts

Suivi de l'évolution morphologique induite par la modification des ouvrages de défense.

Conclusion

Résumé du problème du site

Le tronçon faisant face à la ville de Follonica est caractérisé par la présence de nombreux ouvrages de défense rigides. Les interventions ont eu lieu au fil du temps, les premiers travaux menés conduisant à une avancée relative de la ligne de rivage, au détriment des zones adjacentes qui se sont érodées et pour lesquelles il a fallu poursuivre les travaux.

Les études géomorphologiques et sédimentologiques menées par le Département des Sciences de la Terre de l'Université de Florence pour le compte de la Région Toscane ont montré que l'évolution morphologique des plages du Golfe de Follonica est la conséquence directe des ouvrages construits, avec des dépôts évidents dans les zones protégées et des érosions dans les zones adjacentes non protégées

Représentativité transfrontalière du site

Les travaux de transformation des ouvrages submergées ont été au bénéfice des caractéristiques environnementales et paysagères du littoral. La possibilité de réaliser cette transformation sans affecter l'efficacité des ouvrages de défense des côtes peut concerner de nombreuses collectivités locales dans la zone transfrontalière et les données relatives à cette activité sont essentielles pour définir des plans d'intervention et des projets à mettre en œuvre.

Bibliographie

Aiello E., Bartolini C., Conedera C., Pranzini E. (1979) - L'erosione del litorale livornese e le sue cause. Amm. Prov.le Livorno. 42 pp.

Aiello E., Bartolini C., Caputo C., D'Alessandro L., Fanucci F., Fierro G., Gnaccolini M., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Piccazzo M., Pranzini E. (1976) - Il trasporto litoraneo lungo la costa toscana fra la foce del Fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina. Boll. Soc. Geol. It., 94: 1519-1571.

Aminti P., Cipriani L.E., Pranzini E. (2002) - Beach erosion control along the Golfo di Follonica (Suthern Tuscany): actual hard protections vs. potential soft solutions. Littoral 2002, 6th Int. Symp., Porto, Portogallo. Pp.355-363.

Bartolini C., Caputo C., Cavazza S., Ceffa L., Celestre P., Cortemiglia G.C., Fanucci F., Fierro G., Gandolfi G., Gnaccolini M., Imperiale G., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Marone V., Mordenti A., Montano F., Nardi M., Paganelli L., Paoletti A., Piacentino G.B., Piccazzo M., Pranzini E., Versino L. (1976) - Area campione Alto

Tirreno. Ricerche sul regime e la conservazione dei litorali. Rapporto 1974. La Ricerca scientifica, 92: 61-126.

Bartolini C., Caputo C., D'Alessandro L., Gandolfi G., L., Pranzini E., Pugliese F. (1986) - Atlante delle spiagge italiane. Foglio 128 "Grosseto". C.N.R.- S.EL.CA., Firenze.

Bartolini C., Cavazza S., Gandolfi G., Mazzanti R., Miano V., Paganelli L., Palla B., Pranzini E. (1986) - Atlante delle spiagge italiane. Foglio 111-112 "Livorno e Volterra". C.N.R.- S.El.Ca., Firenze.

Bartolini C., Evangelista S., Gandolfi G., La Monica G.B., Landini B., Paganelli L., Pranzini E., Pugliese F. e (1986) - Atlante delle spiagge italiane. Foglio 127 "Piombino". C.N.R.- S.EL.CA., Firenze.

Bartolini, C., Pranzini, E., Lupia Palmieri, L., Caputo C., 1977. Studi di geomorfologia costiera: IV - L'erosione del Golfo di Follonica. Boll. Soc. Geol. It., 96: 87-116.

Carli S., Iandelli N., Pranzini E., Salvatori R. (2008) - L'utilizzazione di immagini telerilevate ad alta risoluzione per lo studio dell'erosione costiera: estrazione della linea d'acqua e valutazione della sua accuratezza. Studi costieri, 14: 43-54.

Cipriani, L.E., Ferri, S., Lami, G., Pranzini, E. (2011) - Human Impact on Shoreline Evolution Along the Follonica Gulf (Southern Tuscany): How Tourism May Kill the Goose That Lays the Golden Egg. In: Micallef, A. (ed.), *MCRR3-2010 Conference Proceedings*, Journal of Coastal Research, Special Issue, No. 61, pp. 290 - 294. Grosseto, Tuscany, Italy, ISSN 0749-0208.

De Filippi G.L., Duchini E., Pranzini E. (2008) - Closure Depth estimation along the Tuscan coast aimed at short and long term coastal monitoring. In: Beach Erosion Monitoring, a cura di E. Pranzini e L. Wetzel, BeachMed-e/OpTIMAL Project, Nuova Grafica Fiorentina, Firenze, pp 33-50

Ferri, S., 2008. Risposta granulometrica della spiaggia in seguito alla costruzione di opera a mare. Unpublished Ph.D. Dissertation.

Gandolfi G., Mordenti A., Paganelli L. (1976) – Composizione provenienza e dispersione delle sabbie. – In: Ricerche sul regime e la conservazione dei litorali, Area campione Alto Tirreno. Rapporto 1974, Quaderni Ricerca Scientifica, n. 92, 112-115.

Gandolfi G., Paganelli L. (1979) - Le province petrografiche del litorale toscano – Bollettino Società Geologica Italiana, n. 96, 653-663.

Landelli N., Pranzini E. (2008) - Waterline extraction from Ikonos images addressed at beach erosion monitoring. . In: Beach Erosion Monitoring, a cura di E. Pranzini e L. Wetzel, BeachMed-e/OpTIMAL Project, Nuova Grafica Fiorentina, Firenze, pp 51-60.

Pranzini E. (2009). Monitoraggio del litorale di Follonica: Maggio 2007 – Novembre 2008. Rel. Inedita, Provincia di Grosseto.

Pranzini E., Simonetti D. (2008) - Beach evolution monitoring: Surface Variation Analysis vs. Transept Based Analysis. In: Beach Erosion Monitoring, a cura di E. Pranzini e L. Wetzel, BeachMed-e/OpTIMAL Project, Nuova Grafica Fiorentina, Firenze, pp 25-31.

Pranzini, E., Jackson, N.L., Lami, G., Nordstrom, K.F., Rossi, L. (2018). Reshaping beach morphology by modifying offshore breakwaters. *Ocean and Coastal Management*, 154: 168-177.

Sintesis, 2005. Studio meteomarinario. Ripascimento arenile e valutazione dell'efficacia opere realizzate per la difesa dell'abitato nel tratto del Golfo di Follonica compreso tra il Pontile Nuova Solmine e Prato Ranieri. Unpublished report, Provincia di Grosseto, 44 pp.

Site de Pratoranieri (Toscane, Italie)

Présentation du site

Localisation

Le site pilote de Pratoranieri est situé dans la zone centre-est du golfe de Follonica, dans la province de Grosseto et s'étend sur environ 3 km (Illustration 1).

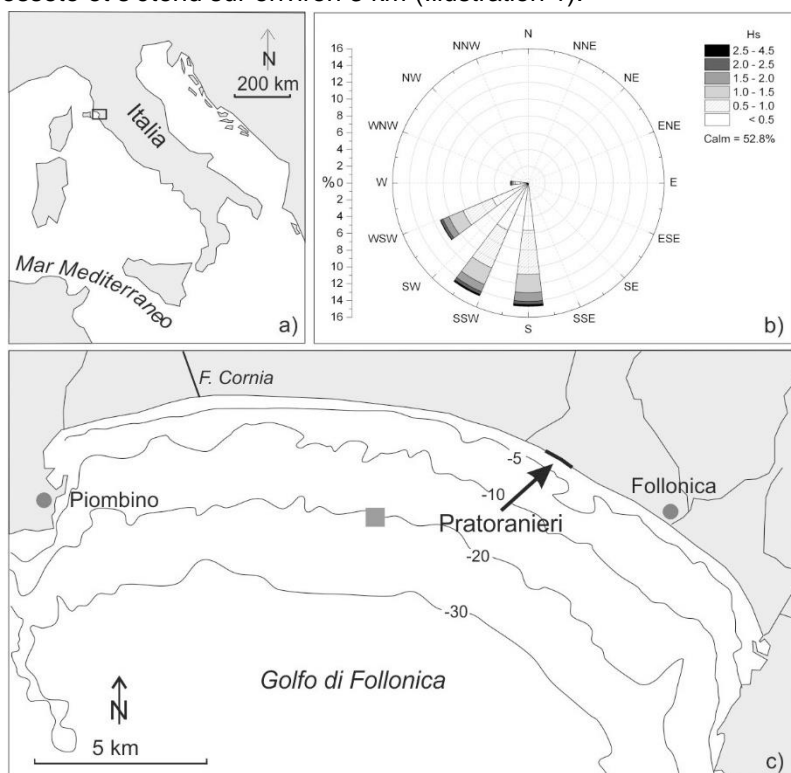


Illustration 1. Emplacement de la plage de Pratoranieri et distribution directionnelle du mouvement houleux dans les eaux intermédiaires (position indiquée par le carré dans l'illustration en bas).

Caractéristiques physiographiques / de l'écosystème

La côte du golfe de Follonica, dans la mer Tyrrhénienne, est protégée à l'ouest par le promontoire de Piombino, au nord-ouest par l'île d'Elbe et à l'ouest par la Corse et la Sardaigne. Le site est situé dans le secteur central-est du golfe, où le littoral est approximativement nord-ouest-sud-est (Illustration 1c).

Comme sur le site de Senzuno, les données de vagues au large (à 20 m de profondeur) indiquent que le potentiel de transport des sédiments est similaire dans les deux directions le long de la côte. L'énergie de l'agitation dans le golfe de Follonica est modeste en raison de protection de la côte et également en raison de la faible pente des fonds marins. La hauteur des vagues dépasse seulement 2,0 m dans 1,7% des cas et 0,5 m dans 47,2%. La marée, interpolée par les valeurs de Livourne et Civitavecchia (IIM 2003), est de l'ordre de 0,37 m.

La partie du littoral choisi comme site pilote a une superficie d'environ 3 km² et se situe près de la frontière entre les communes de Piombino et Follonica et, par conséquent, entre les provinces

de Livourne et Grosseto. Le littoral est la limite de deux plaines coalescentes, l'une construite par la rivière Cornia et l'autre par quelques cours d'eau plus petits qui sont maintenant canalisés. Les milieux naturels ont survécu à des siècles d'utilisations occasionnelles, attestées par la présence de restes de fours et de poterie plus anciennes. Ils sont constitués de plaines inondables, de lagunes côtières, de dunes et de plages, mais ont été transformés par l'activité humaine au cours des deux derniers siècles.

La remise en état des marais de Piombino, d'abord obtenue avec la remise en état de la rivière Cornia se poursuit avec la canalisation d'eaux de surface et, dans ce tronçon, avec leur pendant dans Fosso Cervia, qui est parallèle à la côte à la limite du cordon dunaire, pour se jeter dans la mer. L'intérieur des terres présente aujourd'hui un réseau de canaux de drainage connectés à ce canal.

Le cordon dunaire, très dégradé et érodé dans la partie occidentale du golfe, est ici un peu plus cohérente, même si dans de nombreux endroits elle a été occupée par des établissements touristiques. Là où elles sont présentes, ces dunes conservent les restes très dégradés du maquis méditerranéen, qui a été recouvert par une forêt de pins maritimes. Certains campings, une fois sur la dune (Illustration 2), ont été déplacés à l'intérieur.



Illustration 2 - La plage de l'ancien Camping Torre Mozza dans une carte postale datée de 1961

L'avant-côte a des morphologies différentes selon la présence ou l'absence de roche de plage et de récifs artificiels. Dans la section étudiée, il n'y a pas de structures de défense en mer (sauf pour les bouches des fossés), mais la plage est bordée de digue et de murs verticaux.

La plage, représentée par le profil illustré à l'illustration 3, a une pente de 2% entre le rivage et l'isobathe de 5 m et possède une petite barre à environ 35 m du rivage. Au large, il repose sur le bord interne d'une matre de *Posidonia oceanica* posée à la fois sur le fond sablonneux et sur la plage rocheuse (vers 300 m de distance).

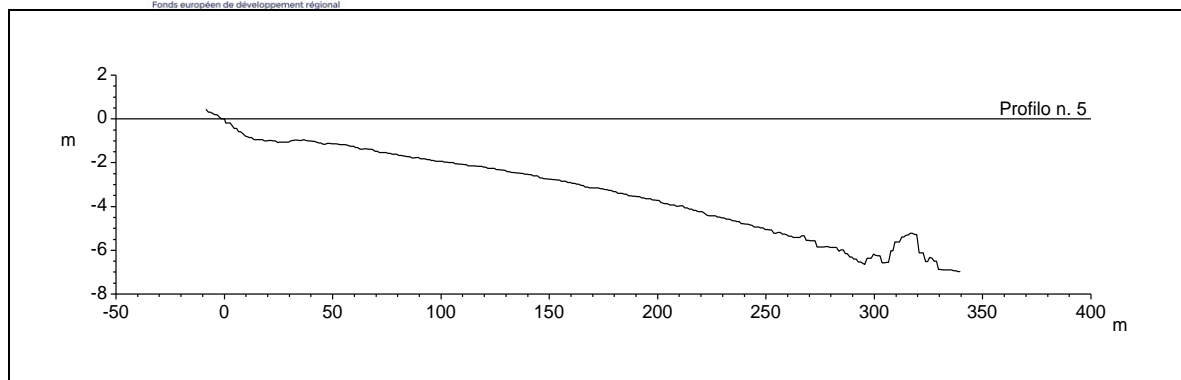


Illustration 3. Profil bathymétrique de la plage située dans la section centrale (déformation verticale 1:10)

Connaissances disponibles.

La plage du golfe de Follonica a été étudiée dans le cadre du programme CNR Régime et dynamique des côtes (Bartolini *et al.*, 1976, 1979) et a ensuite fait l'objet de recherches menées par les provinces de Grosseto et de Livourne et par la Région Toscane (Aiello *et al.*, 1980, Pranzini, 2000, Cipriani *et al.*, 2011), ainsi que directement de l'UNIFI (par exemple Carli *et al.*, 2008, Ferri 2008, Pranzini *et al.*, 2018). Une partie des résultats de cette recherche est contenue dans des rapports non publiés disponibles auprès des diverses administrations qui les ont commandés.

Des études bathymétriques ont été commandées par la Région Toscane en 2011 et 2012.

Le projet qui est suivi par MAREGOT, développé par la Province de Grosseto et mis en œuvre par la Région Toscane, est basé sur une étude morphologique et sédimentologique du Département des Sciences de la Terre (UNIFI) d'un biologiste du Département de Biologie et Génétique Animales (UNIFI) et sur la modélisation numérique faite par DICEA (UNIFI).

Thème	Données	Nature des données	Période	Source	Bibliographie
Evol. Linea riva,		Restituzione linee di riva,	Anni '70		Bartolini et al (1976)
Geomorfologia		Indagini geomorfologiche e sedimentologiche	Anni '80		
		Indagini petrografiche			Gandolfi e Paganelli (1975, 1976, 1979)
Geomorfologia		Telerilevamento	Anni '80		
Trasporto sedimentario		Modellistica numerica	Anni 2000		DEAM (2007)
Geomorfologia					Regione Toscana
Evol. Linea di Riva	Linee riva 1954, 1976, 1981, 1984 ???	Carta topografica	1938-1984		Regione Toscana (1989)
Petrografia					Regione Toscana
		Progetto del porto			

Tableau 1 - Connaissances disponibles pour le site de Pratoranieri Les références bibliographiques complètes se trouvent à la fin du chapitre

Etat des connaissances

Risque côtier

Evolution de la ligne de rivage

Les données disponibles permettent d'affirmer que l'évolution de l'ensemble du littoral du golfe de Follonica, qui avait tendance à être modérément en retrait, est aujourd'hui complètement contrôlée par les différents travaux en mer réalisés entre les années 40 et 80, qui protégeaient quelques masses sédimentaires disponibles. Le littoral est ainsi subdivisé en cellules artificielles avec peu de possibilités de transferts sédimentaires entre l'une et l'autre, à l'exception de transits résiduels sableux vers des ouvrages de défenses encore non saturées.

Le site pilote est encore en conditions naturelles jusque dans les années 1940 (Illustration 4). Les premières interventions anthropiques sont liées à la réalisation des jetées des débouchés en mer des canaux de récupération: ceux du Casello del Genio Civile ne sont pas inclus dans l'édition 1942 de la carte IGM à l'échelle 1: 25.000 (Illustration 4). La construction sur la dune de la colonie touristique de Baia Toscana a conduit à des changements importants dans la structure de la zone côtière. L'intervention a été motivée non seulement par la perte du caractère naturel de l'une des rares étendues de dunes bien préservées du golfe, mais aussi par l'apparition de faibles signes d'érosion, ce qui a conduit à la construction de travaux de défense (Illustration 5) qui ont endommagé le secteur adjacent.

Un projet visant à supprimer ces ouvrages et à créer des falaises les plus éloignées du rivage est en cours d'élaboration, tandis qu'une falaise parallèle a été récemment construite en face de l'estuaire de Fosso Cervia, qui attire désormais le sable des secteurs adjacents.

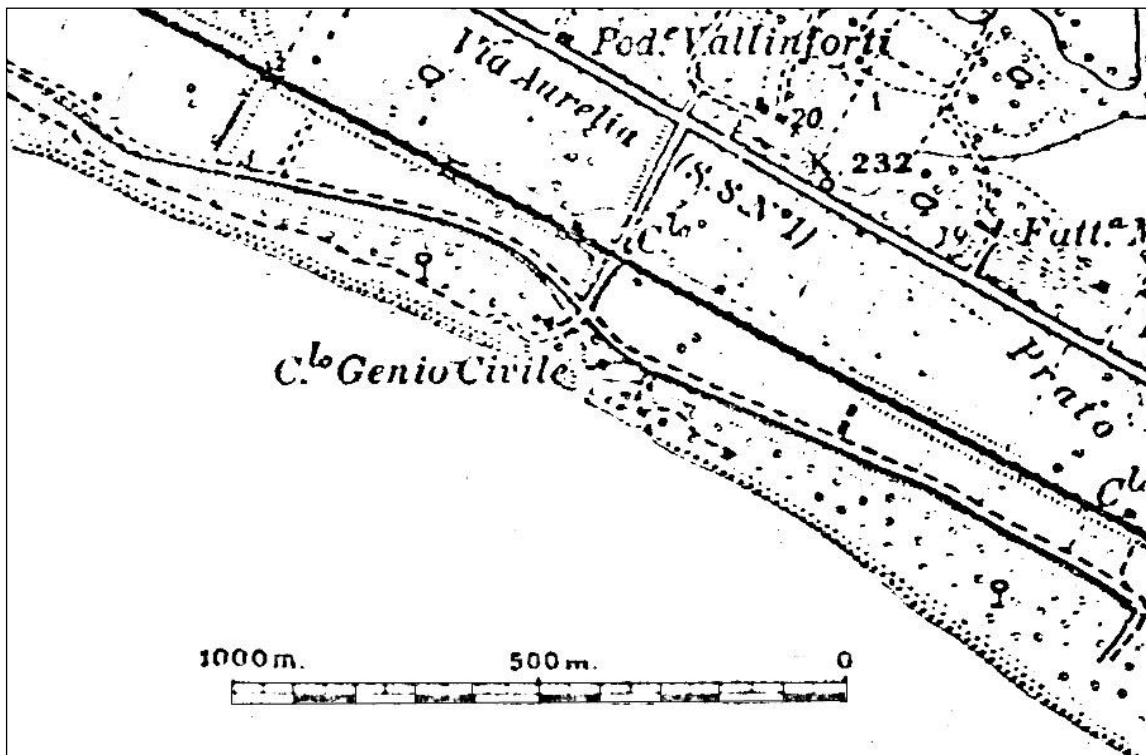


Illustration 4 - Le trait de littoral considéré dans l'édition du 1942 du papier IGM en escalier 1:25.000



Illustration 5. Défenses parallèles et adhérentes sur la côte de Baia Toscana

Tableau 2. Variation de surface (m²) de la plage a émergé dans le secteur considéré

1938-1954	1954-1976	1976-1984	1984-2000	2000-2010
-2566,7	-2284,1	-5117,2	-1498,2	-3194,6

Tableau 3. Déplacement moyen (m) de la ligne de rivage dans le secteur considéré

1938-1954	1954-1976	1976-1984	1984-2000	2000-2010
-3,8	-3,4	-7,6	-2,2	-4,7

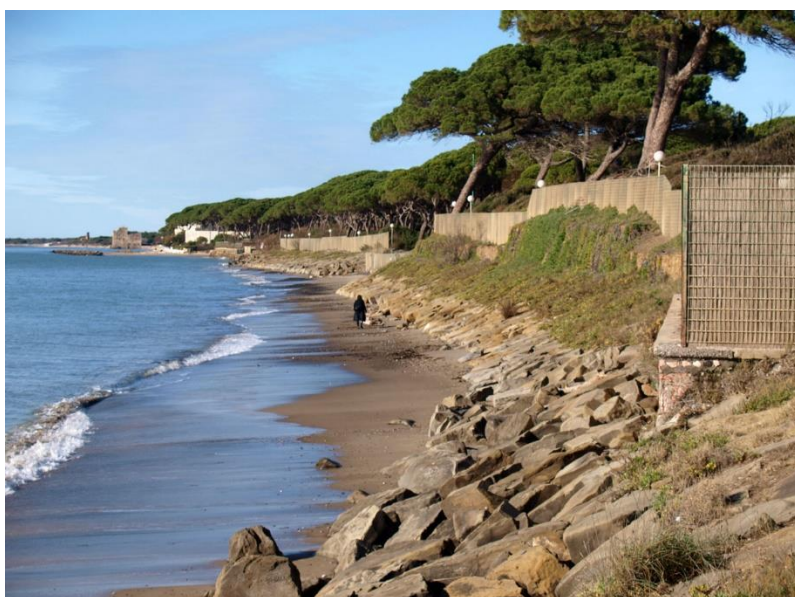


Illustration 6 – Ouvrage de défense dure au pied de la dune devant laquelle la plage de gravier a été construite

Une étude réalisée par le Département des Sciences de la Terre de l'Université de Florence pour le compte de la province de Grosseto montre que cette plage s'érode, bien que modestement, au moins depuis que des données topographiques fiables existent, avec une perte moyenne globale de 21,7 m (0,3 m/an) entre 1938 et 2010. (Tableaux 2 et 3, Illustration 6).

La taille moyenne des sédiments naturels tend généralement à décroître du rivage vers le fond marin en raison de la réduction de l'énergie de dépôt, même si tous les sédiments à partir de l'isobathe de 1 m sont classés en sable fin selon l'échelle de Wentworth (taille moyenne entre 2 et 3 phi). Le long de la plage, c'est dans la bande faisant face à la pente maximale que les sédiments les plus grossiers sont présents, quasiment tous inclus dans les granules ($-2 < \phi < -1$) et les sables moyens ($1 < \phi < 2$).

La carte de la répartition des milieux (Illustration 7) confirme la présence de sables fins au-delà du littoral, sur la majeure partie de la surface entre ce dernier et le littoral et sur le tombolo présent à l'extrémité est de la zone.

Les sédiments plus grossiers se trouvent sur le rivage et pénètrent dans les sections non protégées par le banc, notamment le plus au large, prouvant que ce sont celles qui sont concernées par la plus grande énergie du mouvement des vagues.

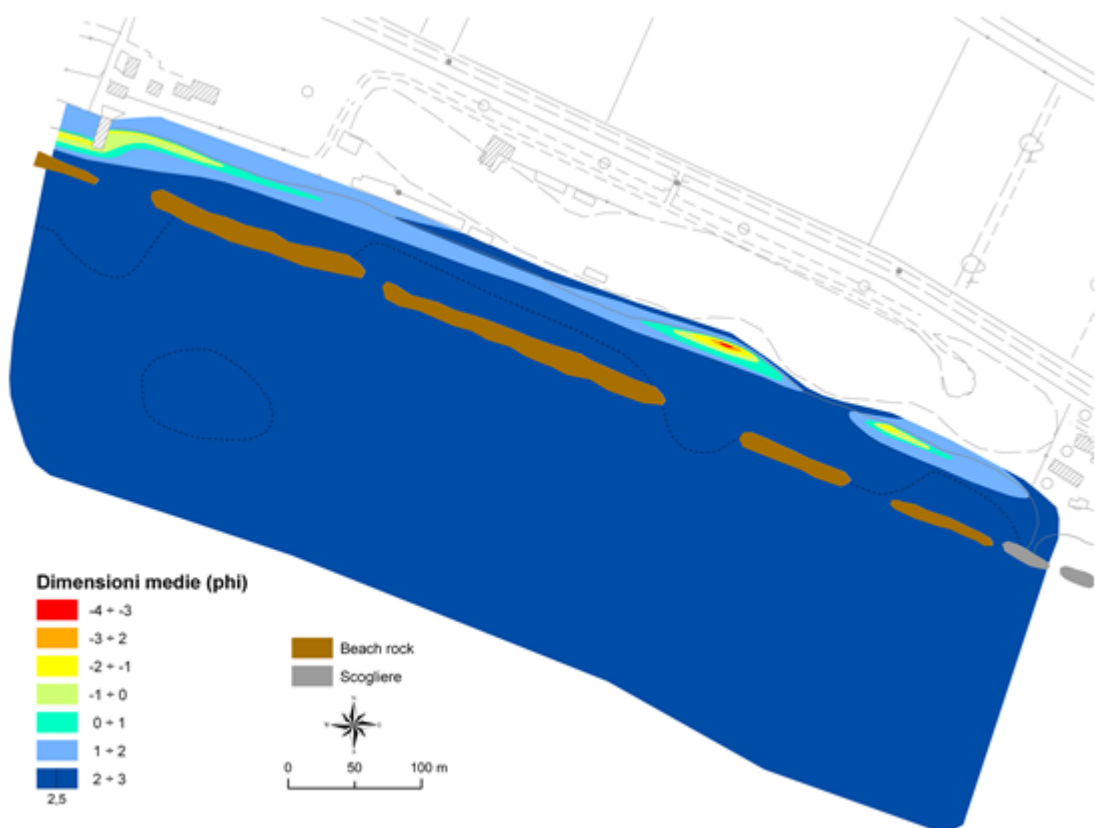


Illustration 7. Carte de la taille moyenne des sédiments (Mz) en janvier 2010

Entre 2016 et 2017, la Région Toscane a mis en œuvre l'intervention de rééquilibrage prévue par la province de Grosseto. Il s'agissait de la construction de trois bancs (émergeant sur la plage et submergées dans la mer) avec environ 30 000 m³ de graviers extraits en partie des carrières du lit de la rivière et partiellement concassés (Illustration 8).

Pour ce projet, aucun suivi n'a été prévu et il a été décidé de l'analyser dans le cadre du projet MAREGOT précisément à cause de l'intérêt que suscite l'alimentation des plages en graviers même sur le territoire transfrontalier.

Inondation côtière

La zone derrière la plage est en partie composée de zones humides récemment aménagées. La ligne de dunes, en partie construite, est une barrière non continue dans le cas de fortes tempêtes. Notez qu'il n'y a pas de données récentes sur l'affaissement éventuel de la région (subsidence tectonique), mais ce processus est reconnu intense à l'extrémité ouest du golfe.



Illustration 8. Matériaux de rechargement en graviers sur la plage de Pratoranieri (novembre 2017)

Plans de prévention

Avec le document opérationnel pour la récupération et le rééquilibrage du littoral, l'intervention 2016-DC-10 "Riequilibrio et alimentation de la côte Est du Golfe de Follonica" était prévue. Il s'agissait de développer une étude de faisabilité et un projet préliminaire pour lesquels les résultats des études et suivis prévus par le Projet MAREGOT seront importants.

Activités, atouts

Suivi de l'évolution morphologique induite par la modification des ouvrages de défense.

Conclusion

Résumé du problème du site

La plage du site pilote Pratoranieri s'est érodée depuis plus de 70 ans, selon un processus qui a été encouragé au cours des dernières décennies par les effets des ouvrages de défense construits sur les plages adjacentes. Un projet de rééquilibrage côtier basé sur l'alimentation artificielle avec du gravier et sa stabilisation avec des brosses submergées est en cours de finalisation.

L'efficacité de cette solution sera évaluée dans le cadre du projet MAREGOT.

Représentativité transfrontalière du site

La réhabilitation des côtes avec du sable n'est pas toujours économiquement durable, surtout si de gros volumes de sédiments ne sont pas disponibles (par exemple des carrières dans des plages reliques). Aussi la disponibilité de carrières avec des sédiments plus grossiers que localement présents sur la plage pourrait être une solution intéressante pour les régions partenaires.

En Toscane, nous avons déjà connu des cas similaires sur les plages Apuo-Versilia, Marina di Pisa et entre Vada et Cecina Mare. Le suivi de ce dernier cas dans le golfe de Follonica nous permettra d'améliorer notre expérience sur les plages de galets artificielles et de les partager à travers le réseau de partenaires de MAREGOT.

Bibliographie

Aiello E., Bartolini C., Conedera C., Pranzini E., Taccini S. (1980) - Il litorale della Provincia di Livorno tra Marina di Castagneto e Follonica. *Amm. Prov.le Livorno*. 44 pp.

Aiello E., Bartolini C., Caputo C., D'Alessandro L., Fanucci F., Fierro G., Gnaccolini M., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Piccazzo M., Pranzini E. (1976) - Il trasporto litoraneo lungo la costa toscana fra la foce del Fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina. *Boll. Soc. Geol. It.*, 94: 1519-1571.

Bartolini C., Caputo C., Cavazza S., Ceffa L., Celestre P., Cortemiglia G.C., Fanucci F., Fierro G., Gandolfi G., Gnaccolini M., Imperiale G., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Marone V., Mordenti A., Montano F., Nardi M., Paganelli L., Paoletti A., Piacentino G.B., Piccazzo M., Pranzini E., e Versino L. (1976) - Area campione Alto Tirreno. Ricerche sul regime e la conservazione dei litorali. *Rapporto 1974. La Ricerca scientifica*, 92: 61-126.

Bartolini C., Caputo C., D'Alessandro L., Gandolfi G., L., Pranzini E., Pugliese F. (1986) - Atlante delle spiagge italiane. Foglio 128 "Grosseto". C.N.R.- S.EL.CA., Firenze.

Bartolini C., Cavazza S., Gandolfi G., Mazzanti R., Miano V., Paganelli L., Palla B., Pranzini E. (1986) - Atlante delle spiagge italiane. Foglio 111-112 "Livorno e Volterra". C.N.R.- S.El.Ca., Firenze.

Bartolini C., Evangelista S., Gandolfi G., La Monica G.B., Landini B., Paganelli L., Pranzini E., Pugliese F. (1986) - Atlante delle spiagge italiane. Foglio 127 "Piombino". C.N.R.- S.EL.CA., Firenze.

Bartolini, C., Pranzini, E., Lupia Palmieri, L., Caputo C. (1977). Studi di geomorfologia costiera: IV - L'erosione del Golfo di Follonica. *Boll. Soc. Geol. It.*, 96: 87-116.

Carli S., Iandelli N., Pranzini E., Salvatori R. (2008) - L'utilizzazione di immagini telerilevate ad alta risoluzione per lo studio dell'erosione costiera: estrazione della linea d'acqua e valutazione della sua accuratezza. *Studi costieri*, 14: 43-54.

Cipriani, L.E., Ferri, S., Lami, G., Pranzini, E. (2011) - Human Impact on Shoreline Evolution Along the Follonica Gulf (Southern Tuscany): How Tourism May Kill the Goose That Lays the Golden Egg. *In: Micallef, A. (ed.), MCRR3-2010 Conference Proceedings, Journal of Coastal Research, Special Issue, No. 61, pp. 290 - 294. Grosseto, Tuscany, Italy, ISSN 0749-0208.*

De Filippi G.L., Duchini E., Pranzini E. (2008) - Closure Depth estimation along the Tuscan coast aimed at short and long term coastal monitoring. *In: Beach Erosion Monitoring, a cura di E. Pranzini e L. Wetzel, BeachMed-e/OpTIMAL Project, Nuova Grafica Fiorentina, Firenze, pp 33-50*

Ferri S. (2008). Risposta granulometrica della spiaggia in seguito alla costruzione di opera a mare. Unpublished Ph.D. Dissertation.

Gandolfi G., Mordenti A., Paganelli L. (1976) - Composizione provenienza e dispersione delle sabbie. - *In: Ricerche sul regime e la conservazione dei litorali, Area campione Alto Tirreno. Rapporto 1974, Quaderni Ricerca Scientifica, n. 92, 112-115.*

Gandolfi G., Paganelli L. (1979) - Le province petrografiche del litorale toscano - *Bollettino Società Geologica Italiana, n. 96, 653-663.*

landelli N., Pranzini E. (2008) - Waterline extraction from Ikonos images addressed at beach erosion monitoring. . In: Beach Erosion Monitoring, a cura di E. Pranzini e L. Wetzel, BeachMed-e/OpTIMAL Project, Nuova Grafica Fiorentina, Firenze, pp 51-60.

Pranzini E. (1983) - Random changes in beach sand grain-size parameters. Boll. Soc. Geol. It., 102: 177-189.

Pranzini E. (2001). Studio della dinamica morfologica e sedimentaria del Golfo di Follonica. Rel. Inedita, Regione Toscana.

Pranzini, E, Jackson, N.L., Lami, G., Nordstrom, K.F., Rossi, L. (2018). Reshaping beach morphology by modifying offshore breakwaters. Ocean and Coastal Management, 154: 168-177.

Pranzini E., Simonetti D. (2008) - Beach evolution monitoring: Surface Variation Analysis vs. Transept Based Analysis. In: Beach Erosion Monitoring, a cura di E. Pranzini e L. Wetzel, BeachMed-e/OpTIMAL Project, Nuova Grafica Fiorentina, Firenze, pp 25-31.

Sintesis (2005). Studio meteomarinario. Ripascimento arenile e valutazione dell'efficacia opere realizzate per la difesa dell'abitato nel tratto del Golfo di Follonica compreso tra il Pontile Nuova Solmine e Prato Ranieri. Unpublished report, Provincia di Grosseto, 44 pp.

Site de San Vincenzo (Toscane, Italie)

Présentation du site

Localisation

Le site pilote de San Vincenzo est situé sur la côte de la Toscane centrale, dans la province de Livourne et englobe toute la côte de San Vincenzo. Sa longueur est d'environ 11 km et est orientée Nord-Sud. Au Nord, il se prolonge avec la côte de Bibbona et Cecina, tandis qu'au sud il s'achève contre le promontoire de Piombino.

Description géographique

Dans cette portion littorale, la contribution de l'alimentation de la rivière Cecina, qui s'écoule plus au nord, devient progressivement moins importante vers le sud, où les petits cours d'eau qui drainent les collines métallifères jouent un rôle de plus en plus important.

En effet, Cette zone a été récemment affectée par l'expansion du port de San Vincenzo, ce qui pourrait provoquer l'érosion des plages situées plus au sud, qui montrent une urbanisation décroissante vers le sud, jusqu'à des conditions naturelles dans le parc de Rimigliano.

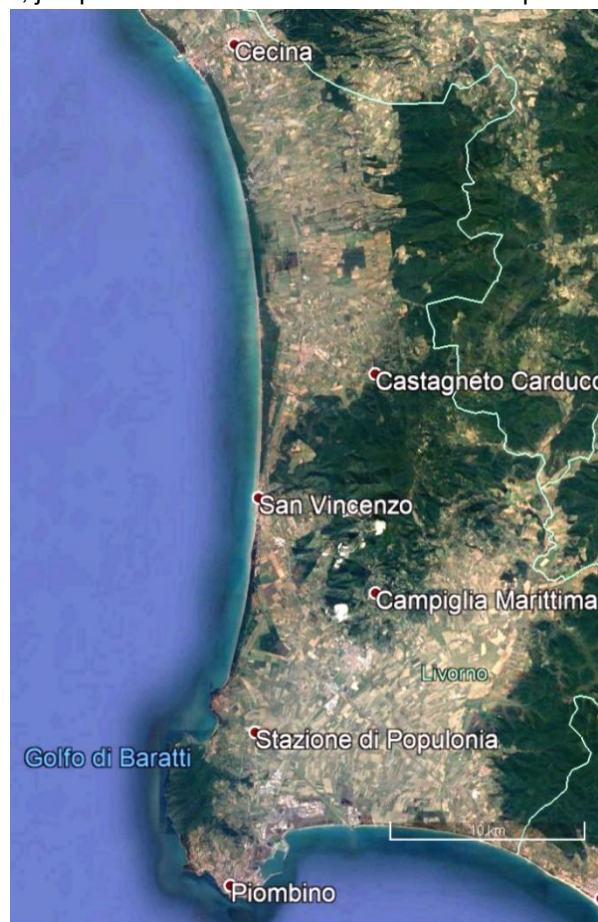


Illustration 1. Le littoral entre Cecina et Follonica dans une image Google Earth

Pour atténuer les effets du port, un brise-lame a été construit. Mais il n'a pas produit les résultats escomptés. On ne sait pas non plus si le déficit sédimentaire est dû à une sédimentation excessive dans le nord, même sur les fonds marins, ou s'il est le résultat d'un problème global de réduction de l'apport sédimentaire.

Le suivi de la plage et des fonds marins devrait donner des indications et fournir des éléments pour une gestion durable à la fois de la plage exploitée par une activité touristique intense et des plages adjacentes.

Caractéristiques physiographiques / de l'écosystème

La côte de San Vincenzo est située à l'extrémité sud de l'unité physiologique de Punta Lillatro - Torre Nuova, dans cette section principalement alimentée par les apports sédimentaires de la rivière Cecina et, subsidiairement, par ceux des plus petits cours d'eau qui descendent des Collines Métallifères.

Déjà Saggini, en 1968, a reconnu, sur une base morphologique, la présence de plusieurs cellules sédimentaires, une située entre Punta Lillatro et Punta del Tesorino, avec un flux sédimentaire dirigé vers le sud, entre l'embouchure de la rivière Cecina et Punta del Tesorino, au nord, et un de la Foce del Fiume Cecina à Torre Nuova, dirigé vers le sud. Gandolfi et Paganelli (1975), sur la base de la composition minéralogique des sédiments de plage, ont confirmé ce tableau général, en ajoutant un contre-courant dirigé vers le nord de Torre Nuova à C. Cavalleggeri (Illustration 2), confirmé par Aiello *et al.* (1980).

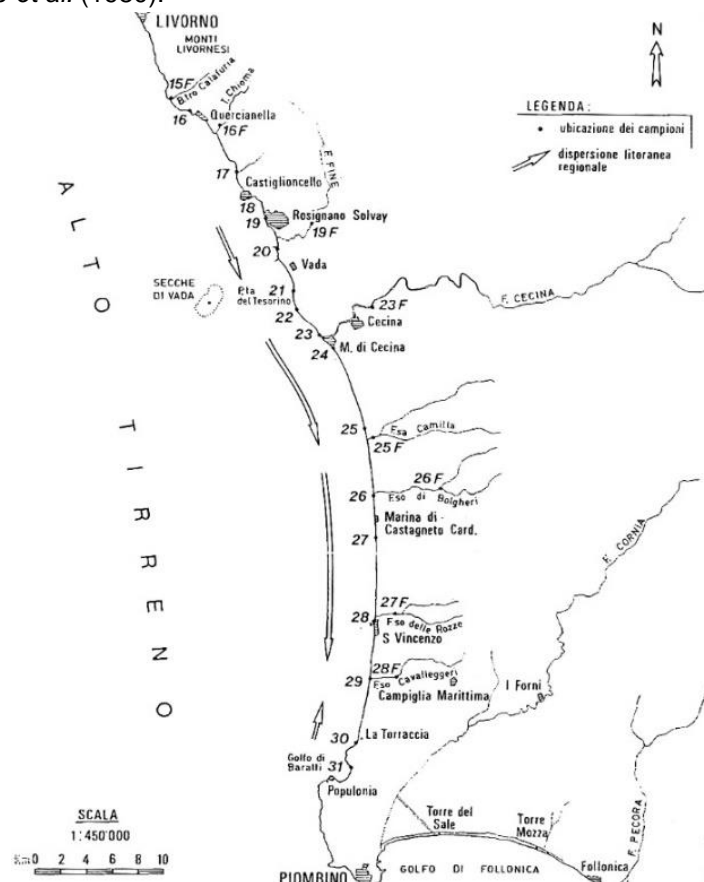


Illustration 2. Direction du transport côtier déterminée sur la base de la composition minéralogique et pétrologique des sédiments riverains (d'après Gandolfi et Paganelli, 1975)

Bartolini et Pranzini (1986) ont effectué une analyse détaillée des écoulements sédimentaires sur le tronçon sud dans le cadre d'une étude visant à concevoir des ouvrages de rééquilibrage du littoral de San Vincenzo (Studio Volta, 1986, Figs 3 et 4). Ici l'existence d'une inversion du flux au sud de La Punticella a clairement émergé.

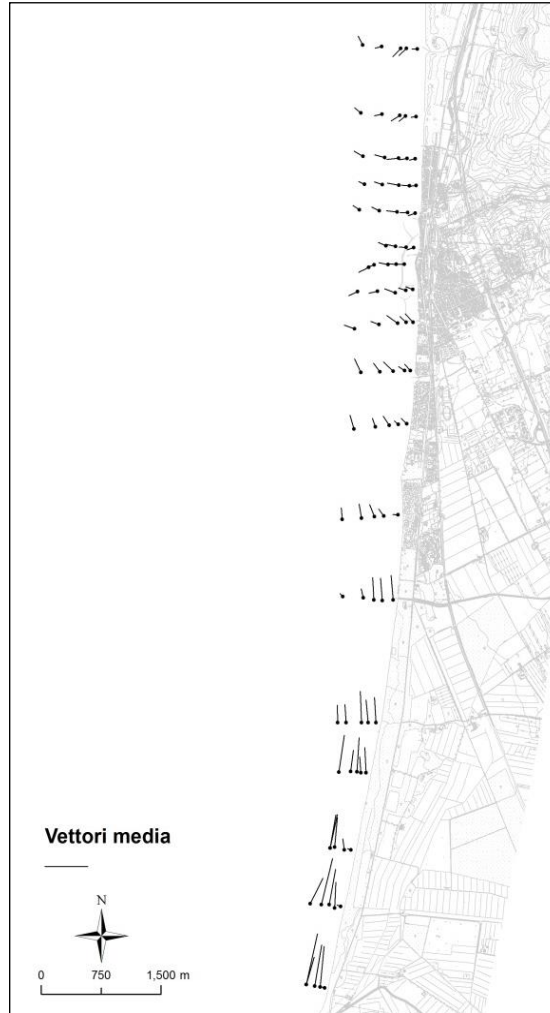


Illustration 3. Flux sédimentaires identifiés selon le modèle de “downdrift fining”.

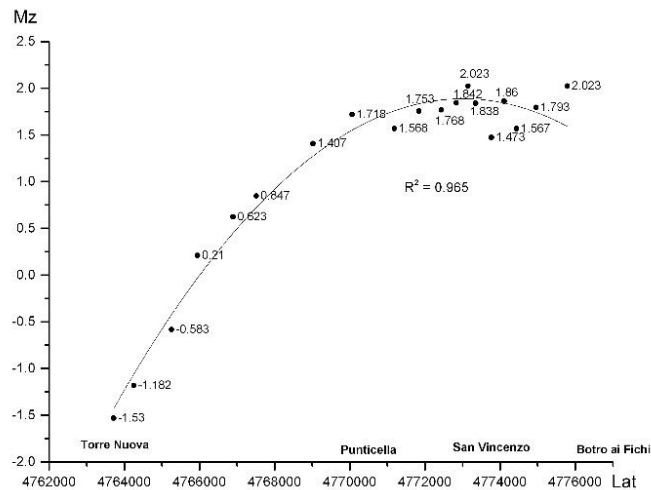


Illustration 4. Variation de la taille moyenne (Mz) des sédiments le long de la rive

La définition des écoulements sédimentaires sur la base du climat météorologique a été réalisée par le Département des Sciences de la Terre de l'Université de Florence dans le cadre du projet Beachmed - et avec la collaboration du membre DEAM de Pise. À cette occasion, le transport potentiel (en m³/an) a été calculé dans l'unité physiographique confirmant à la fois le point de convergence près de Punta del Tesorino et celui situé entre San Vincenzo et Torre Nuova. Le transport potentiel vers San Vincenzo était de 37 000 m³/an vers le sud et de 34 000 m³/an vers le nord, avec un résultat net de 3 000 m³/an vers le sud.

Des valeurs similaires ont été obtenues dans les études de base pour la conception du nouveau port, qui indiquent à 5.000 m³/an le transport potentiel vers le sud (notez que l'évaluation a été faite ici par la même société DEAM).

Les fonds marins du site pilote sont principalement sablonneux (sables moyens et sables fins), mais ils présentent des affleurements étendus de roche de plage et une prairie fragmentée de *Posidonia oceanica*.

Connaissances disponibles

La plage de San Vincenzo a été étudiée déjà dans le régime PNRO et la dynamique côtière (Aiello et al, 1976;.. Bartolini et al, 1976) et il a ensuite fait l'objet de la recherche promue par la Province de Livourne (Aiello *et al.*, 1976, 1979), par la Région Toscane (1989, 2005) et par des chercheurs appartenant au CNR et à l'Université de Florence (Mazzanti *et al.*, 1980). Des études visant à la reconfiguration du port et à la défense du rivage ont été menées d'abord par Studio Volta (1986), puis, pour la récente expansion, par MODIMAR. L'Université de Florence a récemment mené une étude centrée sur un tronçon situé au sud du port, où un travail de reconfiguration des ouvrages de défense existants est en cours.

Thème	Données	Nature des données	Période	Source	Bibliographie
Morfologia della spiaggia		Dati da sopralluoghi	Anni '70		Ceffa e Gnaccolini (1976)
Evol. Linea riva, Sedimentologia, Petrografia		Restituzione linee di riva, analisi granulometriche e petrografiche	Anni '70		Aiello <i>et al.</i> (1976, 1979)
Geomorfologia		Ingadani geomorfologiche e sedimentologiche	Anni '80		Mazzanti <i>et al.</i> (1980)
		Indagini petrografiche			Gandolfi e Paganelli (1975, 1976, 1979)
Dinamica sedimentaria		Osservazioni morfologiche	Anni '60		Saggini (1963, 1966, 1967)
Geomorfologia		YTelerilevamento	Anni '80		Alessandro e Pranzini (1986)
Trasporto sedimentario		Modellistica numerica	Anni 2000		DEAM (2007)
		Progettazione			Studio Volta (1986)
Geomorfologia					Regione Toscana (2005)
Evol. Linea di Riva	Linee riva 1938, 1954, 1976, 1981, 1984	Carta topografica	1938-1984		Regione Toscana (1989)
Petrografia		Analisi petrografiche			Regione Toscana (2005)
		Progetto del porto			MODIMAR

Tableau 1 - Connaissances disponibles pour le site de San Vincenzo Les références bibliographiques complètes se trouvent à la fin du chapitre

Etat des connaissances

Risques côtiers

Evolution de la ligne de rivage

Des données de bonne qualité pour reconstituer l'évolution de la côte sont disponibles depuis 1938, et ils montrent que de fortes variations positives ont eu lieu dans la partie nord, en raison de l'effet direct de la réduction de la contribution sédimentaire de la rivière Cecina (Bartolini *et al.*, 1982) et en raison de la construction d'ouvrages en mer à Vada et à Cecina Mare (Illustration 6).

Des expansions des plages de sable se sont produites avec l'extraction des sables blancs (Solvay) et la construction de Pietrabianca Brosse et également dans le cadre de travaux de protection du quai Vittorio Veneto. Par ailleurs, la réalisation des flèches Cecina Mare a donné des résultats similaires, même s'il n'est pas possible d'apprécier l'effet de ceux réalisés avant 1938.

De plus, les effets des projets de rééquilibrage mis en œuvre dans le nord et sud de l'embouchure de la Cecina F., au début des années 90 sont importantes, en particulier par rechargement artificiel. Les processus d'érosion les plus intenses sont ceux qui se sont produits au sud de Cecina Mare (Illustration 5) et qui ont entraîné la perte d'une grande partie de la forêt de pins. Vers le sud, les variations de la ligne de rivage sont moins intenses, passant de conditions d'érosion à des conditions d'accumulation, avec un point d'équilibre qui se déplace de plus en plus vers le sud, atteignant Marina di Bibbona.



Illustration 5. Mosaïque de Sonar à Balayage latéral en relief nord et au sud du port.

Au sud de cet emplacement, les variations montrent une irrégularité extrême, due à la présence de méga-croissants qui se déplacent le long de la côte et qui font osciller les différentes sections entre l'érosion et l'accumulation.

En comparant la position de la ligne de rivage de 1938 avec celle de 2010 (Illustration 6), même avec les limites d'une comparaison qui ne permet pas d'isoler les effets des interventions individuelles menées sur la côte, il y a une tendance d'expansion située entre les plages Punta Lillatro et Bonaposta, dues à la fois aux sables Solvay, aux travaux créés pour réduire le transit le long du rivage, et aux interventions de défense menées à Vada et à Punta del Tesorino.

Encore plus évidente est la perte de plage qui a eu lieu entre Capo Cavallo et Bibbona, avec le point de retrait maximum au sud de Cecina Mare, une érosion de plus de 130 m de la plage, tandis que la côte de Marina di Castagneto a bénéficié d'une accrétion qui a dépassée localement 30 m. La côte située au nord du port de San Vincenzo a enregistré une progradation qui a atteint 20 m, qui, s'il n'y avait pas les changements dans la ligne de rivage induite par le port, pourrait être pris en compte dans l'équilibre relatif du littoral.

Inondation côtière

La présence de plusieurs cordons dunaires de hauteur importante, à l'exception du tronçon urbain de San Vincenzo, empêche l'inondation de la mer de l'arrière-plage. Cependant, la zone abritait plusieurs zones humides qui ont été récupérées entre le XVIIIe et le siècle dernier (Mazzanti *et al.*, 1980, Alessandro et Pranzini, 1986), comme Il Pratale et Lago di Rimigliano, et qui peuvent encore être sujet aux inondations pendant les fortes pluies et les inondations.

Plans de prévention

Avec le document opérationnel pour la récupération et le rééquilibrage du littoral, le programme de restauration de la plage "San Vincenzo 2016/2016-DC-8" a été planifié, dans le but de donner à la plage de San Vincenzo une morphologie qui dissipe les vagues de tempêtes les plus intenses. Pour atteindre cet objectif, en relation avec la gestion du domaine maritime sous la juridiction de la municipalité, un accord a été signé en novembre 2017 avec la municipalité de San Vincenzo pour cette conception.

En application de cet accord, la municipalité a élaboré un projet exécutif pour un premier lot de l'intervention qui prévoit la création de rechargement artificiel et l'adaptation de la digue submergée devant la côte immédiatement au sud du miroir d'eau calme au niveau de l'entrée du port. Avec la Résolution 338 du 03 avril 2018, le montant de 1 231 710,04 euros a été programmé pour l'exécution des travaux sus-mentionnés.

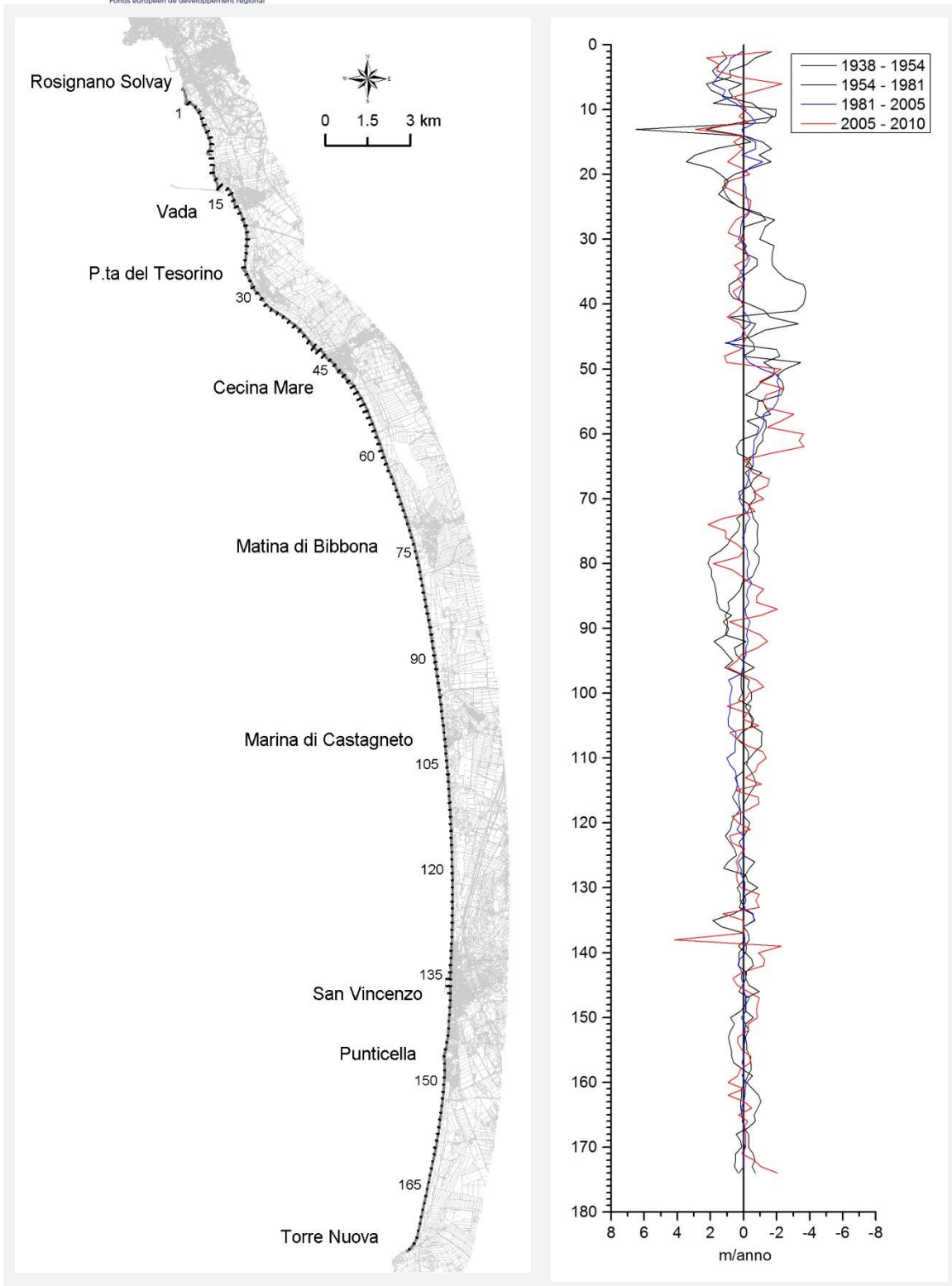


Illustration 6. Taux moyen de déplacement de la ligne de rivage entre 1938 et 2010 dans l'unité physiographique Punta Lillatro - Torre Nuova. Le site pilote couvre les secteurs 130 - 165

Activités, atouts

Ce site pilote prévoit la récupération et la mise à jour des données morphologiques, en développant également des méthodologies pertinentes qui pourraient être utilisées dans d'autres sections côtières de la zone transfrontalière. Une enquête sera également lancée sur les fonds marins pour la recherche de sédiments à utiliser pour la mise en place du tronçon situé au sud du port. Cette étude utilisera des levés bathymétriques et une étude de reconstitution de la dynamique sédimentaire, avec la présence supposée de courants concentrés dans les chenaux incisés dans le fond rocheux situé au sud de la section en question.

Des modèles de gestion du stock sédimentaire qui contrastent avec la prolifération des ouvrages de défense rigides devront être développés spécifiquement.

Conclusions

Résumé du problème du site

Ce littoral majoritairement naturel, avec un cordon dunaire bien développé et fondamentalement en équilibre, a subi tout d'abord l'impact de la construction d'un petit port puis, par phases successives, de son extension et de sa transformation en port touristique.

Cela a imposé la construction de travaux pour atténuer ses effets sur l'équilibre du système littoral. Ceci risque néanmoins d'exiger d'autres interventions qui auront des conséquences en cascade pouvant compromettre un large linéaire côtier, avec des effets potentiels sur la zone protégée du parc de Rimigliano. Des projets de surveillance devraient alors être spécifiquement mis en place pour gérer et conserver ce littoral.

Représentativité transfrontalière du site

Dans les régions partenaires, il existe de nombreux ports touristiques qui affectent la dynamique côtière et sont proches des zones naturelles, pour lesquelles il n'est pas approprié de défendre avec des ouvrages rigides. Le cas de San Vincenzo et les solutions de gestion qui devront être développées pourront faire l'objet de réflexion dans les autres régions.

Bibliographie

Aiello E., Bartolini C., Conedera C., Pranzini E. (1979) - L'erosione del litorale livornese e le sue cause. Amm. Prov.le Livorno. 42 pp.

Aiello E., Bartolini C., Caputo C., D'Alessandro L., Fanucci F., Fierro G., Gnaccolini M., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Piccazzo M., Pranzini E. (1976) - Il trasporto litoraneo lungo la costa toscana fra la foce del Fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina. Boll. Soc. Geol. It., 94: 1519-1571.

Alessandro V., Pranzini E. (1986) - Confronto fra dati rilevati da aereo nell'infrarosso vicino e termico e verità al suolo nella fascia costiera fra San Vincenzo e Follonica (Toscana). Quad. Mus. St. Nat. Livorno. 7: 39-53.

Bartolini C., Caputo C., Cavazza S., Ceffa L., Celestre P., Cortemiglia G.C., Fanucci F., Fierro G., Gandolfi G., Gnaccolini M., Imperiale G., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Marone V., Mordenti A., Montano F., Nardi M., Paganelli L., Paoletti A., Piacentino G.B., Piccazzo M., Pranzini E., Versino L. (1976) - Area campione Alto Tirreno. Ricerche sul regime e la conservazione dei litorali. Rapporto 1974. La Ricerca scientifica, 92: 61-126.

Bartolini C., Cavazza S., Gandolfi G., Mazzanti R., Miano V., Paganelli L., Palla B., Pranzini E. (1986) - Atlante delle spiagge italiane. Foglio 111-112 "Livorno e Volterra". C.N.R.- S.El.Ca., Firenze.

Ceffa L., Gnaccolini M. (1976) - Il litorale toscano tra Rosignano Solvay e il Golfo di Baratti.- Ricerche sul Regime e la Conservazione dei Litorali. Rapporto 1974, parte II: Area Campione Alto Tirreno, Quaderni Ricerca Scientifica, n. 92, 88-95.

Gandolfi G., Mordenti A., Paganelli L. (1976) – Composizione provenienza e dispersione delle sabbie. – In: Ricerche sul regime e la conservazione dei litorali, Area campione Alto Tirreno. Rapporto 1974, Quaderni Ricerca Scientifica, n. 92, 112-115.

Gandolfi G., Paganelli L. (1975) – Il litorale toscano fra Livorno e il promontorio di Piombino (area campione alto Tirreno). Composizione provenienza e dispersione delle sabbie – Bollettino Società Geologica Italiana, n. 94, 1833-1854.

Gandolfi G., Paganelli L. (1979) - Le province petrografiche del litorale toscano – Bollettino Società Geologica Italiana, n. 96, 653-663.

Gnaccolini M. (1976) - Osservazioni sull'erosione in atto in alcuni tratti del litorale toscano – Geologia Applicata ed Idrogeologia, n. IX, 55-63.

Mazzanti R., Pranzini E., Taccini S. (1980) - Studi di geomorfologia costiera: VII - Variazioni della linea di riva dal Pleistocene medio-superiore ad oggi, caratteristiche sedimentologiche e stato delle associazioni vegetali del litorale di San Vincenzo (Toscana). Boll. Soc. Geol. It., 99: 341-364.

Saggini F. (1963) - Particolarità naturali e artificiali della costa sabbiosa maremmana a S. Vincenzo (Prov. di Livorno) - La Provincia di Livorno, n. 5-6, 5-11.

Saggini F. (1966) - Morfologia costiera e trasporto detritico marino sul litorale della Provincia di Livorno - Atti del Convegno per la Difesa del Litorale Toscano, 59-69.

Saggini F. (1967) - Alterazioni del litorale toscano per cause naturali ed artificiali. – Atti del Convegno "Indirizzi di piano per i territori della costa toscana", Quaderni Prov.Livorno, n. 11.

Studio Volta (1986) – Progetto di riequilibrio della spiaggia e progettazione di massima delle opere foranee del porto. Provincia di Livorno e Comune di San Vincenzo (rel. inedita).

Site du Parc régional de la Maremma (Toscane, Italie)

Présentation du site

Emplacement

Le site pilote du parc régional de la Maremma se trouve sur le littoral sud de la Toscane, dans la province de Grosseto. Il s'agit plus précisément du littoral compris entre Marina di Grosseto (embouchure sur la mer du canal émissaire S. Leopoldo, localité Fiumara) et Cala Rossa, qui s'étend sur une longueur d'environ 16,3 km (trait en violet sur la figure 1).

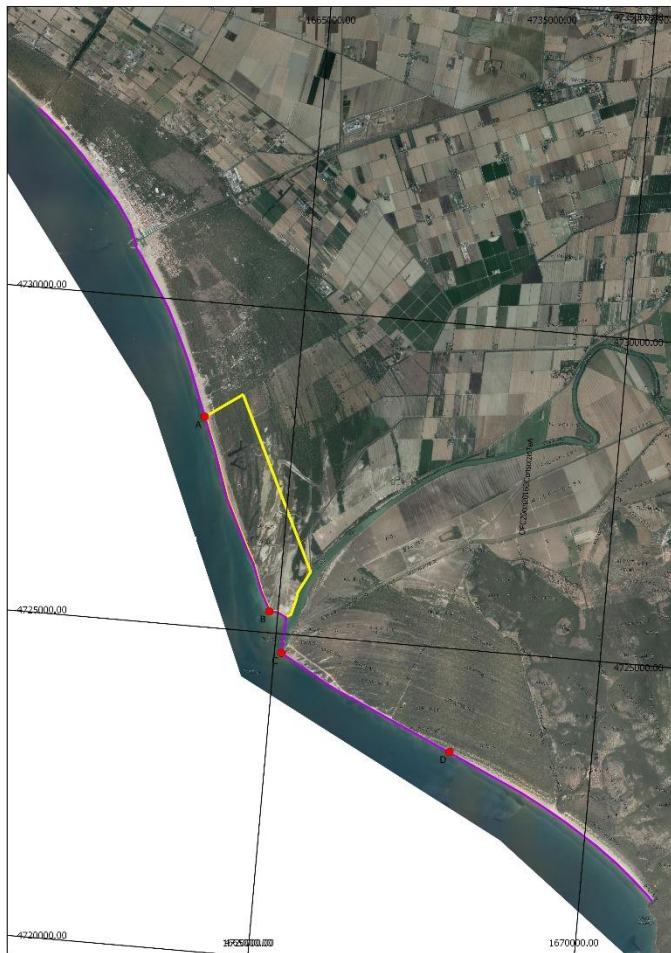


Figura 1. Delta du fleuve Ombrone (orthoimage 20 cm tous droits réservés 2016 Consorzio TeA)

Description géographique

Ce littoral, situé sur le delta du fleuve Ombrone, après des siècles de progradation, est entré dans une phase érosive qui a entraîné le recul de la ligne de rivage d'environ 1000 m dans la pointe de flèche du delta. Le processus, également provoqué par une réduction significative de l'apport sédimentaire par le fleuve, a commencé au niveau de l'embouchure et s'est propagé aux plages latérales, couvrant aujourd'hui une longueur d'environ 15 km. En découpant les cordons de plage (beach ridges) convergeant jadis vers l'embouchure, il a permis que les étangs interdunaires soient aujourd'hui atteints lors des tempêtes, compromettant fortement la végétation hygrophile d'eau douce et la pinède littorale.

L'apex sud du delta a récemment fait l'objet d'interventions de rééquilibrage, tandis que seront évaluées les stratégies d'intervention pour le rééquilibrage du lobe nord, pour lequel il sera nécessaire de définir des stratégies de défense, d'adaptation ou de recul stratégiques.

Afin de soutenir les activités de suivi et d'étude proposées dans le projet Maregot, des modèles d'évaluation de la tendance érosive à long terme seront vérifiés.

Caractéristiques physiographiques/écosystémiques

L'embouchure du fleuve Ombrone est un delta en pointe de flèche fortement influencé par les vagues, en plus d'être caractérisé par un apport fluvial principalement sableux. En cas de crues, le fleuve pousse la barre de l'embouchure vers la mer, mais les vagues et les courants le long du littoral remanient et nettoient ensuite les sédiments, amenant les sédiments fins en suspension vers le large et provoquant une accumulation de sable en forme de cordons (beach ridges), de part et d'autre de l'embouchure. Dans le delta en pointe de flèche, la barre d'embouchure n'est que partiellement affectée par les vagues ; derrière elle, il reste une dépression protégée où domine la décantation de sédiments fins (limon-argile). Avec l'apparition de la barre-cordon, cette partie se trouvant derrière la barre est intégrée à la plaine et devient le siège de miroirs d'eau (localement appelés Chiari) et de marais.

Le profond processus d'érosion en cours a provoqué en 2000, l'écroulement de la première digue le long de la ligne de rivage de l'aile sud et la disparition de la plage dans la zone de l'embouchure du fleuve Ombrone, permettant à la houle de faire entrer l'eau saumâtre vers l'intérieur jusqu'aux marais des Chiari, occasionnant d'importants dommages à l'habitat de l'arrière-plage, avec des problèmes d'altération progressive de l'équilibre de l'écosystème. L'intrusion progressive d'eau salée à l'intérieur du système d'assainissement a également compromis une partie de la pinède grand-ducale plantée par les Lorena au XIXe siècle avec la destruction progressive des espèces arboricoles présentes.



Avant les interventions



Après les interventions

Figure 2. La plage de Marina di Alberese.

Dans le cadre du programme régional d'interventions prioritaires de récupération et rééquilibrage du littoral - D.C.R. 47/2003 - Projet n ° 20 « Foce del fiume Ombrone » (Embouchure du fleuve Ombrone) - pour lutter contre le phénomène de l'érosion côtière dans le parc régional de la Maremma, entre 2013 et 2015, le Consorzio di Bonifica Toscana Sud a effectué des interventions de ré-équilibrage du littoral dont les effets concernent potentiellement la zone géographique qui comprend les territoires inclus dans les SIC côtiers du parc régional de la Maremma : IT51A0039 Palude della Trappola e Bocca d'Ombrone, IT51A0014 Pineta Granducale dell'Uccellina, IT51A0015 Dune costiere del Parco dell'Uccellina (avec une attention particulière à la zone au sud de Collelungo).



Figure 3. Une phase des travaux.

Compte tenu de la valeur considérable des travaux réalisés dans le cadre du programme susmentionné (D.C.R. 47/2003 - projet N°20 « Foce del fiume Ombrone »), il a été nécessaire de mettre en place une surveillance ponctuelle des effets de l'ensemble du projet sur les espèces et les habitats présents dans la zone concernée.

Connaissances disponibles

Cela fait déjà plusieurs dizaines d'années que l'érosion de la ligne de rivage près de l'embouchure du fleuve Ombrone est un problème évident. De récentes études voulues par la Région Toscane et la Province de Grosseto et destinées à effectuer une analyse géomorphologique et sédimentologique du littoral de Grosseto, ont permis de quantifier les processus d'érosion chroniques en cours et de définir leur dynamique et leurs conséquences dans le temps.

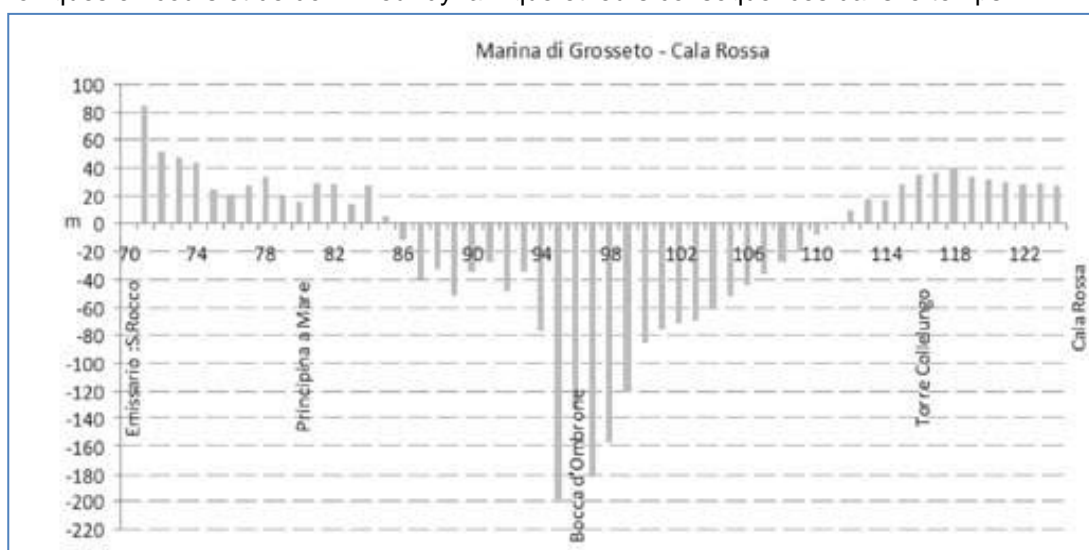


Figure 4. Évolution de la ligne de rivage entre 1984 et 2005.

Une étude de la dynamique sédimentaire du delta du fleuve Ombrone a été réalisée à la fin des années 1980 (Innocenti et Pranzini, 1993) à travers un échantillonnage et une analyse granulométrique des sédiments d'arrière-plage et d'avant-plage collectés lors de mesures bathymétriques de la zone. La comparaison entre les paramètres granulométriques et les caractéristiques morphologiques a mis en évidence une inversion substantielle de la direction des flux de transport solides *longshore* en raison des différents niveaux d'énergie de la houle dans les deux zones de la pointe du delta : alors que le secteur sud est alimenté par des sédiments plus fins, transportés le long du littoral par les mers sujettes au Mistral, du nord au sud, le secteur nord reçoit des apports plus grossiers du fait des agitations du sirocco, dans la direction sud-nord.

Les résultats de l'analyse sédimentologique et de l'étude géomorphologique identifient toutes les deux un processus d'érosion entamé à la seconde moitié du XIXe siècle, et qui doit être rattaché avec le début des travaux d'assainissement par remblais qui ont privé l'apport fluvial au littoral d'une importante quantité de sédiments. D'autres activités anthropiques, menées sur l'ensemble du bassin, de l'extraction de matériaux inertes à la stabilisation des versants, ont produit le même effet : un faible apport sédimentaire et la prédominance de l'action de la mer sur l'embouchure.

Le déficit sédimentaire du littoral en question a ensuite été confirmé par les résultats obtenus en 2006 par l'étude pour l'estimation du transport solide côtier réalisée par TEA Ambiente Srl (2006) qui montre que la zone de Bocca d'Ombrone est soumise à une forte érosion potentielle.

Les travaux de Paris *et al.*, 2002, 2013 et 2014 et de la Région Toscane, sur la dynamique fluviale du fleuve Ombrone de Grosseto, et notamment les études visant à caractériser le phénomène du transport solide à partir de l'analyse granulométrique des sédiments fluviaux, ont permis d'arriver à la conclusion selon laquelle les débits solides en suspension ne contiennent pas, au moins pour les événements considérés, des fractions significatives de matériaux sableux et ne contribuent donc pas de manière significative au rechargement du littoral.

Le cadre des connaissances de la sédimentologie qui concerne la zone en question est complété par l'activité de surveillance réalisée pour le compte du Consorzio di Bonifica Toscana Sud dans le cadre du programme régional d'interventions prioritaires de récupération et rééquilibrage du littoral - D.C.R. 47/2003 - projet N°20 « Foce del fiume Ombrone » (Rapport final, 2015).

Les interventions du Consorzio di Bonifica Toscana Sud ont été réalisées (2013-2015) dans le but de stabiliser, ou de ralentir de manière significative, le processus d'érosion en cours sur la plage de Marina di Alberese, à travers la construction de 6 épis submergés qui ne présentent donc aucun impact sur l'environnement. Dans le même temps, il a également été procédé à la reconstruction de la digue au sol à partir de la digue gauche de l'Ombrone afin d'empêcher l'intrusion d'eau salée dans le système humide de l'arrière-plage, permettant également d'optimiser le fonctionnement du système des canaux de drainage d'assainissement.

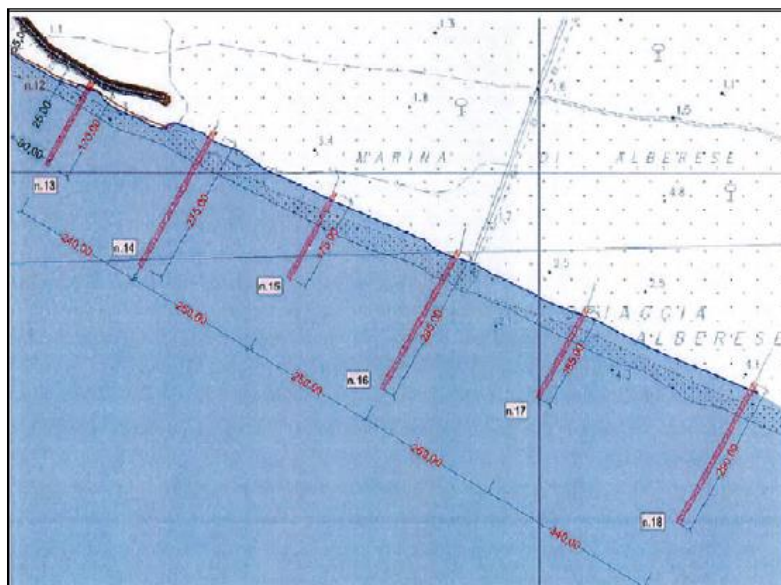


Figure 5. Localisation planimétrique de la série d'épis en mer (submergés).

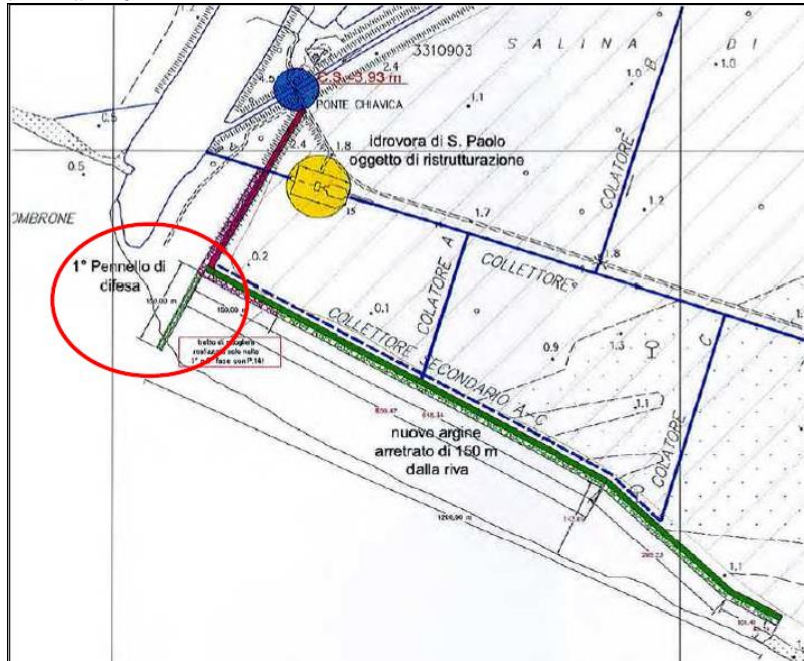


Figure 6. Localisation de l'épi d'embouchure (émergé) et de la nouvelle digue reculée.

Dans le cadre des activités de surveillance de la dynamique côtière, sur le trait de côte qui commence à Principina a Mare et se termine à Cala di Forno (environ 11 km), ont été réalisés, *post operam*, des mesures topographiques et bathymétriques ainsi qu'un classement de la granulométrie des sédiments (2013-2015).

Les résultats des quatre relevés topographiques effectués montrent un recul moyen de 0,66 m du trait de côte. En particulier :

- sur le littoral au sud de l'embouchure du fleuve Ombrone, après une première phase d'avancement rapide et considérable du trait de côte, constaté lors des deux premières mesures topographiques, la tendance s'est inversée, ce qui n'a pas permis de définir une profonde tendance évolutive du littoral ;
- inversement, sur le littoral au nord de Bocca d'Ombrone, on observe un important recul du trait de côte qui atteint les sections les plus proches de la plage de Principina a Mare, sur lesquelles on observe un avancement prononcé ;
- la zone de Collelungo-Cala di Forno est enfin caractérisée par un léger phénomène érosif, près de Cala Rossa, dont la faible envergure ne permet pas une vérification en arrière dans le temps.

De façon globale, le recul moyen du trait de côte est fortement influencé par le tronçon au nord de l'embouchure (recul prononcé), tandis qu'au sud, ce qui est plus évident, c'est l'avancement du littoral après la réalisation des épis submergés.

Les mesures bathymétriques effectuées ont permis de calculer les volumes de matériaux érodés ou déposés sur le niveau moyen de la mer entre une section et l'autre. Sur l'ensemble du tronçon examiné, entre octobre 2013 et juin 2015, le volume total net de sédiments déposés s'élevait à 168 041,36 mètres cubes.

Ce résultat, qui ne semble pas correspondre avec ce qui a été constaté pour le trait de côte qui présente globalement un recul, tient en effet également compte du transport solide qui se produit jusqu'à environ -5 m de profondeur et pas seulement à proximité du littoral.

En subdivisant le tronçon en deux parties à cheval sur l'embouchure du fleuve Ombrone, on observe, au sud, une tendance au dépôt correspondant à 80 % du volume total de matériaux déposés sur l'ensemble du tronçon d'étude ainsi qu'un léger avancement du trait de côte (+0,45 m en moyenne), ce qui prouve que les épis sont globalement efficaces pour emprisonner les sédiments.

Le phénomène pourrait être dû au fait que les épis, en plus d'intercepter les courants côtiers, retiennent également les sédiments fins résultant des événements de crue du fleuve Ombrone. Ces matériaux, qui sont toutefois compris dans le calcul du bilan sédimentaire positif mais ne contribuent pas activement à l'avancement du trait de côte car ils sont trop fins, restent emprisonnés loin du rivage et peuvent être facilement déplacés par les événements météo-marins, en se propageant vers le large ou en étant transportés par les courants littoraux.

Enfin, sur les tronçons tracés à proximité des ouvrages, on a observé un adoucissement du profil submergé sur le rivage, ce qui témoigne de l'efficacité des épis qui emprisonnent les sédiments près du littoral.

Dans la zone au nord de l'embouchure, on observe une tendance à l'érosion, *post operam*, assez prononcée et correspondant à $-434\,580,12\text{ m}^3$, un volume qui, en termes absolus, est beaucoup plus élevé que les volumes déposés dans la zone sud. Toujours au nord, mais davantage à proximité de Bocca d'Ombrone, on observe un important inversement de tendance, en partie dû à l'apport sédimentaire par le fleuve, pour un volume de $467\,756,80\text{ m}^3$, qui a pour effet d'annuler l'érosion du tronçon plus au nord. En effet, le volume total de dépôts s'élève à $33\,176,68$ mètres cubes.

Malgré le volume de dépôts sur l'ensemble du tronçon nord du cours d'eau considéré, la ligne de rivage a en moyenne reculé de $-4,26\text{ m}$, confirmant un problème potentiel à la suite de la réalisation de l'intervention, qui pourrait avoir modifié l'interaction entre la houle et les dynamiques littorales.

Dans le cadre des activités de surveillance, en concomitance avec les mesures bathymétriques et topographiques (2013-2015), il a également été procédé à la classification granulométrique des sédiments, laquelle a permis d'obtenir des informations utiles pour la caractérisation des dynamiques des sédiments, en particulier ceux provenant du transport solide fluvial (limon-fraction limon-argile).

Au total, vingt-six points d'échantillonnage ont été choisis, dont treize au sol (le long du littoral) et treize en mer, à environ 150 m de la ligne de rivage.

À partir des données mesurées ponctuellement, nous avons obtenu, au moyen de techniques d'interpolation spatiale, des cartes représentatives du mouvement des sédiments d'origine fluviale permettant de comprendre l'évolution dans le temps des pourcentages de sédiments fins présents dans la zone en question.

L'analyse sédimentologique des quatre campagnes d'échantillonnage effectuées montre une concentration considérable de sédiments fins au niveau de l'embouchure du fleuve Ombrone, alors que dans les autres points d'échantillonnage, au nord et au sud, la granulométrie des sédiments est de nature purement sableuse, avec des pourcentages de sable supérieurs à 90 %. L'analyse granulométrique des échantillons prélevés à proximité de l'embouchure du fleuve Ombrone confirme que l'apport sédimentaire d'origine fluviale pour le rechargement du littoral est caractérisé par de fortes fluctuations, passant de valeurs minimales dans des périodes caractérisées par de rares crues, même ordinaires, à de fortes augmentations à la suite de crues répétées et/ou particulièrement intenses.

Sur les échantillons prélevés au fond de la mer dans les zones situées au nord de Bocca d'Ombrone et à Principina a Mare lors de la mesure de l'été 2015, on a observé une augmentation significative du pourcentage de limon présent, de l'ordre de 30 à 40 % par rapport à des valeurs nulles ou qui en soit inférieures à 4 %, enregistrées lors de précédentes mesures.

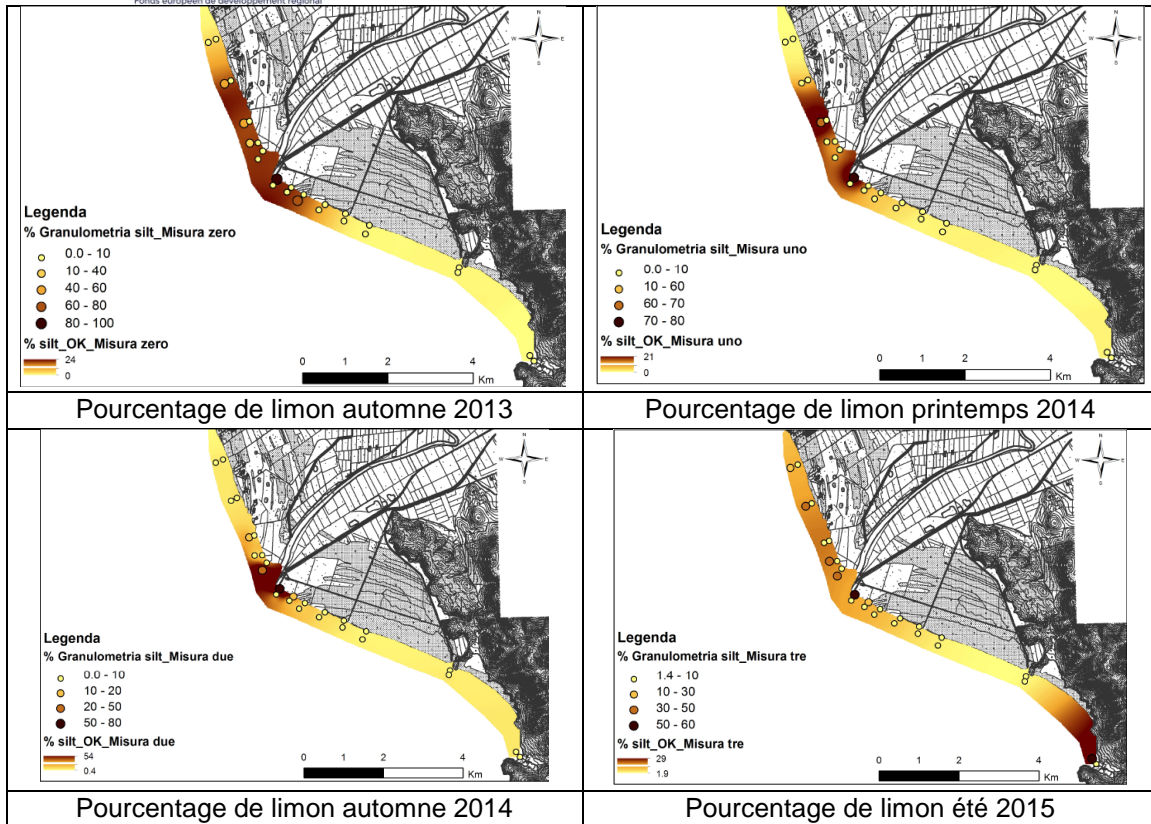


Figure 7. Répartition de la fraction fine.

Le projet Maregot prévoit de confier un service de mesures topo-bathymétriques, sédimentologiques, de la végétation et des habitats sur le trait de côte du site pilote afin d'évaluer les dynamiques côtières en cours, décrire les morphologies présentes, l'état de la végétation et des habitats et définir l'état d'évolution dans les segments côtiers afférents du système « plage/dune/zones humides d'arrière-plage ». Les résultats des mesures Maregot seront comparés à ceux réalisés après le rééquilibrage du littoral de Marina di Alberese et permettront donc de poursuivre la surveillance de la bande côtière du parc de la Maremma.

État des connaissances

Risque côtier

Évolution de la ligne de rivage

Selon les études liées au Projet de Plan régional de gestion intégrée du littoral pour le réaménagement hydrogéologique (Ciprani *et al.*, 2004), la zone d'intérêt se situe dans les secteurs de 33 à 36 : Le tronçon est fortement influencé par la dynamique de l'embouchure du fleuve Ombrone, avec des caractéristiques de régression qui concernent en premier lieu le delta du cours d'eau, puis s'étendent progressivement aux zones limitrophes.



Figure 8. Secteurs du littoral sud de la Toscane.

Le littoral situé au sud du port de Marina di Grosseto (*secteur 33*) présente un système dunaire hautement développé. La tendance érosive de la ligne de rivage observée jusqu'à la fin des années 1990 a été contrastée par l'effet sur le transport des sédiments le long du littoral en raison de la construction du port sur le canal émissaire S. Rocco. Une dune naissante témoigne de l'état sédimentaire du littoral, quoique située près de l'extrémité sud du secteur (Chiaro del Porciatti), les signes d'attaque du mouvement de la houle sont bien visibles.

Le *secteur 34*, qui comprend l'apex du delta de Bocca d'Ombrone, est soumis à une très forte érosion qui, depuis la fin du XIXe siècle jusqu'à aujourd'hui, a entraîné un recul de près d'un kilomètre de la ligne de rive, avec un taux d'érosion d'environ 4 m/an entre 1985 et 1998.

Le lobe nord se caractérise par l'alternance de bas cordons dunaires et d'étangs interdunaires dans lesquels l'eau de mer pénètre pendant lors d'ondes de tempêtes. L'érosion est destinée à se poursuivre, voire à s'accélérer, également à la suite des interventions mises en œuvre dans la partie sud.

En effet, cette zone comprend un récif adhérent d'environ 1350 m, auquel a été récemment ajouté une digue reculée de 150 m, 6 cloisons submergées et la digue fluviale a été renforcée sur la gauche pour servir d'épi d'embouchure.

Si l'on s'éloigne de l'embouchure, on observe que le phénomène érosif devient progressivement moins intense et dans le *secteur 35*, qui va de Marina di Alberese à Torre di Collungo, on a constaté entre 1984 et 1998, une perte moyenne de la plage inférieure à 10 mètres. Toutefois, la situation montre toute sa gravité si l'on pense qu'entre 1979 et 1984, seule une petite partie de ce secteur était concernée par l'érosion, un secteur qui avançait encore.

Pour le *secteur 36*, qui va de Torre di Collungo à Cala Rossa, on observe plutôt une tendance d'avancée du trait de côte, du fait du dépôt de sédiments érodés dans la partie la plus proéminente du delta qui sont transportés latéralement par les courants côtiers. Si cette tendance positive a atteint entre 1979 et 1984 les 5,5 m/an, au cours de la dernière période d'observation, entre 1984 et 1998, le taux d'avancement du trait de côte s'est réduit à environ 1,6 m/an à cause du fait que l'érosion progressive de la pointe en flèche du delta à Bocca d'Ombrone entraîne la rectification de la ligne de rivage et donne donc lieu à une efficacité moindre de l'attaque de la houle, diminuant ainsi le transport littoral vers Cala Rossa.

Inondation côtière

L'important recul du trait de côte induit de nombreux phénomènes qui menacent les équilibres du système biologique de cette zone insérée dans le parc régional de la Maremma et qui constitue l'un des environnements les plus naturels du littoral toscan. En particulier, lors d'ondes de tempêtes, l'eau de mer envahit le territoire en dépression qui se trouve à l'arrière et qui n'est plus protégé par la dune naturelle et la digue artificielle côtière en pierre (qui avait été construite comme ouvrage de défense), remonte les canaux d'assainissement, conduisant à la disparition progressive des espèces végétales présentes, des pâturages à la pinède grand-ducale de l'Uccellina.

Plans de prévention

Le document opérationnel pour la récupération et le rééquilibrage de la bande côtière prévoit l'intervention 2016-DC-14 « Difesa dall'erosione del cordone dunale e delle aree umide retrostanti il tratto a nord della foce del F. Ombrone » (Défense contre l'érosion du cordon dunaire et des zones humides à l'arrière du tronçon au nord de l'embouchure du canal du fleuve Ombrone). Il s'agit d'élaborer une étude de faisabilité ainsi qu'un projet préliminaire pour lesquels les résultats des relevés et surveillances prévus par le projet Maregot joueront un rôle important.

Activités, actifs

Suivi environnemental pour vérifier l'évolution de la bande côtière sur le plan topographique, granulométrique et sédimentologique, ainsi que l'évolution écologique des principales biocénoses marines et terrestres en réponse aux interventions prioritaires de récupération et rééquilibrage du littoral près de l'embouchure du fleuve Ombrone.

Conclusions

Résumé du problème du site

Entre l'embouchure du Bruna et le canal émissaire San Rocco, tout le littoral a fait l'objet d'une accumulation entre 1984 et 2005, avec des valeurs qui, à certains endroits, effleurent voire dépassent les 20 m. Cela est dû à l'afflux de sédiments résultant de l'érosion intense à laquelle est soumise l'apex du delta de l'Ombrone. La construction du port de Marina di Grosseto a conduit à une interruption de ce flux, lequel devrait toutefois être garanti par le reflux des sédiments par l'exploitant de la Marine.

Le processus de dépôt concerne les plages sur plus d'un kilomètre au sud de Principina a Mare, point de départ de ce processus érosif qui, depuis plus d'un siècle, re façonne le delta de l'Ombrone. Malgré le recul de plus d'un kilomètre de l'apex du delta, le taux d'érosion reste proche des 10 m/an ; entre 1984 et 2005, cette zone a perdu entre 150 et 200 mètres de plage.

Une partie de ces sédiments alimente également l'extrémité sud de l'unité physiographique, ce qui explique l'avancée de la bande côtière entre Collalungo et Cala Rossa.

Après la récente intervention de rééquilibrage du littoral de Marina di Alberese, le problème majeur concerne l'aile nord du delta de l'Ombrone. C'est sur cette zone côtière particulièrement sensible que seront effectuées les mesures du projet Maregot, dont les résultats contribueront grandement à l'étude de faisabilité du futur projet de récupération et rééquilibrage de ce tronçon côtier.

Représentativité transfrontalière du site

Les Régions partenaires présentent de nombreuses étendues côtières hautement naturelles et soumises à des processus d'érosion pour lesquels elles devront mettre en place des stratégies de gestion pouvant tirer parti de l'expérience qui sera réalisée sur cette zone pilote, tant en termes de méthodes de suivi que de traitement et d'interprétation de données à des fins de gestion.

Bibliografia

Aiello E., Bartolini C., Caputo C., D'Alessandro L., Fanucci F., Fierro G., Gnaccolini M., La Monica

G.B., Lupia Palmieri E., Piccazzo M. e Pranzini E. (1976) - Il trasporto litoraneo lungo la costa toscana fra la foce del Fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina. *Boll. Soc. Geol. It.*, 94: 1519-1571.

Aminti P., Pranzini E. (1990) - Variations in longshore sediment transport rates as a consequence of beach erosion in a cusped delta. *Littoral* 1990, p.130-134. EUROCOAST. Marseille, July 1990.

Bartolini C., Caputo C., Cavazza S., Ceffa L., Celestre P., Cortemiglia G.C., Fanucci F., Fierro G., Gandolfi G., Gnaccolini M., Imperiale G., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Marone V., Mordenti A., Montano F., Nardi M., Paganelli L., Paoletti A., Piacentino G.B., Piccazzo M., Pranzini E. e Versino L. (1976) - Area campione Alto Tirreno. Ricerche sul regime e la conservazione dei litorali. Rapporto 1974. *La Ricerca scientifica*, 92: 61-126.

Bartolini C., Pranzini E. (1982) - Late Pleistocene and Holocene sedimentary patterns on the Tuscan shelf. XI International Congress on Sedimentology, I.A.S., Hamilton, Ontario (abstract).

Bartolini C., Pranzini E. (1984) - Fan delta erosion in southern Tuscany as evaluated from hydrographic surveys of 1883 and the late '70. *Marine Geol.*, 62, p.181-187.

Carli S., Cipriani L.E., Bresci D., Danese C., Iannotta P., Pranzini E., Rossi R. Wetzel L. (2004) - Tecniche di monitoraggio dell'evoluzione delle spiagge. In (Eds. Cipriani L.E. e Regoli C.) *Il Piano Regionale di gestione integrata della costa ai fini del riassetto idrogeologico. Erosione costiera*. Edifir, Firenze, p.125-165.

Chiocci F.L., Cipriani L.E., Falese F., La Monica G.B. (2009) - Search and characterization of relict sand deposits on the Tuscany continental shelf for the artificial nourishment of eroding beaches. In (Eds. Pascucci V. and Andreucci S.) *Abstract book, 27th IAS Meeting of Sedimentology*, Alghero, September 20-23, 2009, p. 106, Sassari, Italy.

Cipriani L.E., Ferri S., Iannotta P., Mannori S. e Pranzini E., 2004. Evoluzione recente delle spiagge toscane. In: L.E. Cipriani e C. Regoli (Editori), *Il Piano Regionale di gestione integrata della costa ai fini del riassetto idrogeologico – Erosione Costiera*. Regione Toscana – Edifir, pp. 75-92.

Cipriani L.E. e Pranzini E., 1999. Evoluzione recente delle spiagge toscane. In: *Rapporto sullo Stato dell'ambiente della Regione Toscana - 1998*, Regione Toscana, pp. 77-85.

Cipriani L.E., Pranzini E., Vitale G. and Wetzel L., 2013. Adaptation to beach erosion at Maremma Regional Park (Tuscany, Italy). *GeoEcoMarina* 19/2013.

Cipriani L.E., Pranzini E. and Vitale G. (2013) - Coastal erosion in Tuscany: short vs. medium term evolution. In: L.E. Cipriani (Editor), *Coastal erosion monitoring. A network of regional observatories – Results from RESMAR Project*. Nuova Grafica Fiorentina, p. 135-155

Consorzio di Bonifica Toscana Sud (2015) – Monitoraggio degli effetti dei lavori contro l'erosione costiera nel Parco Regionale della Maremma. Report finale – Programma di interventi prioritari di recupero e riequilibrio del litorale. D.C.R. n.47 del 11.03.2003 Progetto n.20 "Foce Fiume Ombrone".

De Filippi G.L., Duchini E., Pranzini E. (2008) - Closure Depth estimation along the Tuscan coast aimed at short and long term coastal monitoring. In (Eds. Pranzini E. e Wetzel L.) *Beach Erosion Monitoring*, BeachMed-e/OpTIMAL Project, Nuova Grafica Fiorentina, Firenze, p. 33-50.

Gandolfi G., Paganelli L. (1979) - Le province petrografiche del litorale toscano – *Bollettino Società Geologica Italiana*, n. 96, 653-663.

Innocenti L., Pranzini E. (1993) - Geomorphological evolution and sedimentology of the Ombrone River delta (Italy). *Journ. Coastal Research*, 9, p.481-493.

Milano V., Ceciarini A., Falini A., Migliorini P. (1986) - Studio sui processi evolutivi in atto lungo il litorale Grossetano tra T.re Rocchette e Cala di Forno. Unpublished report, Comune di Grosseto, 205 p.

Paris E. et al (2014). Accordo di collaborazione scientifica tra Regione Toscana e Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze. Attività di ricerca per la mitigazione del rischio idraulico nella regione Toscana, Attività D - Misure e rilievi nei corsi d'acqua. Relazione Tecnica. FIRENZE.

Paris E.; Minatti L.; Solari L.; De Cicco P.; Bosci L.; Mengoni B.; Morandi S. (2013). Accordo di collaborazione scientifica tra Regione Toscana e Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze. Attività di ricerca per la mitigazione del rischio idraulico nella regione Toscana, Attività C - Modellazione Idraulica a fondo mobile. Parte 1: Fiume Ombrone Grossetano, il quadro conoscitivo. Relazione Tecnica.; Attività C2 - Modellazione idraulica a fondo mobile applicata al Fiume Ombrone Grossetano. FIRENZE.

Paris E.; Billi P. (2002). Progetto dell'impianto di monitoraggio delle portate liquide e solide nel bacino del Fiume Ombrone Grossetano. Elaborazione dati e analisi della dinamica d'alveo. REGIONE TOSCANA - UFFICIO GENIO CIVILE DI GROSSETO.

Pranzini E. (1989) - A model for cusped delta erosion. 6th Symp. on Coastal and Ocean Management/ASCE, Charleston, SC. Coastal Zone '89, p.4345-4357.

Pranzini E. (1994) - The erosion of the Ombrone River delta. EUROCOAST, Lisbon, September 1994, p.133-147.

TEA Ambiente S.R.L. (2006). Studio su modello numerico di supporto alla progettazione di interventi di difesa costiera fra Cala di Forno ed il limite Nord del Parco Regionale della Maremma. In: Progetto Preliminare del Programma di interventi prioritari di recupero e riequilibrio del litorale – D.C.R. n.47 del 11.03.2003 Progetto n.20 "Foce Fiume Ombrone", Ente Parco Regionale della Maremma.

Site de Calvi (Haute-Corse, France)

Présentation du site

Localisation

La plage de Calvi est située en Haute-Corse dans la micro-région de Balagne (Illustration 8). C'est une grande baie sableuse s'étendant sur environ 3 km de long, limitée à l'ouest par les enrochements du port et à l'est par l'embouchure de la rivière La Figarella.



Illustration 8 - Vue aérienne et localisation de la plage de Calvi (Source : IGN BD-ortho 2007)

Cette plage est sujette à un phénomène d'érosion côtière chronique qui a, par le passé, engendré des dégâts plus ou moins importants sur les enjeux présents le long de la plage, restaurants, dune et voie ferrée. Pour contrer le recul du trait de côte, Des aménagements, trois épis et trois brise-lames, qui ont favorisé la formation de tombolos, ont été construits en 2001 sur la plage dans le but de réduire le phénomène d'érosion (Illustration 8).

Description géographique

C'est une longue (3000 m de linéaire côtier) plage de sables fins coquilliers située au niveau d'une grande zone dépressionnaire liée à la présence de la Figarella, cours d'eau principal où des alluvions quaternaires sont déposées. La fiche descriptive sur l'illustration 9 rassemble les principales caractéristiques morphologiques particulières de cette plage, avec une zone de plage sous-marine en pente douce (inférieure à 1%) avec des morphologies de barres sableuses très aplaties, une plage aérienne relativement étroite (entre 5 et 30 m) avec une zone dunaire peu développée (1 à 2 m de haut) et une dune végétalisée sur laquelle se développe une pinède importante.

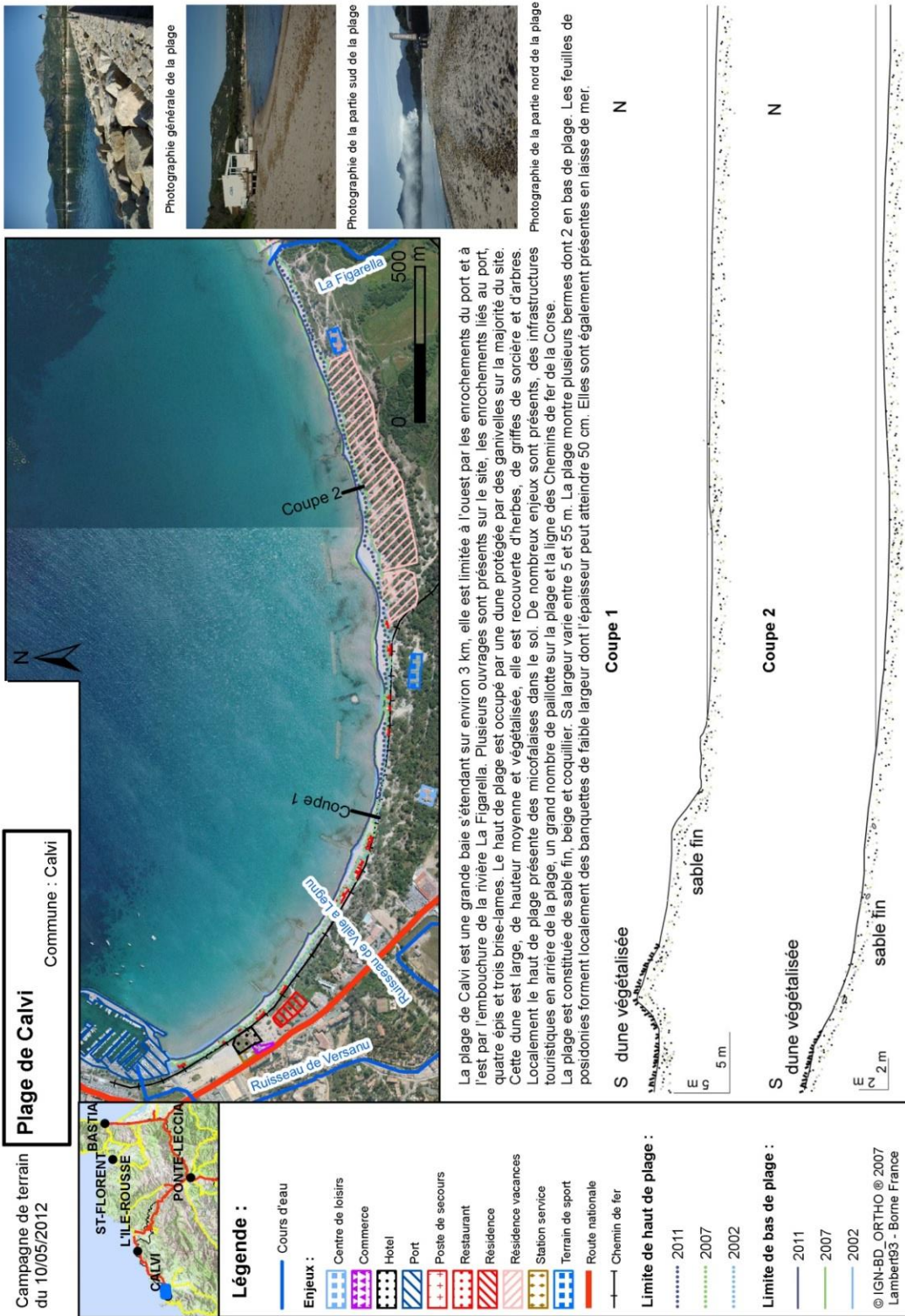


Illustration 9 - Fiche descriptive de la plage de Calvi (Belon et al.,2014).

Caractéristiques physiographiques/écosystémiques

La plage de Calvi n'est pas incluse dans un périmètre NATURA 2000, ni une Zone de Protection d'espèce particulière (ZNIEFF, ZICO, ZPS). En revanche, elle est bordée d'un herbier de *Posidonia oceanica* bien développé qui est un habitat d'intérêt patrimonial et une espèce protégée. Le milieu dunaire avec la pinède qui s'y développe est également un écosystème remarquable.

Connaissances disponibles

La plage de Calvi a été étudiée à de nombreuses reprises pour des objectifs différents. Les principales connaissances acquises dans le domaine des risques côtiers et de la gestion du trait de côte sont rassemblées dans le tableau ci-dessous (Illustration 1). Ce sont ces données qui sont exploitées dans la suite du rapport pour qualifier le site MAREGOT de Calvi.

Thème	Données	Nature des données	Période	Source	Bibliographie
Evolution du trait de côte	Traits de côte	Photographies aériennes	1951-2011	BRGM	Belon <i>et al.</i> (2014)
		Levés DGPS	2009-2016	ROL	Belon <i>et al.</i> (2016)
Evolution des plages	Topographie	Profils topographiques Lidar topographique	2001-2013	ROL	Stépanian <i>et al.</i> (2015)
			2013	IGN	Belon <i>et al.</i> (2016)
Evolution bathymétrique	Bathymétrie	Profils bathymétriques	2001-2013	ROL	Stépanian <i>et al.</i> (2015)
Submersion marine	Couches SIG des hauteurs d'eau potentielle	Données SIG Raster	2016	BRGM	Belon <i>et al.</i> (2016)
Enjeux	Couche SIG des enjeux linéaires et zonaux	Données SIG Vecteurs	2013	BRGM	Belon <i>et al.</i> (2013)

Tableau 2 - Connaissances disponibles sur le site de Calvi (Haute-Corse). Les références bibliographiques complètes sont renvoyées en fin de rapport.

Etat des connaissances

Aléas côtiers

Evolution du trait de côte

A l'échelle de temps historique (1937-2011), l'évolution historique du trait de côte a été étudiée à partir de photographies aériennes pour différentes dates (Belon *et al.*, 2014). Les lignes de rivages pour chaque année ont été digitalisées et sont comparées entre elles par une analyse diachronique quantitative (Illustration 10). Le recul est considéré comme fort si les vitesses sont supérieures à 0.5 m/an, et modéré pour des vitesses comprises entre 0.1 et 0.5 m/an. La plage est considérée stable pour des vitesses d'avancée ou de recul de l'ordre de 0.1 m/an. L'avancée est modérée pour des vitesses comprises entre 0.1 et 0.5 m/an, et forte si les vitesses sont supérieures à 0.5 m/an. Cette analyse montre que bien qu'à cette échelle de temps, le trait de côte est relativement stable à l'échelle de la baie, une tendance à l'érosion chronique, associée à un recul du trait de côte, se manifeste de manière plus claire et plus intense à partir de 1996. Cette situation a incité l'OEC et le BRGM à intégrer le site de Calvi dans le Réseau d'Observation du Littoral de Corse (ROL) depuis 2001 (Palvadeau et Nay, 2002).

Pour ce qui concerne l'évolution récente (2000-2016), un suivi morphologique annuel a donc été initié à l'automne 2001 avec une première acquisition de deux profils de plage (Illustration) à la suite de travaux de ré-ensablement et de construction d'équipements de protection au cours de l'année 2001 (épis et brise-lames). Le profil Ouest a été implanté à mi-chemin entre le deuxième épi et le premier brise-lame, dans un secteur assez fortement aménagé, où la mer, avant le ré-ensablement, menaçait les aménagements et la plate-forme de la voie ferrée ; et le second profil est situé à l'extrémité est du secteur, entre le dernier brise-lame et le dernier épi. Un suivi de la position du trait de côte par DGPS a été par la suite engagé depuis 2009 sur ce site au vu des évolutions préoccupantes constatées depuis le début des mesures systématiques. L'évolution de la position du trait de côte (ici défini comme la berme de bas de plage) est représentée sur l'illustration .

Depuis les travaux de ré-ensablement de la plage de Calvi menés avant le levé d'octobre 2001, on note un comportement opposé entre les deux extrémités de la baie, avec une partie ouest plutôt stable, avec une faible évolution résiduelle du trait de côte au niveau du profil. Cependant, cette stabilité peut être pour partie qualifiée d'artificielle, car liée à la présence d'aménagements « durs » (épis, brise-lames) et elle dépend aussi de la faible mobilité des barres d'avant-côte qui présentent un stock sédimentaire très limité. A l'inverse sur profil Est, le recul est plus chronique, et tend à s'aggraver depuis 2011.

Sur l'avant-côte, la période 2002-2006 était caractérisée par une dynamique liée aux barres sous-marines. Ainsi, dans le secteur ouest où l'évolution naturelle rendait possible la mobilité des barres, la plage était très stable. En revanche, la dynamique naturelle de la plage à l'Ouest était limitée par les aménagements, et un recul faible mais continu était observé. Les levés depuis 2009 montrent une situation inverse avec un secteur Est en érosion importante, en particulier au niveau du front dunaire sur le profil est, et une situation du profil Ouest qui devient de plus en plus favorable par rapport à 2006. Dans le secteur est, les barres d'avant-côte sont fragilisées depuis 2006, et ne protègent plus le trait de côte de l'érosion qui est ici significative depuis plusieurs années.

La pente dunaire est forte, signe d'une vulnérabilité croissante, masquée certaines années (2010) par des dépôts massifs de *Posidonia oceanica*. En 2013, les profils montrent plutôt une tendance à la reconstruction de la plage émergée mais ce constat est à relativiser compte-tenu du recul généralisé de la position du trait de côte.

Les derniers levés réalisés en 2015 confirment une érosion marquée à l'Est ainsi qu'au niveau des brise-lames avec des encoches d'érosion dans le cordon dunaire qui ont même donné lieu à des travaux d'urgence pour protéger la voie de chemin de fer. Ce constat justifie les réflexions en cours qui sont nécessaires pour gérer ce phénomène d'érosion sur l'ensemble de la baie à plus long terme.

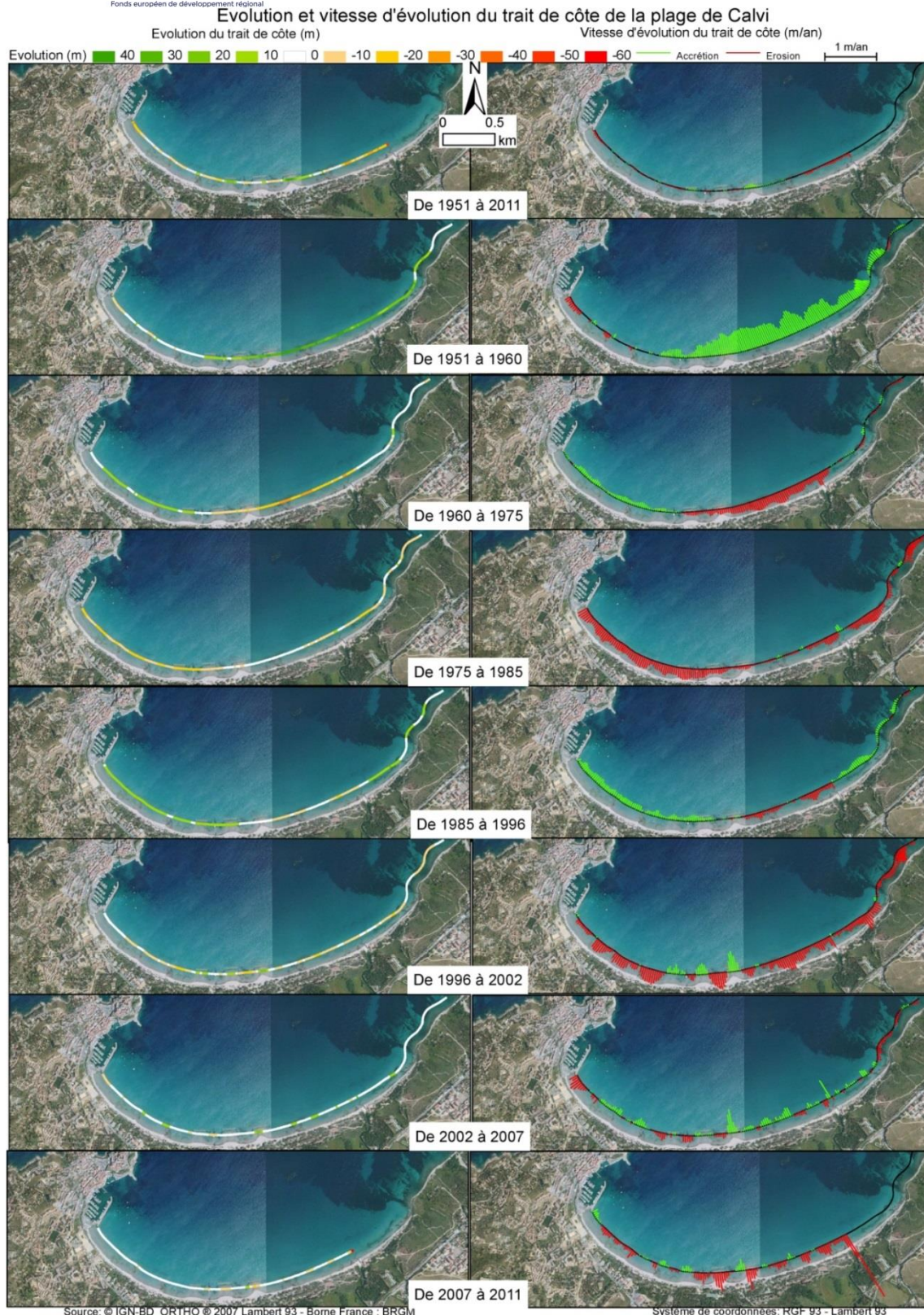


Illustration 10 – Evolution 1951 - 2011 du trait de côte de la plage de Calvi

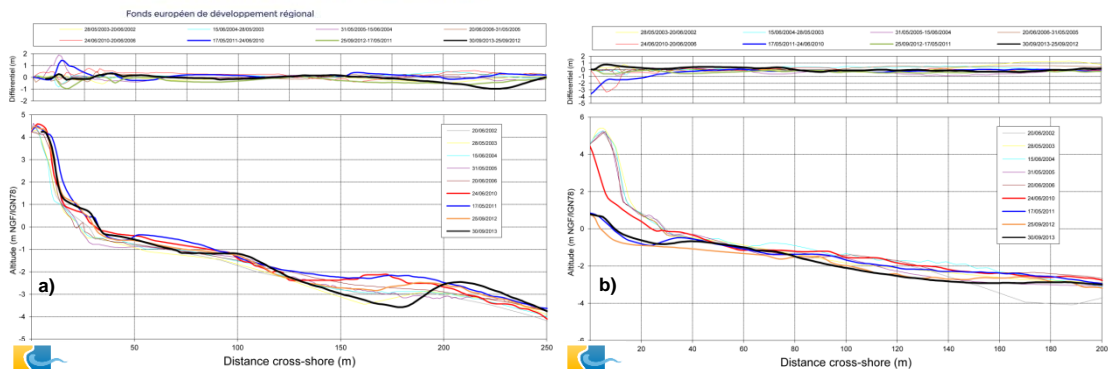


Illustration 4 - Profils de plage aérienne Ouest (a) et Est (b) – Calvi (c) ROL (c) période 2002-2013 (Stéphanian *et al.*, 2015).

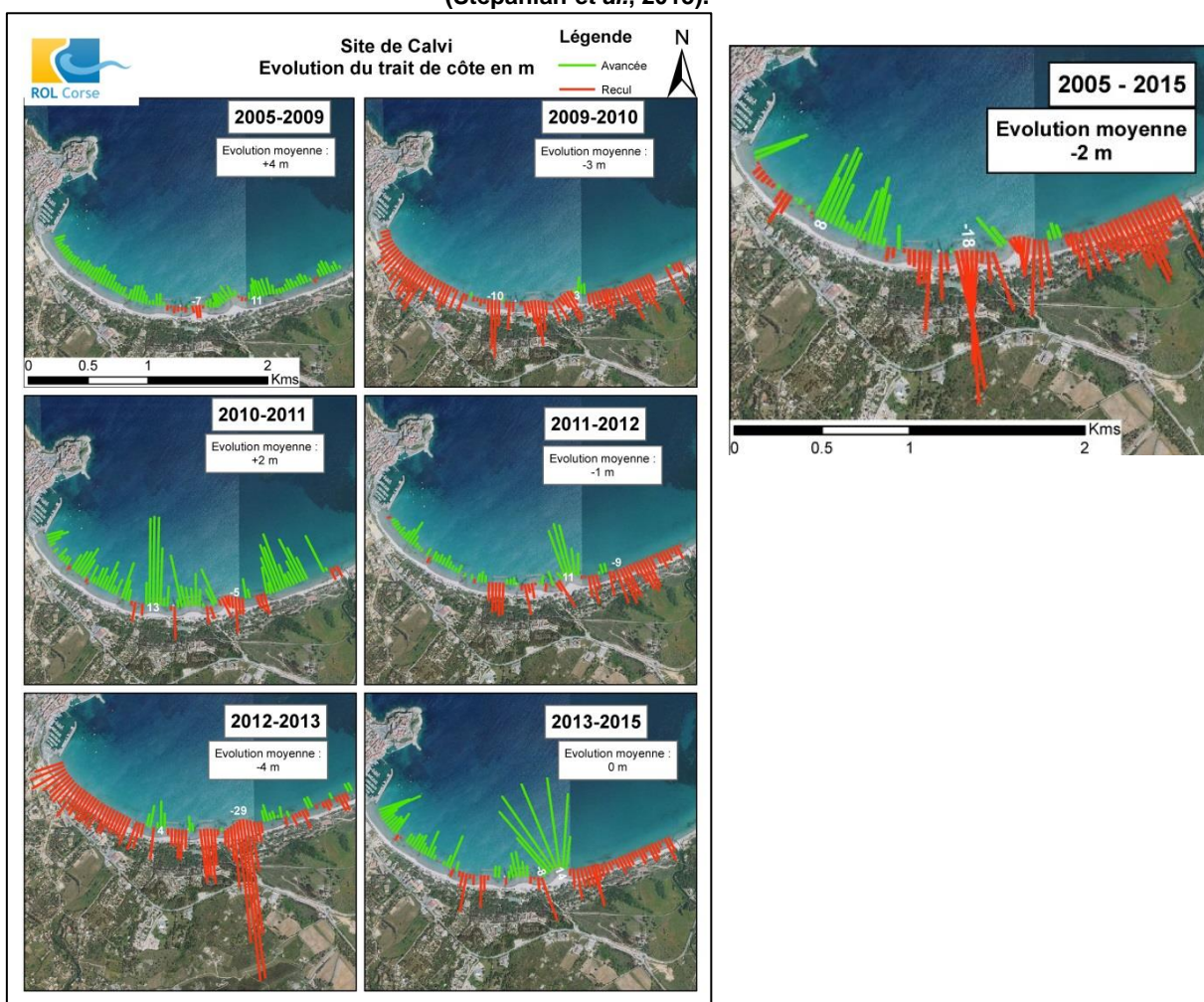


Illustration 5 - Site Calvi, Evolution pluriannuelle du trait de côte entre 2005 et 2015 (© IGN BD-ORTHO 2007 ; in Belon *et al.*, 2015).

Submersion marine

La plage de Calvi a fait l'objet d'une estimation de la vulnérabilité du littoral face au phénomène de submersion marine (Belon *et al.*, 2016). Cette approche était basée sur :

- l'estimation d'une période de retour des vagues de tempête centennale, à l'aide banque de données de houle disponibles sur le pourtour de la Corse (Base ANEMOC, CEREMA/EDF);
- du calcul des niveaux marins atteints via la formulation de Stockdon *et al.* (2006);

- de la comparaison de ces niveaux avec les données de Lidar topographique acquises par l'IGN en 2013 sur l'ensemble du littoral de Corse.

L'illustration 11 montre ainsi un extrait de la superficie des zones soumises à un phénomène de submersion marine d'occurrence centennale.

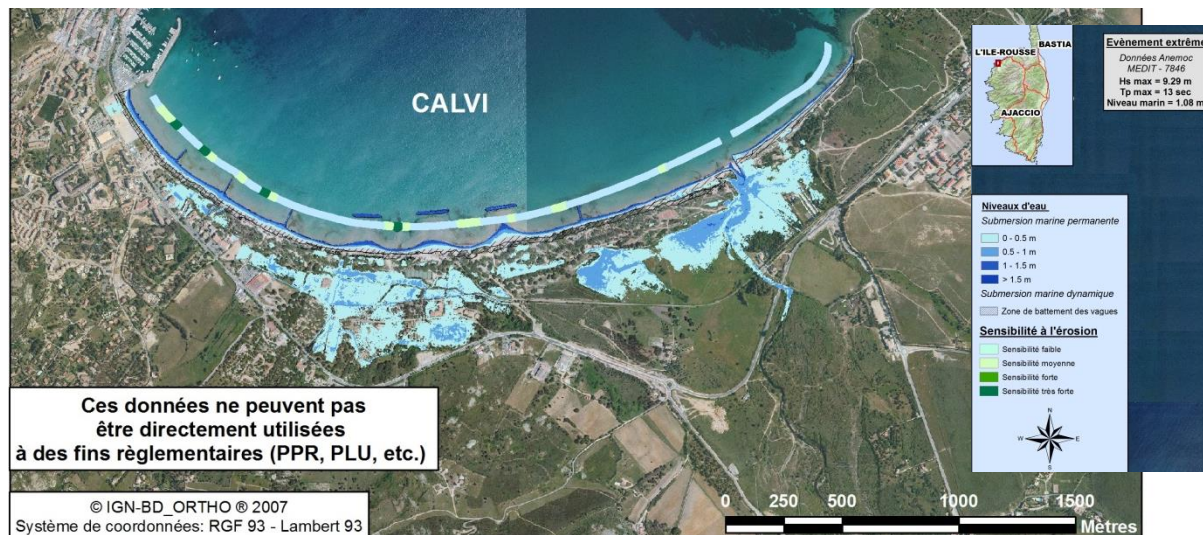


Illustration 11 - Cartographie de la submersion marine permanente et de la sensibilité à l'érosion du littoral de Calvi (Belon *et al.*, 2016).

Il apparaît que l'ensemble de la plage est soumis à une potentielle inondation par submersion marine. Le cordon dunaire protège également les zones basses en arrière, qui sont des cuvettes déconnectées de la mer. En cas de destruction du cordon dunaire, ces zones seraient alors exposées à une submersion. L'embouchure de la Figarella à l'Est est également une zone exposée en raison de sa connexion naturelle avec la mer. Ce secteur est par ailleurs également exposé à une inondation fluviale par le cours d'eau (non décrite ici).

Plans de prévention

Malgré le caractère chronique de l'érosion côtière et une exposition importante des enjeux à une potentielle submersion marine en tempête, la plage de Calvi ne fait pas l'objet d'une réglementation particulière de l'Etat en termes de prévention des risques littoraux. En particulier, il n'y a pas de Plan de Prévention des Risques Littoraux (érosion et/ou submersion marine) prescrits sur ce territoire. Cependant, comme sur tout le littoral français, un Porter à Connaissance des risques de submersion marine auprès des collectivités a été réalisé par les Services de l'Etat (DREAL Corse) dans le cadre de la mise en application de la Directive Européenne Inondation (Atlas des Zones Submersibles). Par ailleurs, cette plage fait partie du programme de surveillance du Réseau d'Observation du Littoral depuis 2002 par un monitoring de la topo-bathymétrie des plages et de la position du trait de côte.

Enjeux présents

La baie peut être découpée en deux secteurs, un à l'Est qui reste naturel et un à l'Ouest qui est aménagé avec la présence d'enjeux le long du littoral, dont une voie de chemin de fer situé en haut du cordon dunaire sur la moitié ouest de la plage et de nombreux restaurants de plage (Illustration 12). Une cartographie précise des enjeux a été réalisée sur ce site par Belon *et al.* (2013). Elle est représentée sur l'illustration 9. Sont ainsi distingués, les enjeux linéaires (routes, chemin de Fer..) et les enjeux fonciers et immobiliers, en fonction de leur utilisation socio-économique. Cet travail a fait l'objet de la création d'une couche d'information géoréférencée spécifique.

De nombreux enjeux sont ainsi présents sur le site : des infrastructures touristiques en arrière de la plage, un grand nombre de restaurants de plage (paillotes) sur la plage et la ligne des Chemins de fer de la Corse. La voie de chemin de fer, située en haut de dune, est de plus en plus menacée par ce phénomène d'érosion côtière (Illustration 12). Des travaux de protection ont dû être réalisés de manière à protéger en urgence cet axe de circulation majeure pour la Balagne (Bastia-Calvi).

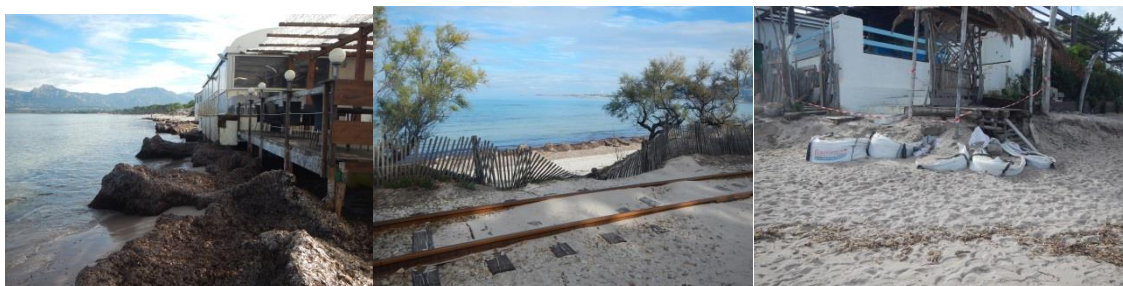


Illustration 12 – Exemples d'enjeux vulnérables à l'érosion côtière sur la plage de Calvi

Conclusion

Rappel de la problématique du site

La plage de Calvi est une grande baie sableuse avec de nombreux enjeux (infrastructures touristiques, paillote sur la plage, ligne des Chemins de fer de la Corse). Cette plage est sujette historiquement à un phénomène d'érosion côtière chronique avec des conséquences importantes sur l'activité socio-économique, ce qui a justifié la construction de trois épis et trois brise-lames en 2001 pour tenter de limiter ces impacts. Ce site fait donc l'objet d'une réflexion stratégique globale au sujet de l'érosion côtière qui intègre à la fois l'occupation de la plage par les restaurants de plage, de la sécurisation de la voie ferrée, et qui présente par ailleurs des enjeux touristiques, économiques et environnementaux importants. Le site présente également l'intérêt d'un groupement d'acteurs (Commune de Calvi, Conseil Départemental de Haute-Corse, OEC, CTC, BRGM) motivés par la mise en place d'une stratégie pouvant bénéficier d'un retour d'expérience plus large et s'appuyer sur le réseau d'experts de MAREGOT.

Représentativité transfrontalière du site

Le site de Calvi, par l'exposition des enjeux touristiques et environnementaux, par l'historique de l'aléa et des initiatives de protection, et par la volonté partagée des acteurs concernés d'initier une stratégie de gestion, constitue un site optimal pour la définition de méthodes intégrées pour l'analyse des risques côtiers liés à l'érosion.

Si la dynamique à moyen terme est bien documentée, la compréhension à l'échelle événementielle reste à analyser et permettra d'améliorer les connaissances sur les mécanismes d'érosion rapide et de submersion sur un site très représentatif des plages du littoral de l'espace Maritimo (plage de poche étroite partiellement aménagée).

Bibliographie

Balouin Y., Palvadeau E., et Bodéré, G. (2005b). Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observation 2004. Rapport BRGM/RP-54016-FR, 160 p.

Balouin Y., Palvadeau E., et Bodéré, G. (2006a). Réseau d'observation du littoral de la Corse. Sites sensibles à évolution forte et problématique. Rapport d'avancement, année 2006. Rapport BRGM/RP-54997-FR, 37 p.

Balouin Y., Palvadeau E., et Bodéré, G. (2006b). Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observation 2005. Rapport BRGM/RP-54647-FR, 153 p., 107 ill.

Balouin Y., Palvadeau E., et Bodéré, G. (2007a). Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observations 2006. Rapport BRGM/RP-55617-FR, 143 p., 102 ill.

Balouin Y., Palvadeau E., Bodéré G., et Hennequin V. (2009) – Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observation 2008. Rapport BRGM/RP-57521-FR, 153 p., 111 ill.

Belon, R., Balouin, Y., Merour, A., Riotte, C. et Bodere. G. (2013) – Atlas Littoral de la Haute-Corse de Bastia à Galeria. Rapport final. BRGM/RP-62214-FR, 124 p., 20 ill., 81 pl.

Belon R., Balouin Y., Bodéré G, (2016) – Atlas Littoral de la Haute-Corse de Bastia à Galéria – Phase finale. Rapport BRGM/RP-64052-FR ; 90 p., 50 ill., 2 annexes.

Durand N., Palvadeau E., et Nay K.M. (2003). Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observation 2002. Rapport BRGM/RP-52348-FR, 156 p.

Durand N., Palvadeau E., et Nay K.M. (2004). Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observation 2003. Rapport BRGM/RP-53361-FR, 179 p.

Oliveros C., et Delpont G. (1998). Littoral occidental Corse – Evolution du trait de côte p., de 1951 à 1996 Agriates au Golfe de Ventilègne. Rapport BRGM/RR-39480-FR. Orléans : BRGM, 107 p.

Palvadeau E., et Nay K.M. (2000). Réseau d'observation du littoral de la Corse. Choix et implantation des sites. Rapport BRGM/RR-40965-FR. Orléans : BRGM.

Palvadeau E., et Nay K.M. (2002). Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observation 2001. Rapport BRGM/RR-51503-FR. Orléans : BRGM, 89 p.

Stépanian A., Bélon R., Bodéré G., Bacon A., et Campmas L. (2011) – Réseau d'Observation du Littoral de la Corse. Rapport d'observations 2010. Rapport BRGM RP-60265-FR, 204 p., 135 ill.

Stockdon, H.F.; Holman, R.A.; How, P.A.; Sallenger, A. H. Jr. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and run-up. *Coastal Engineering*, 53, pp. 573-588

Site de Moriani (Haute-Corse, France)

Présentation du site

Localisation

La plage de Moriani est située sur la commune de San-Nicolao dans la micro-région de Castagniccia. C'est une plage située sur la Plaine Orientale de Corse, un cordon littoral sableux d'une centaine de kilomètres de long et continu entre Bastia au Nord et Solenzara au Sud. Le site pilote est concentré sur la partie urbanisée du littoral (Illustration).

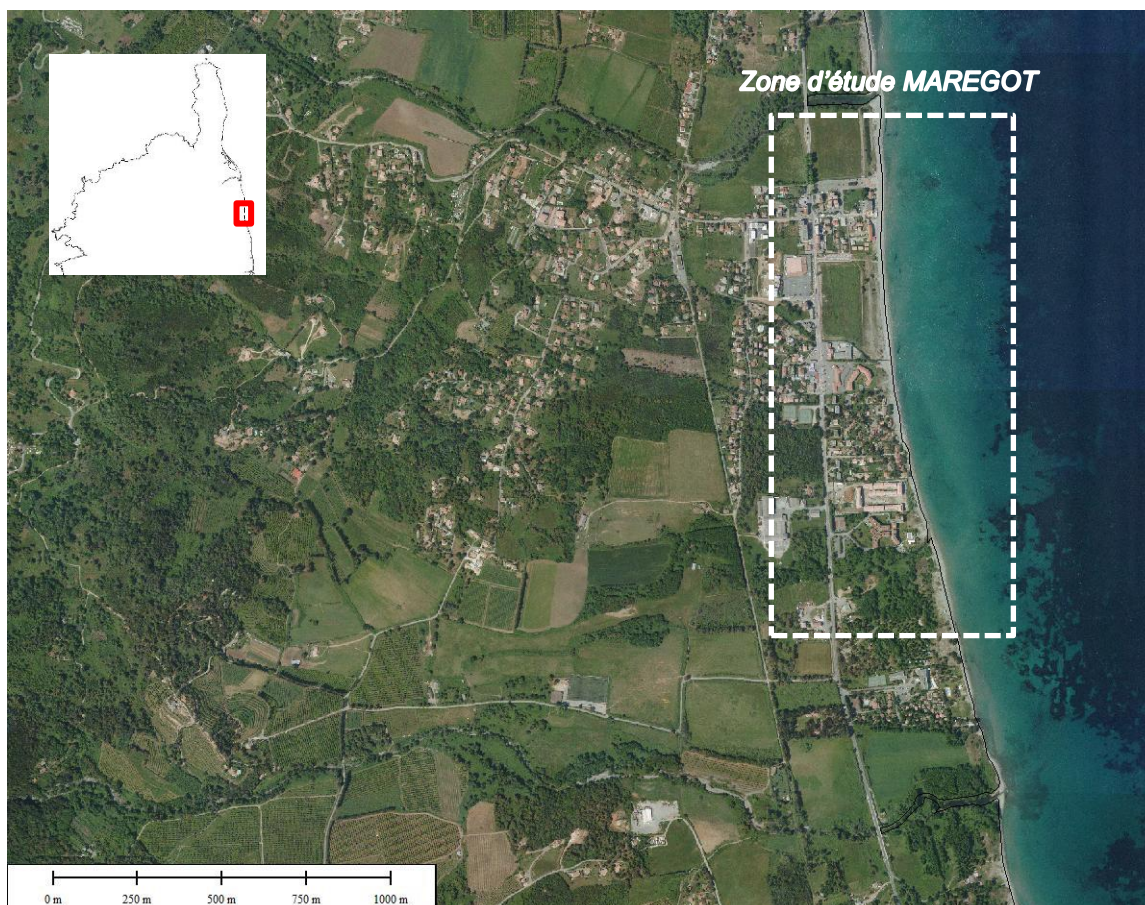


Illustration 1 - Vue aérienne et localisation de la plage de Moriani (Source : IGN BD-ortho 2007)

Ce secteur est concerné par une érosion et un recul du trait de côte, ce qui se traduit par des opérations de rechargement régulier. Ce secteur se situe à environ 4 kilomètres au Nord du Port de Taverna, dont les digues jouent un rôle important sur le blocage de la dérive littorale Sud-Nord, participant ainsi pour partie au déficit local en des apports sédimentaires. Pour contrer le recul du trait de côte, en aval-dérive du port, des épis en géotextile ont été mis en place sur le littoral de Merendella, ce qui ralentit localement les transits sédimentaires susceptibles d'alimenter la plage de Moriani.

Description géographique

La plage de Moriani est caractéristique des plages de la Plaine orientale. Elle est relativement large (20-25 m), en pente douce (1,5%), avec un domaine dunaire résiduel, en raison de l'urbanisation du haut de plage (Illustration 2).



Illustration 2 – Plage de Moriani, en tempête le 12/12/2017 (vue vers le Nord)

Le profil de la plage montre des micro-morphologies (bermes, croissants, barres de swash) au niveau de la ligne de rivage. Lorsque les conditions d'énergie des houles augmentent, la plage est soumise généralement à une érosion par les vagues qui se traduit par la création de micro-falaises, cicatrices des niveaux maximums atteints par le jet-de-rive.

La plage sous-marine présente généralement une à plusieurs barres d'amplitude métrique à pluri-métrique dont la formation résulte de processus complexes qui varient très souvent d'un site à l'autre.

Plus au large, sur le domaine sous-marin, tout le long de la plaine orientale, un herbier de *Posidonia oceanica* s'étend de manière homogène du Nord au Sud à partir de -10 m de profondeur. Enfin en raison de la présence proche du grand herbier de *Posidonia oceanica*, elles reçoivent régulièrement des débris qui s'accumulent en « banquettes » sur la plage émergée.

Caractéristiques physiographiques/écosystémiques

La plage de Moriani n'est pas incluse dans un périmètre NATURA 2000 à terre, ni une Zone de Protection d'espèce particulière (ZNIEFF, ZICO, ZPS). En revanche, elle est bordée d'un herbier de *Posidonia oceanica* d'intérêt communautaire (site NATURA 2000 FR9402014 « Grand herbier de la côte orientale ») au titre de la Directive Habitat.

Connaissances disponibles

Les principales connaissances acquises dans le domaine des risques côtiers et de la gestion du trait de côte au niveau de la plage de Moriani, et plus généralement sur la plaine orientale de Corse, sont rassemblées dans le tableau ci-dessous (Tableau 1).

Thème	Données	Nature des données	Période	Source	Bibliographie
Evolution du trait de côte	Traits de côte	Photographies aériennes	1948-2007	BRGM	Stépanian <i>et al.</i> (2010)
		Levés DGPS	2009-2016	ROL	Belon et Bodere. (2016)
Evolution des plages	Topographie	Profils topographiques	2001-2013	ROL	Belon et Bodere.. (2016)
Evolution bathymétrique	Bathymétrie	Profils bathymétriques	2001-2013	ROL	Belon et Bodere. (2016)
Submersion marine	Couches SIG des hauteurs d'eau potentielle	Données SIG Raster	2012	BRGM	Balouin <i>et al.</i> (2011)
Enjeux	Couche SIG des enjeux linéaires et zonaux	Données SIG Vecteurs	2010	BRGM	Stépanian <i>et al.</i> (2010)

Tableau 1 - Connaissances disponibles sur le site de Moriani (Haute-Corse).

Etat des connaissances

Aléas côtiers

Evolution du trait de côte

A l'échelle de temps historique (1948-2007), l'évolution du trait de côte a été étudiée à partir de photographies aériennes pour différentes dates (Stépanian *et al.*, 2010). Les lignes de rivages pour chaque année disponible ont été digitalisées et comparées entre elles par une analyse diachronique quantitative (Illustration).

Le recul résiduel absolu est ainsi considéré entre 1948 et 2007. Sur Moriani, l'érosion historique du littoral est ainsi confirmée avec des reculs maximums du trait de côte de l'ordre de 20 m sur 60 ans, soit une valeur moyenne de recul de 0,33 m/an. A cette échelle de temps, le trait de côte dans ce secteur est donc dans une tendance de recul modérée mais chronique. L'impact de la construction du Port de Taverna dans les années 1970 a eu des conséquences en termes de baisse des apports sédimentaires sur cette portion du littoral, à l'origine, pour partie de cette érosion. Cette situation a incité l'OEC et le BRGM à intégrer le site dans le Réseau d'Observation du Littoral de Corse (ROL) depuis 2002 (Palvadeau et Nay, 2002).

Un suivi annuel de la position du trait de côte a donc été engagé. Les résultats de ce suivi sont représentés sur l'illustration 4. Entre 2012 et 2015, le recul moyen du trait de côte est mesuré de l'ordre de -8 m sur l'ensemble du linéaire. Cette évolution montre cependant une grande variabilité temporelle avec des périodes de faibles avancées de la position du trait de côte, mais également une forte disparité spatiale de ces évolutions le long du littoral. Le comportement du trait de côte étudié à cette échelle de temps est la conséquence de plusieurs facteurs dont les modes d'interactions ne sont pas encore certains aujourd'hui. Ainsi, la dérive littorale, moteur de l'évolution morphologique à moyen et long terme, est contrôlée par le climat des vagues, et l'impact des tempêtes est responsable des évolutions (érosions principalement) à très court-terme.

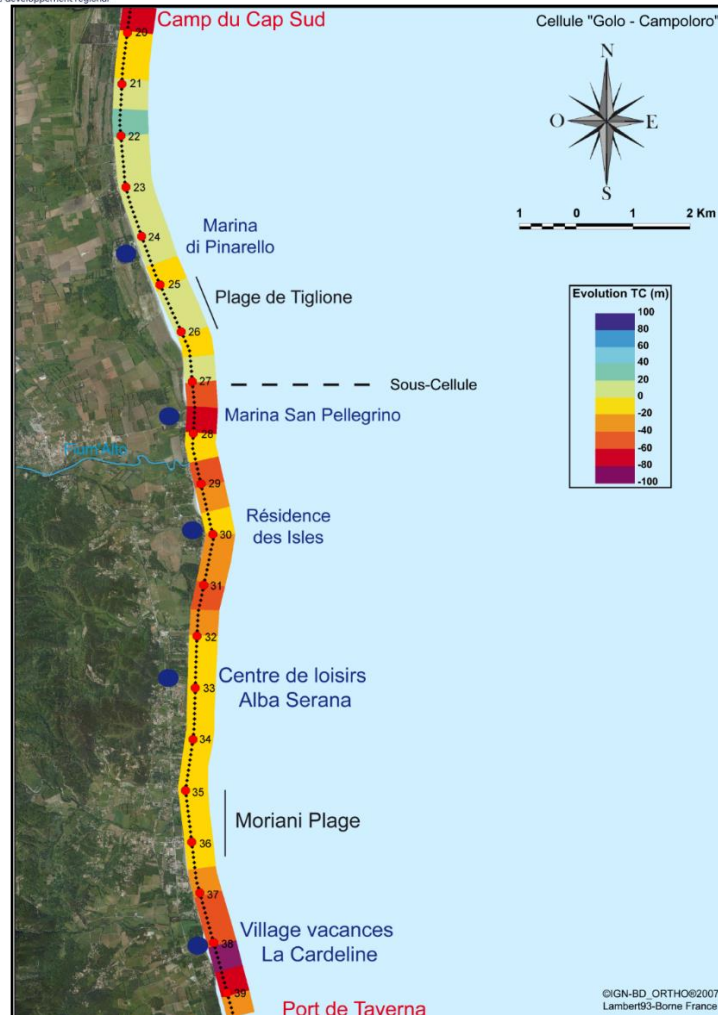


Illustration 3 – Evolution 1947 - 2007 du trait de côte sur la plaine orientale (Cellule-Golo-Campoloro ; Stéphanian *et al.*, 2010).

Les levés annuels ne permettent pas de discriminer le rôle respectif de ces agents de forçages, mais ils permettent cependant de mettre en évidence des modes d'évolution morphologique du littoral. Ainsi, la grande variabilité spatiale des évolutions du trait de côte est à relier avec la morphologie de la plage sous-marine, qui présente le long de la plaine orientale des grandes barres sous-marines, en forme rectiligne et/ou en croissants. Ces formes migrent longitudinalement sous l'effet des vagues incidentes (dérive littorale) et en période de tempête, elles conditionnent l'impact des vagues sur la côte dissipant celles-ci au large (shoaling) et en distribuant la concentration de leur énergie en modifiant leur incidence à la côte (réfraction).

La mise en œuvre de techniques de surveillance vidéo sur ce site à travers le projet MAREGOT doit permettre de mettre en évidence ces comportements à court, moyen et long terme en prenant en compte les conditions hydrodynamiques incidentes, afin de connaître et si possible paramétrer la dynamique des barres sous-marines et leur relation avec l'évolution du trait de côte (berme) et éventuellement du haut de plage (dune) sur les parties non-urbanisées.

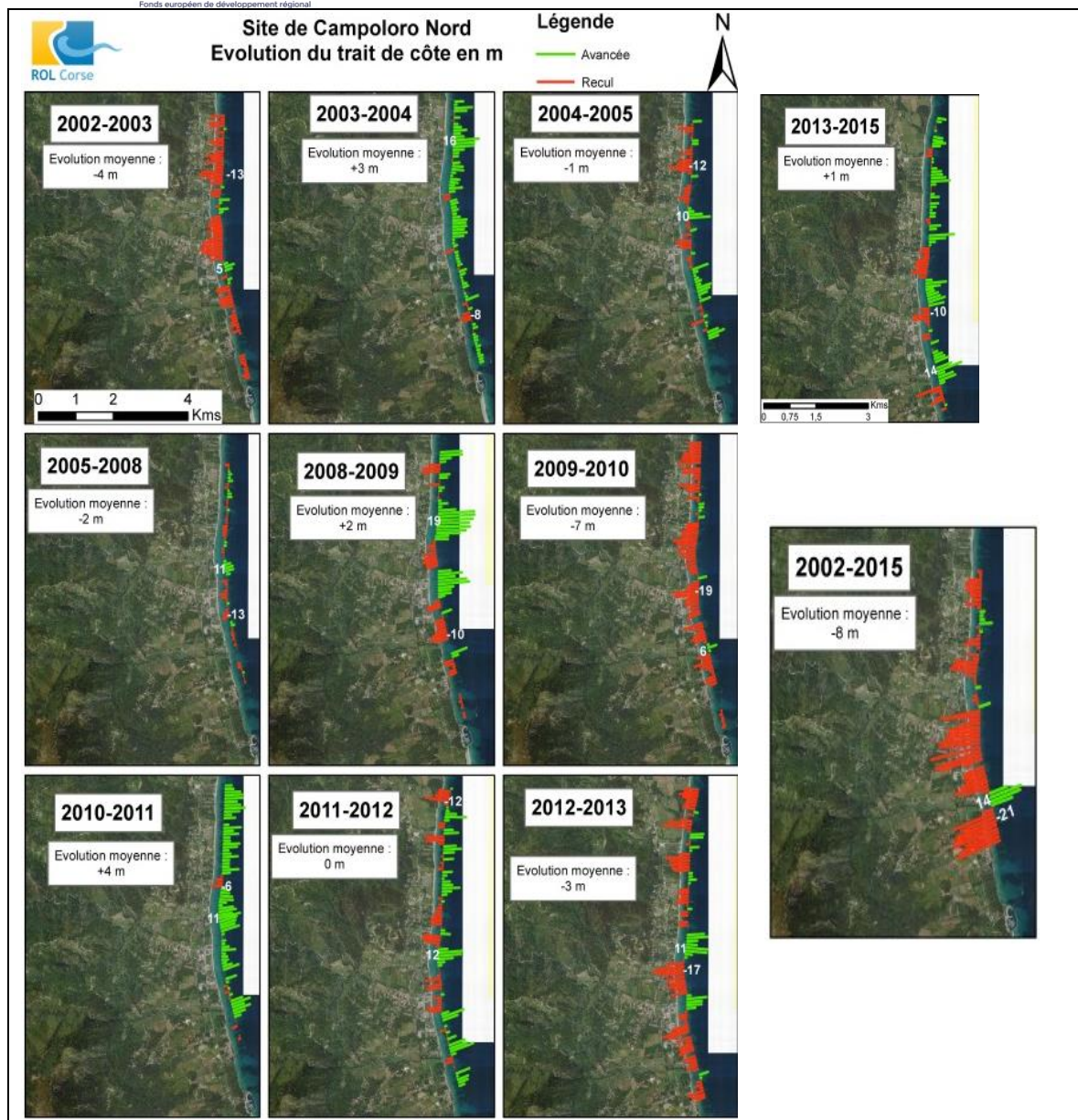


Illustration 4 - Site Moriani, Evolution pluriannuelle du trait de côte du littoral au nord du Port de Taverna entre 2002 et 2015 (© IGN BD-ORTHO 2007 ; in Belon et Bodéré.,2016).

Submersion marine

Le littoral de Moriani a fait l'objet d'une estimation de la vulnérabilité du littoral face au phénomène de submersion marine menée à l'échelle de la Plaine Orientale (Balouin *et al.*, 2012). Cette approche était basée sur :

- L'estimation d'une période de retour des vagues de tempête centennale, à partir d'une base de données de houle développée par le BRGM sur le pourtour de la Corse (BDHC ; Belon, 2013);
- du calcul des niveaux marins atteints via la formulation de Stockdon *et al.* (2006);
- de la comparaison de ces niveaux avec les données de Lidar topographique acquises par le BRGM et l'OEC en 2010, sur l'ensemble de la plaine orientale de Corse.

L'illustration 13 montre ainsi un extrait de la superficie des zones soumises à un phénomène de submersion marine d'occurrence centennale.

Submersion marine sur la Plaine orientale de Corse



**Tempête fictive
centennale**

Hs max = 10.20 m
Tp max = 11 s
Surcote = 0.9 m

Campoloro

1. Extension de la submersion

- Limite du niveau statique
- Zone d'action du jet-de-rive

2. Niveaux d'eau

Submersion marine permanente

- 0 - 0,5 m
- 0,5 - 1 m
- 1 - 1,5 m

Zone de battement des vagues

© IGN-Scan25 © 2007 Lambert93 - Borne France

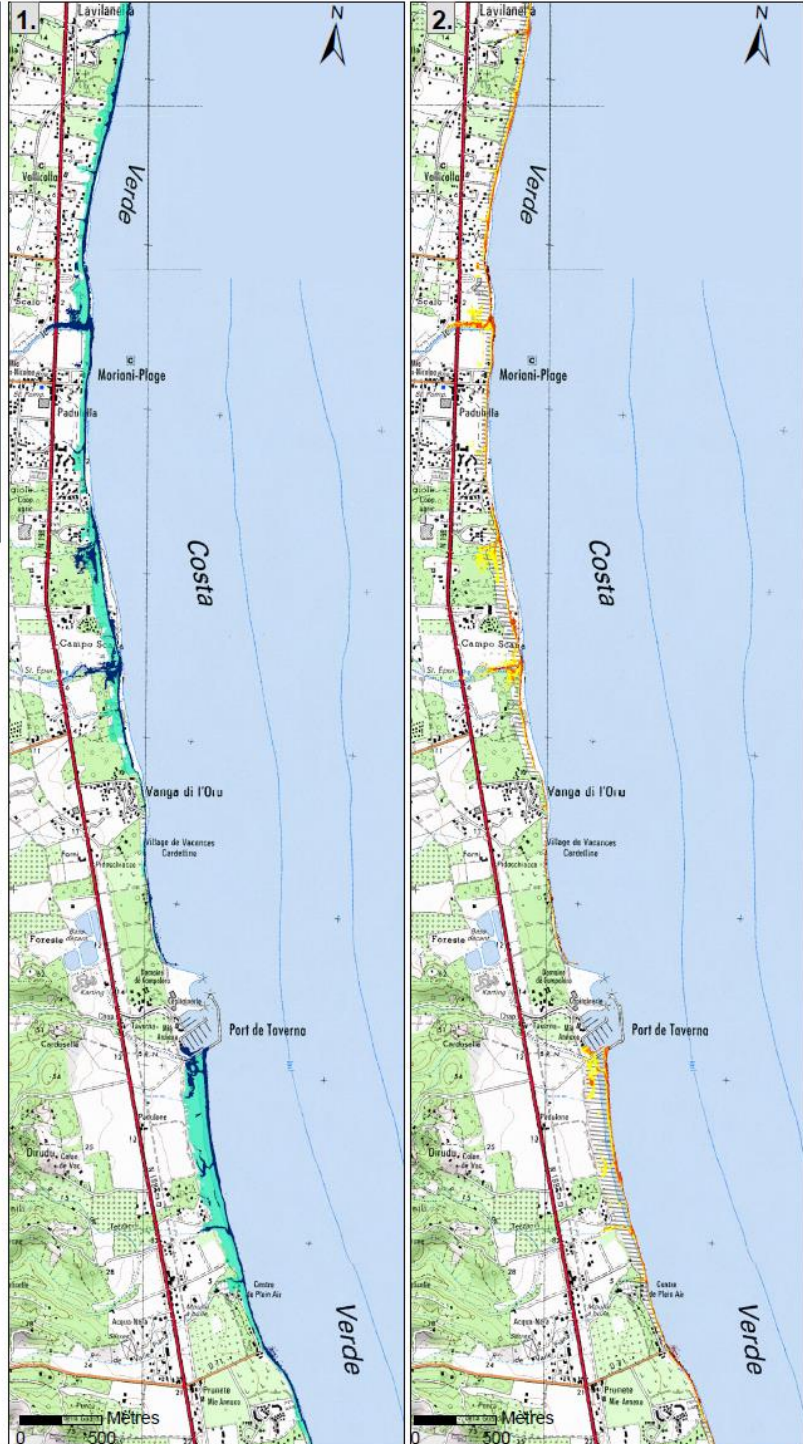


Planche n°22

Illustration 13 - Cartographie de la submersion marine pour une tempête de période de retour centennale (Balouin *et al.*, 2010).

L'ensemble de la plage est logiquement soumis à une inondation potentielle par submersion marine. La propagation de la submersion est contrôlée par la topographie des surfaces terrestres.

Ainsi, les espaces avec un cordon dunaire développé sont relativement protégés alors que les zones d'embouchure des petits fleuves côtiers sont des zones de pénétration des eaux marines lors des tempêtes.

Plans de prévention

Malgré l'exposition du littoral à l'érosion côtière et à la submersion marine en tempête, il n'y pas d'une réglementation particulière de l'Etat en termes de prévention des risques littoraux sur la Plaine Orientale. Il n'y a pas de Plan de Prévention des Risques Littoraux (érosion et/ou submersion marine) prescrits sur ce territoire. Cependant, comme sur tout le littoral français, un Porter à Connaissance des risques de submersion marine auprès des collectivités a été réalisé par les Services de l'Etat (DREAL Corse) dans le cadre de la mise en application de la Directive Européenne Inondation (Atlas des Zones Submersibles). L'ensemble du littoral sédimentaire entre Moriani et le port de Taverna au Sud ainsi fait partie du programme de surveillance du Réseau d'Observation du Littoral depuis 2002 avec un monitoring de la topo-bathymétrie des plages et de la position du trait de côte (cf. Illustration 5).

Enjeux présents

Le cordon littoral de Moriani est très urbanisé avec des constructions et des campins situés sur l'arrière plage et le domaine dunaire. C'est un La baie peut être découpée en deux secteurs, un à l'Est qui reste naturel et un à l'Ouest qui est aménagé avec la présence d'enjeux le long du littoral, dont une voie de chemin de fer situé en haut du cordon dunaire sur la moitié ouest de la plage et de nombreux restaurants de plage en première ligne face à la mer (Illustration).



Illustration 6 – Exemples d'enjeux vulnérables à l'érosion côtière sur le littoral de Moriani (17/12/2017).

Une cartographie précise des enjeux a été réalisée sur l'ensemble de la plaine orientale (Stepanian *et al.*, 2010). Elle est représentée sur l'illustration 7, pour ce qui concerne le littoral de San Nicolao. Sont ainsi distingués, les enjeux linéaires et les enjeux fonciers et immobiliers, en fonction de leur utilisation socio-économique. Ce travail a fait l'objet de la création d'une couche d'information géoréférencée spécifique.

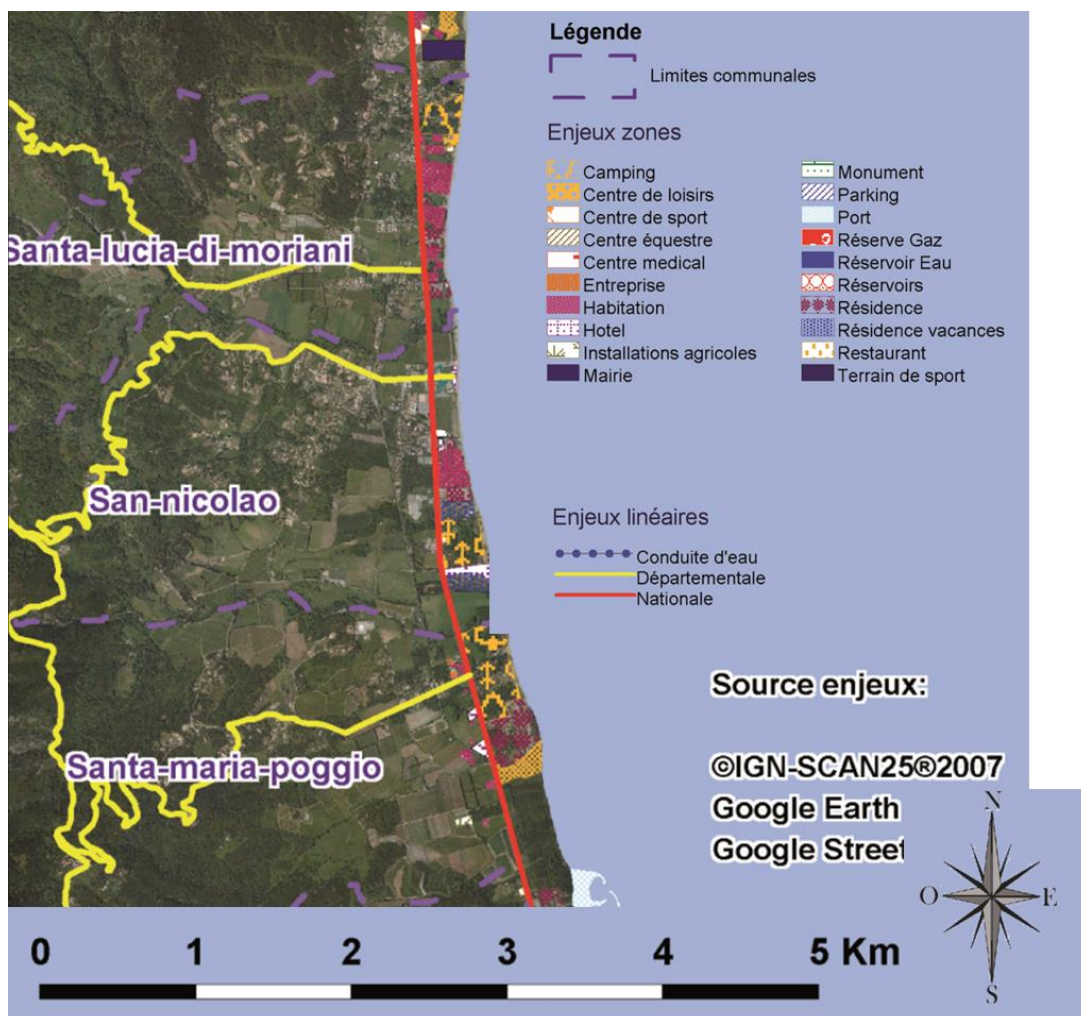


Illustration 7 – Cartographie des enjeux littoraux sur le site pilote de Moriani (Stéphanian *et al.*, 2010).

Conclusion

Rappel de la problématique du site

La plage de Moriani est située sur la plaine orientale de Corse, un cordon littoral sableux continu de 100 km de long entre Bastia et Solenzara. C'est un secteur du littoral très touristique avec de nombreux enjeux : infrastructures touristiques (campings) en arrière de la plage, un grand nombre de restaurants de plage la plage et la zone urbaine de Moriani-plage. C'est aussi un secteur soumis à une érosion chronique en relation avec la construction du Port de Taverna dans les années 1970. L'érosion importante sur ce littoral a entraîné la mise en place de techniques de lutte telles que des ouvrages géotextiles (épis) et des enrochements (digue frontale), et ce secteur fait l'objet de rechargements régulier devant la zone urbaine. La complexité des processus en jeu, entre la dérive littorale l'impact des tempêtes et la forte influence de la morphologie sous-marine (barres en croissant) nécessite une meilleure prise en compte de ceux-ci et leur compréhension à travers un suivi morphologique par camera videos.

Représentativité transfrontalière du site

La plage de Moriani est située au sein d'une cellule hydrosédimentaire qui présente un recul du trait de côte important depuis de nombreuses années, et la gestion de l'érosion doit être abordée par une stratégie à l'échelle de cette cellule sédimentaire. L'impact des infrastructures portuaires est très intéressant à mettre en évidence pour mieux gérer son évolution actuelle et proposer des analyses prospectives sur son devenir. La surveillance morphologique permettra de mettre en évidence à toutes les échelles de temps, les effets de la dérive littorale de l'impact des tempêtes, de la morphologie pre-existante sur une côte basse sableuse, avec des plages à barres sous-marines en croissant, sur un site original dans le cadre de l'espace Maritimo (cordon littoral sableux continu).

Bibliographie

Bélon R. et Bodéré G. (2016) – Réseau d'Observation du Littoral de la Corse. Rapport d'observations 2015. Rapport BRGM RP-66351-FR, 111 p., 66 ill.

Balouin, Y., Belon, R., Delvallée, E., Lamy, M. et Bodéré, G., 2011. ROL : Etude complémentaire sur l'impact des tempêtes sur le littoral de la Plaine Orientale de Corse. Cartographie de la submersion marine, de la sensibilité à l'érosion côtière et de l'exposition des enjeux. RP-59724-FR, 39p + volume cartographique

Palvadeau E., et Nay K.M. (2002). Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observation 2001. Rapport BRGM/RR-51503-FR. Orléans : BRGM, 89 p.

Stépanian A., Balouin Y., Bacon A., Bodéré G, Danger Y., Hennequin V., (2010). Atlas littoral de la plaine orientale de Corse. Rapport final. Rapport BRGM RP-59058-FR, 80 p., 13 ill., 28 planches.

Stockdon, H.F.; Holman, R.A.; How, P.A.; Sallenger, A. H. Jr. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and run-up. Coastal Engineering, 53, pp. 573-588

Site de l'Arinella à Bastia (Haute-Corse, France)

Présentation du site

Localisation

La plage de l'Arinella est située au sud de Bastia, entre la zone protégée par des enrochements au nord et le grau de l'étang de Biguglia au Sud (Illustration 14).

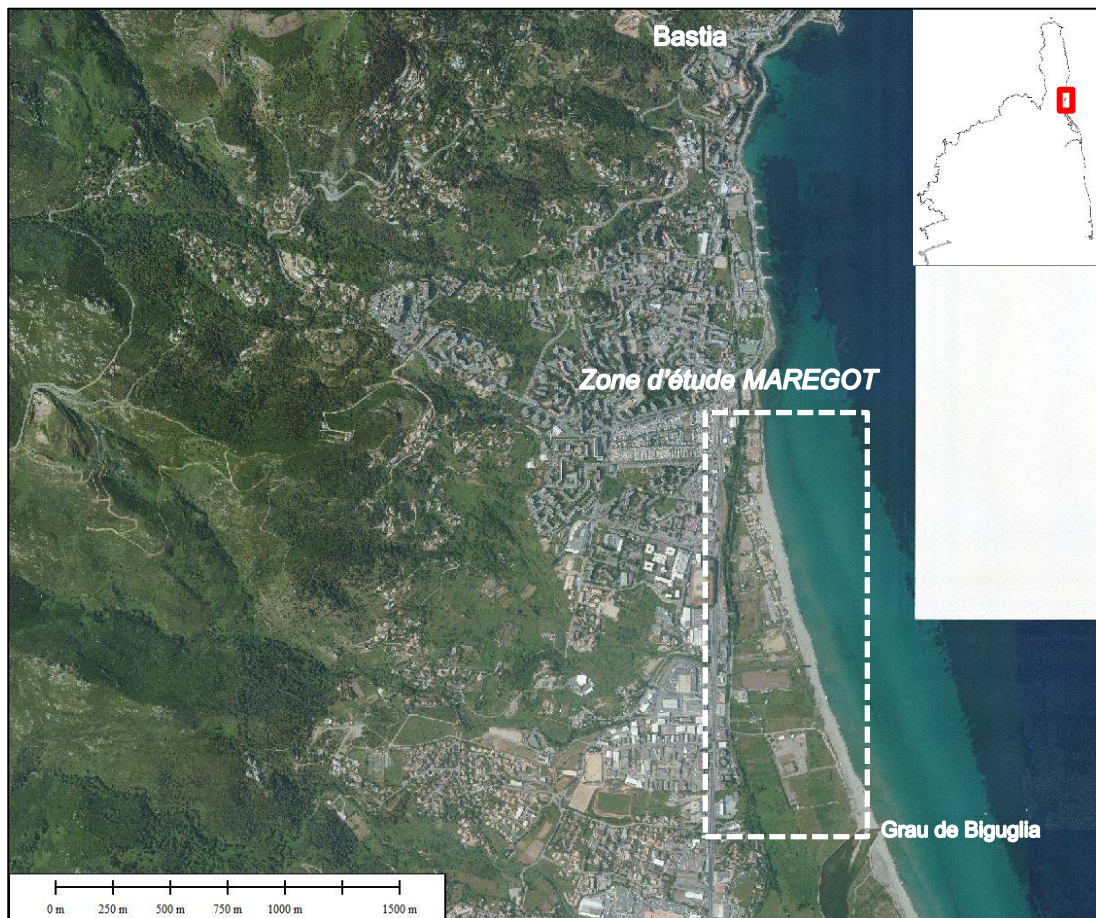


Illustration 14 - Vue aérienne et localisation de la plage de l'Arinella (Source : IGN BD-ortho 2007)

La partie nord de la plage fait l'objet d'un grand projet d'extension du port de Bastia (Illustration). Ce projet d'aménagement portuaire aura de fortes conséquences sur la dynamique littorale locale en termes de transits sédimentaires sur la plage mais également au niveau du grau de Biguglia qui assure les échanges entre la lagune et la mer. Des études d'impacts hydro sédimentaires, avec des modélisations prédictives de l'évolution future du trait de côte ; ont été réalisées depuis 2006 pour le compte de la Collectivité Territoriale de Corse. (CTC, 2006, 2010). Ce secteur, qui n'est pas suivi dans le cadre du Réseau d'Observation du Littoral de Corse, nécessite néanmoins la mise en place d'une stratégie de suivi afin d'améliorer la compréhension de la dynamique hydro-sédimentaire naturelle (Stéphanian *et al.*, 2012).

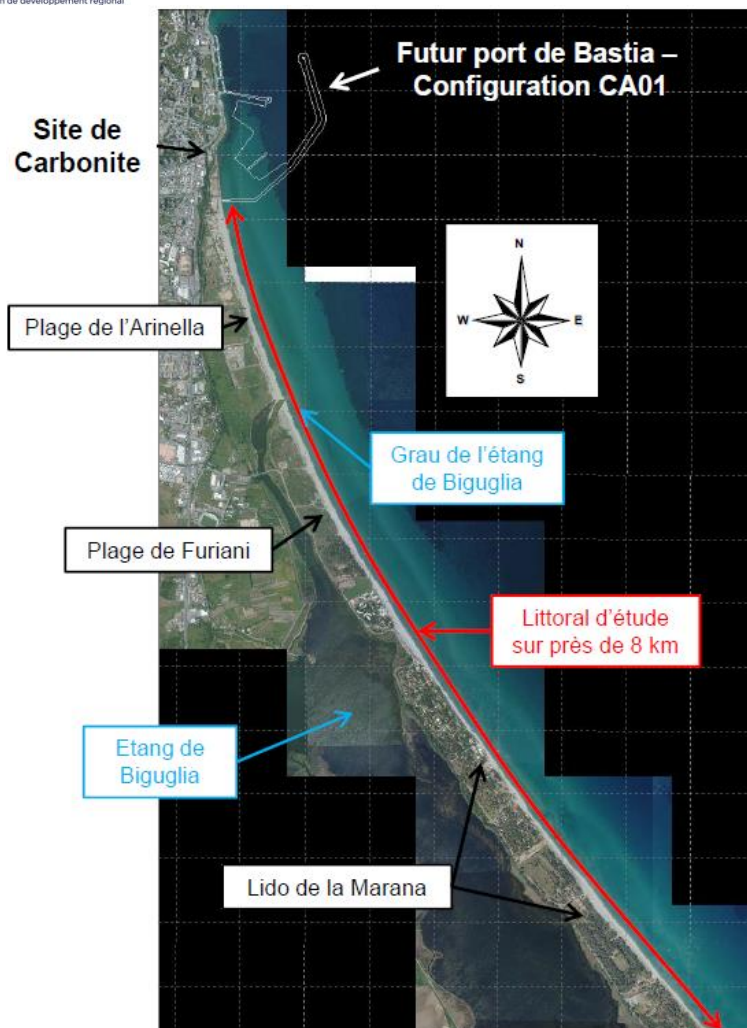


Illustration 2 - Projet d'extension portuaire sur le site de la Carbonite au nord de la plage de l'Arinella

Description géographique

La plage de l'Arinella est caractéristique des plages de la Plaine orientale. Elle est relativement large (20-25 m), en pente douce (1,5%), avec un domaine dunaire résiduel, en raison de l'urbanisation du haut de plage (Illustration 15). Le profil de la plage montre des micro-morphologies (bermes, croissants, barres de swash) au niveau de la ligne de rivage.

Lorsque les conditions d'énergie des houles augmentent, la plage est soumise généralement à une érosion par les vagues qui se traduit par la création de micro-falaises, cicatrices des niveaux maximums atteints par le jet-de-rive. La plage sous-marine présente généralement une à plusieurs barres d'amplitude métrique à pluri-métrique dont la formation résulte de processus complexes qui varient très souvent d'un site à l'autre. Plus au large, sur le domaine sous-marin, tout le long de la plaine orientale, un herbier de *Posidonia oceanica* s'étend de manière homogène du Nord au Sud à partir de -10 m de profondeur. Enfin en raison de la présence proche du grand herbier de *Posidonia oceanica*, elles reçoivent régulièrement des débris qui s'accumulent en « banquettes » sur la plage émergée. L'extension future du Port de Bastia aura des conséquences importantes sur cet herbier de *Posidonia oceanica*.



Illustration 15 - Plage de l'Arinella depuis le site pressenti pour l'installation d'une caméra (vue vers le Sud)

Caractéristiques physiographiques/écosystémiques

La plage de l'Arinella n'est pas incluse dans un périmètre NATURA 2000 à terre, ni une Zone de Protection d'espèce particulière (ZNIEFF, ZICO, ZPS). En revanche, elle est bordée d'un herbier de *Posidonia oceanica* d'intérêt communautaire (site NATURA 2000 FR9402014 « Grand herbier de la côte orientale ») au titre de la Directive Habitat (Illustration 164).



Illustration 16 – Situation de la plage de l'Arinella par apports aux périmètres NATURA2000 en mer

Connaissances disponibles

Les principales connaissances acquises dans le domaine des risques côtiers et de la gestion du trait de côte au niveau de la plage de l'Arinella,, sont rassemblées dans le tableau ci-dessous (Tableau).

Thème	Données	Nature des données	Période	Source	Bibliographie
Evolution du trait de côte	Traits de côte	Photographies aériennes	1948-2007	BRGM	Stépanian <i>et al.</i> (2010)
		Photographies aériennes	1948-2007	SOGREAH	CTC (2006, 2010)
Evolution des plages	Topographie	Pas de données topographiques régulières			
Evolution bathymétrique	Bathymétrie	Pas de données bathymétriques régulières			
Submersion marine	Couches SIG des hauteurs d'eau potentielle	Pas de données sur la submersion marine			
Enjeux	Couche SIG des enjeux linéaires et zonaux	Données SIG Vecteurs	2010	BRGM	Stépanian <i>et al.</i> (2010)

Tableau 1 - Connaissances disponibles sur le site de Moriani (Haute-Corse).

Etat des connaissances

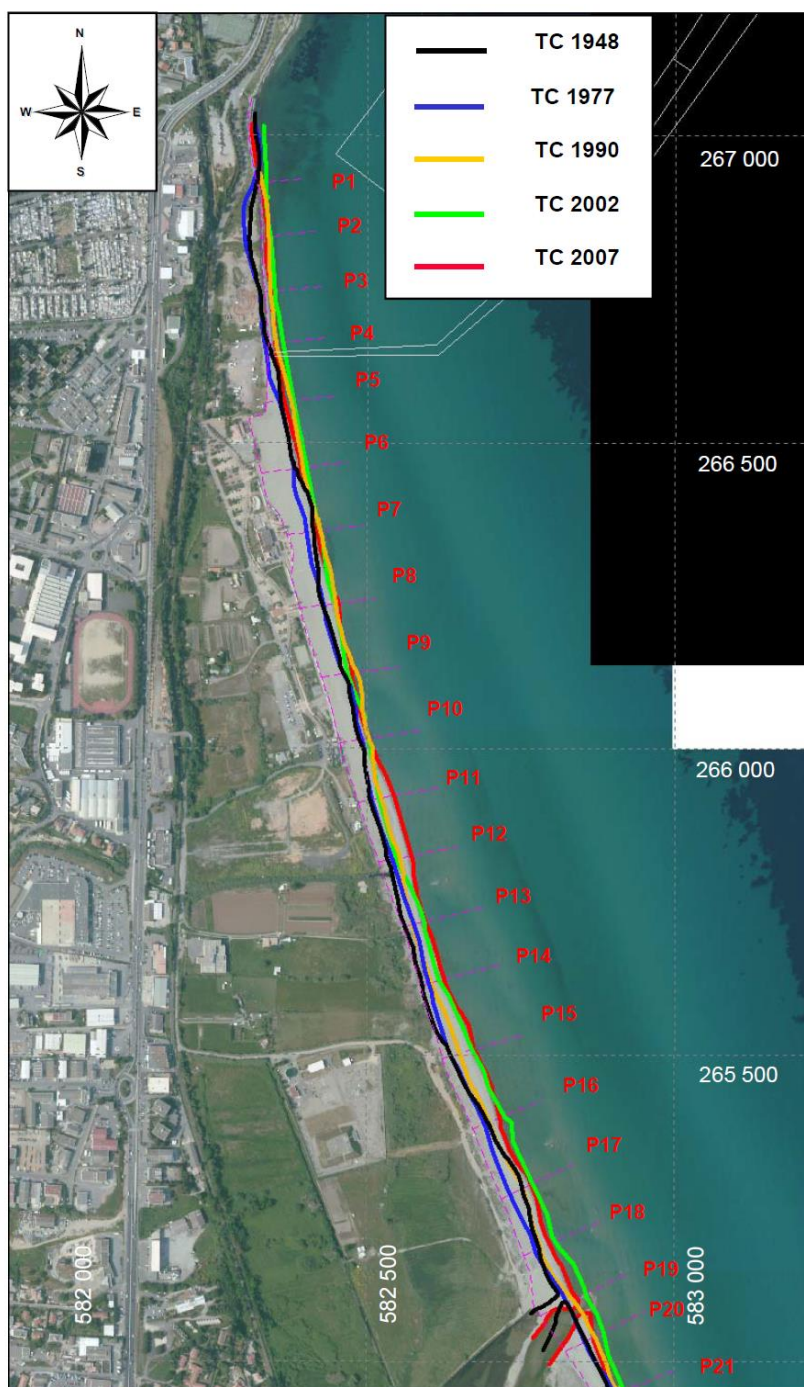
Aléas côtiers

Evolution du trait de côte

A l'échelle de temps historique (1948-2007), l'évolution du trait de côte a été étudiée à partir de photographies aériennes pour différentes dates par le BRGM (Delpond et Oliveros, 1998 ; Stépanian *et al.*, 2010) et également par la société SOGREAH (CTC, 2006 ; 2010) dans le cadre du projet d'extension portuaire. Les lignes de rivages pour chaque année disponible ont été digitalisées et comparées entre elles par une analyse diachronique quantitative (Illustration 17 et Illustration 186). Ces analyses montrent que l'évolution globale est très variable à cette échelle de temps. Le littoral au nord, au contact avec le projet portuaire est marqué par une tendance à l'accrétion sédimentaire et l'avancée du trait de côte jusqu'en 2002. Entre 2002 et 2007, cette phase positive marque le pas et un recul du trait de côte se produit, à l'exception de la zone centrale (profils 12 à 18) où l'avancée est significative.

La comparaison des traits de côte digitalisés à partir des ortho-photographies 2002 et 2007, confortées par des suivis topographiques de la plage à un rythme mensuel entre 2009 et 2010, et enfin, la connaissance issue du terrain avec les informations du gestionnaire de la base de voile, apportent des éléments intéressants sur l'évolution de la largeur de plage et permettent de pondérer la tendance historique avec la variabilité saisonnière de la largeur de plage. En effet, la tendance historique de ce secteur est à l'accrétion générale entre 1948 et 2007, sous l'effet des apports de la dérive littorale résultante orientée Nord-Sud localement. SOGREAH attribue la tendance érosive constatée entre 2002 et 2007 à un épiphénomène due la variabilité naturelle de la plage.

Ce secteur, qui n'est pas dans un état de sensibilité extrême, mériterait donc la poursuite d'un suivi régulier, avec des profils topographiques de la plage, pour disposer de données métriques sur ce secteur, et accéder à des informations sur le volume sédimentaire. C'est le sens de son choix pour devenir un des sites pilotes MAREGOT.



Orthophoto IGN 2007

Coordonnées : Lambert IV Corse

Illustration 17 – Evolution 1948 - 2007 du trait de côte sur la plage de l'Arinella (Cellule-Lupino-Golo;- CTC, 2010).

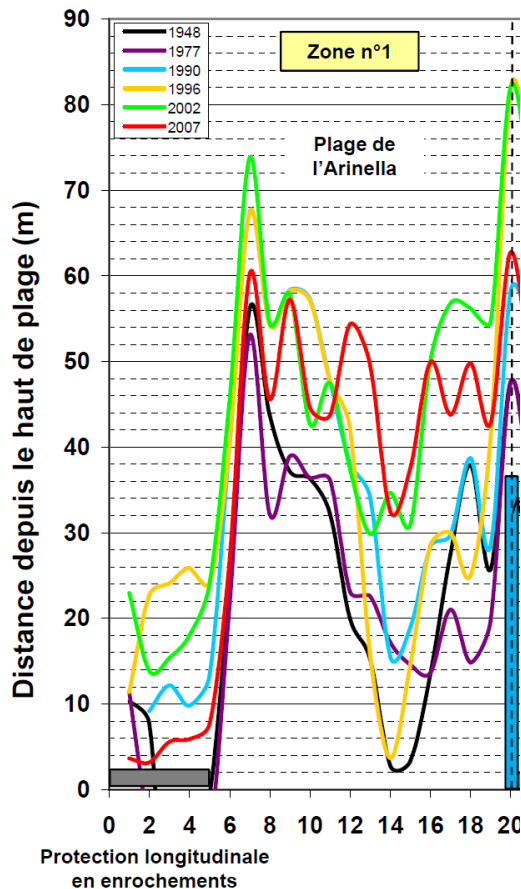


Illustration 18 – Evolution quantitative du trait de côte entre 1948 et 2007 sur la plage de l'Arinella (n° de profils en abscisses).

En effet, les levés annuels ne permettent pas de discriminer le rôle respectif de ces agents de forçages, mais ils permettent cependant de mettre en évidence des modes d'évolution morphologique du littoral. Ainsi, la grande variabilité spatiale des évolutions du trait de côte est à relier avec la morphologie de la plage sous-marine, qui présente le long de la plaine orientale des grandes barres sous-marines, en forme rectiligne et/ou en croissants. Ces formes migrent longitudinalement sous l'effet des vagues incidentes (dérive littorale) et en période de tempête, elles conditionnent l'impact des vagues sur la côte dissipant celles-ci au large (shoaling) et en distribuant la concentration de leur énergie en modifiant leur incidence à la côte (refraction). La mise en œuvre de techniques de surveillance vidéo sur ce site à travers le projet MAREGOT doit permettre de mettre en évidence ces comportements à court, moyen et long terme en prenant en compte les conditions hydrodynamiques incidentes, afin de connaître et si possible paramétrer la dynamique des barres sous-marines et leur relation avec l'évolution du trait de côte (berme) et éventuellement du haut de plage (dune) sur les parties non-urbanisées.

Submersion marine

Le littoral de la plage de l'Arinella n'a pas fait l'objet d'une étude spécifique de l'aléa submersion marine par le BRGM et l'OEC dans le cadre de l'étude des phénomènes de submersion marine menée à l'échelle de la Plaine Orientale (Balouin *et al.*, 2012). C'est néanmoins un secteur inclus dans l'Atlas des Zones Submersibles dans le cadre de la mise en application de la Directive Européenne Inondation. Les cartographies n'ont cependant pas été publiées par l'Etat.

Plans de prévention

Malgré l'exposition du littoral à l'érosion côtière et à la submersion marine en tempête, il n'y pas d'une réglementation particulière de l'Etat en termes de prévention des risques littoraux sur la Plaine Orientale. Il n'y a pas de Plan de Prévention des Risques Littoraux (érosion et/ou submersion marine) prescrits sur ce territoire. Cependant, comme sur tout le littoral français, un Porter à Connaissance des risques de submersion marine auprès des collectivités a été réalisé par les Services de l'Etat (DREAL Corse) dans le cadre de la mise en application de la Directive Européenne Inondation (Atlas des Zones Submersibles).

Enjeux présents

La plage de l'Arinella est une plage quasi-urbaine située à proximité de Bastia. Dans le cadre de l'étude sur l'exposition de la plaine orientale vis-à-vis de l'érosion côtière (Stépanian *et al.*, 2010), un inventaire des enjeux sur ce littoral a été réalisée (Illustration 197). Sont ainsi distingués, les enjeux linéaires et les enjeux fonciers et immobiliers, en fonction de leur utilisation socio-économique. Ce travail a fait l'objet de la création d'une couche d'information géoréférencée spécifique.



Illustration 19 – Cartographie des enjeux littoraux sur le site pilote de Moriani (Stépanian *et al.*, 2010). Sur cette plage, un certain nombre d'enjeux économiques (restaurants, clubs de voile, centre de Loisirs) sont présents. Des établissements recevant du public (collèges, écoles, stade, gendarmerie, centre de secours) sont eux présents sur le cordon littoral, et potentiellement exposés à un recul du trait de côte.

Conclusion

Rappel de la problématique du site

La plage de l'Arinella est située sur la plaine orientale de Corse, à proximité de Bastia, qui est très fréquentée pour des usages récréatifs. C'est un littoral plutôt stable, avec cependant des phases érosives marquées, qui est situé à l'aval de la dérive sédimentaire Sud-Nord qui domine la dynamique littorale de la plaine orientale. Le projet de construction d'une extension portuaire sur la partie nord tva entrainer une modification profonde des transits sédimentaires sur ce site. Il est

de plus susceptible de perturber la dynamique au niveau du grau de Biguglia qui assure les échanges entre la lagune et la mer. Les simulations de l'évolution future du littoral, avec et sans aménagement; réalisées par SOGREAH montrent que, pour une période de simulation de 30 ans, seul le littoral situé à moins d'un kilomètre au Sud du Port serait affecté par une accrétion significative du trait de côte, en conséquence de la construction de la digue portuaire sud. Au-delà vers le Sud, les simulations montrent que la cinématique littorale au niveau du grau de l'étang de Biguglia, et du lido de la Marana, ne serait pas significativement impactée par les effets de la construction du port sur la dynamique sédimentaire côtière.

Représentativité transfrontalière du site

La plage de l'Arinella est située à l'extrémité d'une cellule sédimentaire, avec un contexte plutôt favorable en termes sédimentaires. La surveillance morphologique développée dans MAREGOT permettra de mettre en évidence à toutes les échelles de temps, les effets de la dérive littorale, de l'impact des tempêtes, sur une plage à barres sous-marines en croissant, sur un site complémentaire à celui de Moriani. Ce site fait de plus l'objet d'un projet d'extension du port de Bastia qui nécessite la mise en place d'une stratégie de suivi afin d'améliorer la compréhension de la dynamique hydro-sédimentaire naturelle pour apporter une expertise locale et actualisée de son évolution actuelle.

Bibliographie

CTC (2006). Extension du Port de Bastia sur le site de la Carbonite – Etudes hydrauliques maritimes et hydrosédimentaires - SOGREAH - Rapport final 1711597, 66 p. + Annexes.

CTC (2010). Extension du Port de Bastia sur le site de la Carbonite – Etudes hydrauliques maritimes et hydrosédimentaires complémentaires - SOGREAH - Rapport final 171994, 50 p. + Annexes.

Delpont G., et Oliveros C. (1999). Littoral oriental corse : évolution du trait de côte de 1948 à 1996 de Bastia-Furiani à Cervione et de l'embouchure du Travo (Solaro) à Solenzara. Rapport BRGM/RP-40504-FR, 22 p.

Stépanian A., Balouin Y., Bacon A., Bodéré G, Danger Y., Hennequin V., (2010). Atlas littoral de la Plaine Orientale de Corse. Rapport final. Rapport BRGM RP-59058-FR, 78 p., 13 ill., 28 planches.

Bélon R. et Bodéré G. (2016) – Réseau d'Observation du Littoral de la Corse. Rapport d'observations 2015. Rapport BRGM RP-66351-FR, 111 p., 66 ill.

Balouin, Y., Belon, R., Delvallée, E., Lamy, M. et Bodéré, G., 2011. ROL : Etude complémentaire sur l'impact des tempêtes sur le littoral de la Plaine Orientale de Corse. Cartographie de la submersion marine, de la sensibilité à l'érosion côtière et de l'exposition des enjeux. RP-59724-FR, 39p + volume cartographique

Palvadeau E., et Nay K.M. (2002). Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observation 2001. Rapport BRGM/RR-51503-FR. Orléans : BRGM, 89 p.

Stépanian A., Balouin Y., Bacon A., Bodéré G, Danger Y., Hennequin V., (2010). Atlas littoral de la plaine orientale de Corse. Rapport final. Rapport BRGM RP-59058-FR, 80 p., 13 ill., 28 planches.

Stépanian A., Palvadeau E., Balouin Y., et Bélon R. (2012) – Compte-rendu de la participation de 2009 à 2011 du BRGM Corse au Comité Scientifique mis en place dans le cadre du projet d'extension du port de Bastia sur le site de la Carbonite. Rapport BRGM/RP-61265-FR. 23 p., 3 ill + 1 ann.

Site d'Aléria-Ghisonaccia (Haute-Corse, France)

Présentation du site

Localisation

Le site pilote qui a fait l'objet de ce document est constitué par le trait de côte compris entre la commune d'Aléria au Nord et la commune de Ghisonaccia au Sud, Département de la Haute-Corse-FR (Illustration 1). Il s'agit d'une côte basse s'étendant sur environ 15 km de long



Illustration 1 - Vue aérienne et localisation du site pilote plaine orientale (Source : Google map)

Cette côte est sujette à un phénomène d'érosion côtière chronique qui, par le passé, a engendré des dégâts plus ou moins importants sur les enjeux présents le long de la plage. Des discussions avec le représentant de l'État, les maires des communes concernées et les exploitants ont eu lieu mais sans jamais donner de suites concrètes en termes de gestion du risque. Plusieurs études du BRGM ont donné lieu à des rapports qui sont consultables en ligne¹.

¹ <http://infoterre.brgm.fr/> ; www.littoral-corse.fr/

Description géographique

Il s'agit d'une côte basse sableuse qui borde un territoire dont l'altitude moyenne est de 16 mètres pour la commune de Ghisonaccia et 10 mètres pour la commune d'Aleria ce qui induit une altitude de 1 à 2 mètres en arrière immédiat de la côte. On note un grand nombre d'exploitations, de restaurants, de camping et de plages aménagées ainsi que de sociétés de productions ostréicoles et mytilicoles particulièrement dans l'étang d'Urbino. Le trait de côte présente une zone de plage sous-marine en pente douce (inférieure à 1%) avec des morphologies de barres sableuses très aplaties et une plage aérienne relativement étroite.

Caractéristiques physiographiques/écosystémiques

L'étang d'Urbino est classé « Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique » (ZNIEFF) 2, et « Zone de protection spéciale » (ZPS) au titre de la Directive oiseaux de 1975. Il est également reconnu site Ramsar depuis le 15 septembre 2008. Il a été acquis entièrement par le Conservatoire du Littoral, qui maintient les activités traditionnelles (pêche, mytiliculture...) il abrite également un écosystème remarquable.

Connaissances disponibles

La plaine orientale de la Corse a été étudiée à de nombreuses reprises pour des objectifs différents. Les principales connaissances acquises dans le domaine de la gestion des risques côtiers sur ce trait de côte sont rassemblées dans les tableaux ci-dessous. Ce sont ces données qui sont exploitées dans la suite du rapport pour qualifier le site MAREGOT de la Plaine Orientale. Ces tableaux recensent les événements météorologiques intenses récents qui ont impactés la Corse (Illustration 2). Les éléments relatifs à la côte Est de l'île sont en grisé.

N°	Date	Commentaires / Dégâts et perturbations constatés
9	21/06/1999	Vents violents de secteur Ouest à Nord sur le Cap Corse - 2 morts à Lumio et Calvi
10	08/07/1996	Tempête sur la Corse / liaisons maritimes coupées
11	15/03/1996	Fortes précipitations sur le versant est de l'île ; Plaine Orientale en état d'alerte
12	02/01/1996	Vent violent sur la région bastiaise
13	17/08/1995	Violents orages accompagnés de fortes rafales de vents.
14	13/05/1995	Violents orages et vents très forts
15	28/03/1995	Rafales à plus de 150 km/h sur toute l'île
16	26/02/1995	170 km/h sur Cap Corse (Libecciu)
17	27/01/1995	Vents à 160km/h perturbant la navigation aérienne
18	19/01/1995	140 km/h sur le cap corse
19	11/01/1995	137 km/h sur le cap corse
20	23/12/1994	Violente tempête d'Est à Bastia occasionnant des dégâts importants au port de Toga - "vents poussés vers la marina"
21	25/08/1994	140 km/h ; bateaux bloqués au large de Bastia
22	12/06/1994	Inondations à Bastia
23	10/04/1994	Froid, vents, pluies
24	02/04/1994	Un coup de vent violent perturbe le trafic aérien et maritime
25	28/01/1994	Bastia : rafales à 120 km/h, empêchent le Kalliste d'entrer au port
26	01/01/1994	Bastia : sous des rafales de 150 km/h, le car-ferry de la snom rompt ses amarres et percute un navire italien
29	26/12/1993	Risées violentes sur la côte est et houle dans le Vieux Port de Bastia
28	17/12/1993	Risées violentes sur la côte est et houle dans le Vieux Port de Bastia
27	08/12/1993	De violentes rafales de vent (180 km/h) soufflent sur Bastia et la Haute-Corse / Le 11, 212 km/h sur le Cap, 220km/h le 12, un avion Marseille-Bastia détourné vers Ajaccio
30	31/10/1993	Fleuves en crue dans la Plaine Orientale, cellule de crise à la préfecture, 6 morts, plan ORSEC enclenché jusqu'au 7 novembre
31	28/02/1993	Pluies et vents
32	05/12/1992	Vents et pluies diluviennes en Haute-Corse
33	21/10/1992	Haute-Corse sous les eaux : plaine de la Marana inondée
34	18/10/1992	Pluies et vents sur la Haute-Corse : 170 km/h au Cap Corse
35	05/10/1992	Bastia paralysée par la tempête : nombreux dégâts sur le vieux port, tunnel inondé...
36	23/11/1990	Tempête sur le Nord de la Corse
37	27/02/1990	Tempête en haute corse : mini-tornade à Bastia, maisons évacuées sur la côte orientale, incendies, bulletin spécial le 27/08
38	14/02/1990	Vents de 160 km/h dans la région bastiaise, >200 km/h au Cap Corse (W à NW sur est corse), aucun bateau ne peut entrer ou sortir du port, incendies, toiture envolée à Bastia, ponton retourné à Bonifacio
39	08/10/1989	Trombes d'eau et vents violents sur la région bastiaise, dégâts importants, coulées de boues, incendies

**Interreg**

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional

N°	Date	Commentaires / Dégâts et perturbations constatés
9	21/06/1999	Vents violents de secteur Ouest à Nord sur le Cap Corse - 2 morts à Lumio et Calvi
10	08/07/1996	Tempête sur la Corse / liaisons maritimes coupées
11	15/03/1996	Fortes précipitations sur le versant est de l'île ; Plaine Orientale en état d'alerte
12	02/01/1996	Vent violent sur la région bastiaise
13	17/08/1995	Violents orages accompagnés de fortes rafales de vents.
14	13/05/1995	Violents orages et vents très forts
15	28/03/1995	Rafales à plus de 150 km/h sur toute l'île
16	26/02/1995	170 km/h sur Cap Corse (Libecciu)
17	27/01/1995	Vents à 160km/h perturbant la navigation aérienne
18	19/01/1995	140 km/h sur le cap corse
19	11/01/1995	137 km/h sur le cap corse
20	23/12/1994	Violente tempête d'Est à Bastia occasionnant des dégâts importants au port de Toga - "vents poussés vers la marina"
21	25/08/1994	140 km/h ; bateaux bloqués au large de Bastia
22	12/06/1994	Inondations à Bastia
23	10/04/1994	Froid, vents, pluies
24	02/04/1994	Un coup de vent violent perturbe le trafic aérien et maritime
25	28/01/1994	Bastia : rafales à 120 km/h, empêchent le Kalliste d'entrer au port
26	01/01/1994	Bastia : sous des rafales de 150 km/h, le car-ferry de la snom rompt ses amarres et percute un navire italien
29	26/12/1993	Risées violentes sur la côte est et houle dans le Vieux Port de Bastia
28	17/12/1993	Risées violentes sur la côte est et houle dans le Vieux Port de Bastia
27	08/12/1993	De violentes rafales de vent (180 km/h) soufflent sur Bastia et la Haute-Corse / Le 11, 212 km/h sur le Cap, 220km/h le 12, un avion Marseille-Bastia détourné vers Ajaccio
30	31/10/1993	Fleuves en crue dans la Plaine Orientale, cellule de crise à la préfecture, 6 morts, plan ORSEC enclenché jusqu'au 7 novembre
31	28/02/1993	Pluies et vents
32	05/12/1992	Vents et pluies diluviennes en Haute-Corse
33	21/10/1992	Haute-Corse sous les eaux : plaine de la Marana inondée
34	18/10/1992	Pluies et vents sur la Haute-Corse : 170 km/h au Cap Corse
35	05/10/1992	Bastia paralysée par la tempête : nombreux dégâts sur le vieux port, tunnel inondé...
36	23/11/1990	Tempête sur le Nord de la Corse
37	27/02/1990	Tempête en haute corse : mini-tornade à Bastia, maisons évacuées sur la côte orientale, incendies, bulletin spécial le 27/08
38	14/02/1990	Vents de 160 km/h dans la région bastiaise, >200 km/h au Cap Corse (W à NW sur est corse), aucun bateau ne peut entrer ou sortir du port, incendies, toiture envolée à Bastia, ponton retourné à Bonifacio
39	08/10/1989	Trombes d'eau et vents violents sur la région bastiaise, dégâts importants, coulées de boues, incendies



N°	Date	Commentaires / Dégâts et perturbations constatés
40	01/09/1989	Graves inondations, principalement sur la Plaine Orientale
41	01/03/1989	Vents violents Mer démontées Inondations (sur reportage TF1 sortie de port agitée pour un paquebot + vagues par-dessus un brise-lame à Ajaccio ??)
43	13/05/1988	Grosse Houle sur la Plaine Orientale (pas prévu par Météo)/ Vedette prise dans la tempête au large de Calvi (3 morts)
44	28/04/1988	Mauvais temps sur Bastia
45	12/01/1987	Trafic maritime perturbé à Bastia
46	15/01/1987	Trafic maritime et aérien perturbé à Bastia (Digue emportée à Cargèse)
47	20/11/1987	Le vent a atteint 180 km/h sur Bastia (incendies sur la Plaine Orientale)
48	20/12/1986	Vent à 200 km/h sur la Haute-Corse : trafic aérien perturbé, 2000 abonnés privés d'électricité
49	20/10/1986	Vent à 230 km/h sur le Cap Corse
50	30/03/1986	Libecciu à 200 km/h
51	02/03/1986	Mauvais temps : trafic portuaire perturbé à Bastia
52	15/01/1986	Libecciu à 180 km/h, nombreux dégâts
53	12/01/1986	Tempête de vent, 160 km/h au Cap Corse
54	20/11/1985	Mauvais temps sur la Haute-Corse et plus particulièrement sur la région bastiaise
55	06/11/1985	vent de 120 km/h sur la région bastiaise
56	24/01/1985	Dans la région bastiaise, pointes de vent à 150 km/h
57	08/02/1984	Grosses rafales (160 km/h à Sagro, 200 à Pertusato et 130 à Poretta), cargo en péril à Calvi, mort à Bastia suite à rafale, incendies dans la Plaine Orientale, vagues sur la route du Lido de la Marana, Pylônes FT et EDF tombés sur toute le littoral Est
58	24/01/1984	Trafic maritime et aérien perturbé suite au vent violent dans la région bastiaise. Vent 130km/h à Poretta (cargo rompt ses amarres) Motos et camion renversés à Teghime
59	28/11/1983	Nombreux dégâts dans la plaine du Golo suite à un coup de vent
60	24-25/04/1982	Tempête sur la Corse
61	06-10/11/1982	Arrêté catastrophe naturelle "tempête" - La Solenzara se transforme en torrent de boue suite aux précipitations importantes
62	13/12/1981	Tempête sur la Côte orientale incendies, Bastia vents >100 km/h
63	19/07/1981	Tempête sur l'île : noyades et voiliers en difficulté sur la côte ouest et l'extrême sud. Incendies sur la Plaine Orientale (noyade due aux vagues le 22/07/81 à Campoloro)
64	20/01/1981	Vent violent à Bastia et sur la Cap Corse, un voilier coule au large de Giraglia
65	04/01/1981	Violente tempête sur la Cap Corse (190 km/h)
66	21/04/1980	Violente tempête et voilier en détresse au large de Bastia
67	15/01/1980	Pris par la tempête, un cargo italien s'échoue et coule au large du Cap Corse
68	01/01/1979	Vents atteignant 150 km/h nuit 31 au 1er. Pointe à 150km/h. incendies à Casinca. Trafic aérien perturbé, voiture renversée à Teghime. (forte neige le lendemain)

N°	Date	Commentaires / Dégâts et perturbations constatés
69	22/12/1979	Vent de force 11, vagues de plusieurs mètres (digue port de commerce détruite sur 100m, blocs arrachés, chantier du tunnel inondé, hangars et canalisations détruits) Bilan de la tempête à Bastia : 40 millions de francs
70	11/01/1977	Tempête sur toute la Corse (dégâts plus importants sur la côte Ouest) Bourrasque la nuit suivante à Bastia (description = courtes rafales comme coup de buttoir)
71	03/12/1976	plaine de la Marana inondée (voies d'accès coupées) - vent Force 12 enregistré à Poretta - navire Livourne-Bastia annulé
72	23/02/1973	Bateau de pêche pris dans tempête (large des Sanguinaires)
73	18/12/1968	Mer en furie Ajaccio paquet de mer sur la route des sanguinaires - Bastia touchée par des inondations (pluies)
74	25/09/1924	Violents orages, importants dégâts sur le vieux port
75	09/12/1924	Cyclone - accident : bateau coulé puis renfloué à l'entrée du vieux port

Illustration 2 - Connaissances disponibles sur le site pilote de la Plaine Orientale de la Haute-Corse en matière d'événement climatiques importants (sources BRGM, Rapport BRGM/RP-59046-FR Stéphanian, Balouin, Belon, Bodéré)

État des connaissances

Aléas côtiers

Échelle de temps historique 1937-2011

L'évolution historique du trait de côte a été étudiée à partir de photographies aériennes pour différentes dates (Belon *et al.* 2014). Les lignes de rivages pour chaque année ont été digitalisées et sont comparées entre elles par une analyse diachronique quantitative.

Le recul est considéré comme fort si les vitesses sont supérieures à 0.5 m/an, et modéré pour des vitesses comprises entre 0.1 et 0.5 m/an. La plage est considérée stable pour des vitesses d'avancée ou de recul de l'ordre de 0.1 m/an. L'avancée est modérée pour des vitesses comprises entre 0.1 et 0.5 m/an.

Un inventaire des événements a été ainsi réalisé à partir des informations bibliographiques recueillies après consultation des archives départementales et des différents organismes. Il ressort de cette analyse que les tempêtes qui ont des conséquences importantes sur le littoral et les infrastructures côtières sont relativement rares.

69 événements ont fait l'objet de publications de presse et ont ainsi été recensées depuis 1979.

Parmi ceux-ci les tempêtes de décembre 1979 et de novembre 2008 sont considérées comme les plus importantes et pour lesquelles le plus d'informations sont disponibles.

En octobre 2008, les dégâts occasionnés se sont surtout fait ressentir à Aléria dès le 26 octobre au niveau de l'embouchure du Tavignano. Les vagues ont attaqué la plage et mis en périls les installations touristiques sur le littoral (Camping de la Marina d'Aléria, restaurants du Bounty, etc...). France 3 Corse a consacré un reportage sur ces événements diffusé le 26 octobre (Illustration).



Illustration 3: Dégâts sur le littoral d'Aléria, le 26 octobre 2007 (France 3 Corse, journal régional, Corsica prima, du 26/10/2007, captures d'écran)

Les principaux dégâts concernent le bouleversement de la circulation en Plaine Orientale se sont produits avec l'invasion par les eaux de la route départementale au niveau de Ghisonaccia, une voiture ayant été emportée par un torrent d'eau.

Concernant le risque de submersion marine, aucun cas de submersion par rupture de digue et/ou de brèche dans le cordon lagunaire n'a été recensé. Les submersions qui se sont produites ont été causées par le franchissement de paquets de mer au-dessus du cordon littoral.

Enfin il est à noter que les tempêtes ayant affecté la plaine orientale ont fait presque exclusivement des dégâts matériels. Un seul cas de perte humaine a été recensé à Valle di Campoloro en juillet 1981.

Cette analyse a montré également que les informations précises sur les processus physiques des tempêtes (surcote) sont rares sur la partie orientale de la Corse. En effet, bien qu'une surcote atmosphérique soit associée de façon quasi systématique aux événements, l'absence de marégraphe sur le secteur est un gros handicap pour la détermination locale de celle-ci et pour permettre la distinction entre la surcote liée au vent et la surcote due à l'effet barométrique inverse. Un modèle numérique de surcote est toutefois disponible depuis 2008 à Météo-France.

Enjeux présents

Le trait de côte comporte de nombreux aménagements vulnérables, particulièrement avec des enjeux humains et économiques qui ont été mis en évidence notamment par le BRGM². On y trouve un réseau routier secondaire qui dessert notamment les plages très fréquentées en saison touristique, des établissements d'hébergement et particulièrement quatre campings très exposés, les graus des étangs de Diana et d'Urbino qui sont exploités pour la culture d'huîtres de moules et de poissons et enfin de nombreux restaurants de plage :

Conclusion

Représentativité transfrontalière du site

Le site de la Plaine Orientale de la Corse, entre Aleria et Ghisonaccia, par l'exposition des enjeux touristiques et environnementaux, par l'histoire de l'aléa et par la volonté partagée des acteurs

² **BRGM** – Rapport d'Activités de Service Public 2010

concernés d'initier une stratégie de gestion, constitue un site optimal pour la définition de méthodes intégrées et l'analyse des risques côtiers liés à la submersion marine.

La compréhension à l'échelle événementielle reste à analyser et la modélisation ainsi que la simulation permettront d'améliorer les connaissances sur les mécanismes de submersion sur un site très représentatif des plages du littoral de l'espace Maritimo sur un trait de côte représentatif de la morphologie retrouvée sur les différentes régions.

Cette modélisation hydrodynamique, qui sera réalisée à l'aide du modélisateur prévu par le SIS2B dans le projet MAREGOT, permettra de visualiser les submersions, leurs impacts sur les enjeux humains, stratégiques, touristiques et économiques en faisant varier les paramètres météorologiques.

De cette modélisation et de ces simulations pourront découler les mesures qu'il est nécessaire de mettre en place pour l'information, l'alerte et la protection des populations. Ces études permettront en outre la formation de l'ensemble des acteurs (services de secours, services de l'État, services de la Collectivité de Corse) mobilisés en cas d'événement climatique majeur au côté des maires.

Bibliographie

Stépanian A., Balouin Y., Bacon A., Bodéré G., Danger Y., Hennequin V., (2010). Atlas littoral de la Plaine Orientale de Corse. Rapport final. Rapport BRGM RP-59058-FR, 78 p., 13 ill., 28 planches.

Bélon R. et Bodéré G. (2016) – Réseau d'Observation du Littoral de la Corse. Rapport d'observations 2015. Rapport BRGM RP-66351-FR, 111 p., 66 ill.

Balouin, Y., Belon, R., Delvallée, E., Lamy, M. et Bodéré, G., 2011. ROL : Etude complémentaire sur l'impact des tempêtes sur le littoral de la Plaine Orientale de Corse. Cartographie de la submersion marine, de la sensibilité à l'érosion côtière et de l'exposition des enjeux. RP-59724-FR, 39p + volume cartographique

Palvadeau E., et Nay K.M. (2002). Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observation 2001. Rapport BRGM/RR-51503-FR. Orléans : BRGM, 89 p.

Stépanian A., Balouin Y., Bacon A., Bodéré G., Danger Y., Hennequin V., (2010). Atlas littoral de la plaine orientale de Corse. Rapport final. Rapport BRGM RP-59058-FR, 80 p., 13 ill., 28 planches.

Site-de Capo Altano (Sardaigne, Italie)

Présentation du site

Localisation

Capo Altano (sud-ouest de la Sardaigne) est situé dans la zone nord-ouest de la municipalité de Portoscuso. La zone d'étude comprend le secteur littoral qui s'étend sur environ 1 100 mètres et 700 mètres respectivement au nord-est et au sud de Capo Altano (Illustration 1).

La zone est cartographiée dans la feuille 555 section III - de la carte topographique de l'Italie à l'échelle 1/25.000 - Iglesias - et dans le document technique numérique régional de la région Sardaigne (CTR) 555130 - Portoscuso à l'échelle 1/10.000.



Illustration 2 – Le site pilote de Capo Altano, le secteur côtier étudié est celui inclus parmi les lignes jaunes. RAS Orthophoto 2013.

Caractéristiques Physiographiques-Écosystémiques

Le système côtier de Capo Altano délimite un territoire caractérisé par les formes liées aux produits de l'activité magmatique effusive du Miocène qui caractérise cette partie du Sulcis. La zone à l'étude se trouve dans le parc géo-minier historique et environnemental de Sardaigne.

Connaissances disponibles

Caractéristiques géologiques

La région de Capo Altano est caractérisée par la succession volcano-sédimentaire oligo-miocène du Groupe de Monte Sirai (Illustration 2) décrite dans la Fiche Géologique 564 - Carbonia (Pasci *et al.*, 2012) d'où sont tirées la plupart des descriptions de formations suivantes :

Unité de Lenzu LNZ (rhyolites-rhyodacites). Macroscopiquement assez uniformes, ces vulcanites soudées ont une structure porphyrique massive due à la présence de plagioclases et, de façon subordonnée, de pyroxènes. Les plagioclases turbidiques, dans les glomérules ou dans les grands individus tabulaires jumelés selon la loi de l'Albite, présentent généralement un schéma de zonage complexe. Le feldspath potassique tabulaire, généralement limpide et Karlsbad, présente des valeurs d'orthose relativement constantes et provoque souvent une réabsorption et incorpore des gouttes de verre volcanique. L'olivine, en cristaux de petites dimensions est reconnaissable seulement par la robe. Les pyroxènes se rencontrent dans des individus tabulaires rarement modifiés, de petite taille et souvent associés à des glomérules avec des plagioclases (Carmignani et alii, 2012). (Burdigalien supérieur).

Complexe d'Acqua sa Canna AQC (dacites). Cette formation correspond essentiellement au complexe Acqua Sa Canna d'Assorgia et alii (1990). Cela comprend à la fois les dépôts pyroclastiques soudés et non (généralement prédominants) et les dépôts épicalistiques. Les pyroclastites commencent par des dépôts de chute (tuf à lapilli) puissants d'environ 3 m et passent à un dépôt pyroclastique d'écoulement non soudé puissant d'environ 7-8 m. Le dépôt est constitué par matrice cinéritique blanchâtre ou rosâtre dans laquelle sont dispersées avec de la ponce jaunâtre taille maximale centimétrique, les cristaux millimétriques plagioclase, mafic clastes (pyroxène, biotite) et clastes lithiques centimétrique de lave. Sur le toit de la formation, il y a de nouveau un dépôt de pierre ponce à épaisseur métrique, suivi d'une pyroclastite non soudée. Au microscope, la ponce de pyroclastites présents Phénocristaux PI et mafiques subordonnés, y compris Bt, pyroxènes (août hypersthène et souvent modifié en phyllosilicates), et Ol Hbl. La texture est hypocristalline et porrophile vitroclastique, plus ou moins oblitérée par recristallisation secondaire. La composition est dacitica. Les âges radiométriques calculés avec la méthode 40K / 40Ar indiquent environ $16,6 \pm 0,8$ Ma (Cincotti *et al.*, 1994, Assorgia *et al.*, 1995). Les épaisseurs globales de cette formation sont variables : à partir de plus de 30 m (Su Narboni) elles sont réduites à moins de 1 m (P.ta Torretta, S de Sa Gruxita, etc.). Miocène inférieur (Burdigalien supérieur).

Unité Seruci SRC (rhyolites). La formation consiste en un dépôt de coulée pyroclastique (SRC) densément soudé, correspondant à l'unité Seruci d'Assorgia et al (1990), et de dépôts épicalistiques limités (SRCa). A la base de l'unité pyroclastique on observe, parfois, un niveau décimétrique de tuf avec des lapillis non soudés, fortement altérés. Le tuf est suivi, sans interposition de terre ou de matériaux retravaillés, d'un niveau vitrofirico d'épaisseur centimétrique à décimétrique, avec des cristaux de Plagioclase et lytiques. Au-dessus du niveau vitrofirique, le dépôt d'écoulement est densément soudé, avec une matrice de couleur marron à rougeâtre. Il existe également des clastes lithiques allant du millimétrique au centimétrique avec une concentration inférieure à 10% et des phénotypes et cristaux plus ou moins altérés de Pl. Il a une structure eutraxique, donnée par des flammes qui varient en cloques blanchâtres, avec des dimensions maximales allant du bas vers le haut (jusqu'à quelques décimètres). Dans la partie supérieure de l'unité pyroclastique, la taille des flammes diminue rapidement jusqu'à disparaître. Localement dans ces parties supérieures, la roche prend des couleurs gris-violet, montre un grain plus fin et un plus grand degré de soudure.

En coupe mince, la roche a une texture vitroclastique et eutasitique et est porphyrique pour Pl, Hbl, pyroxènes altérés. Ensuite, il y a des accessoires minéraux (Mag) et secondaires (Crs et Trd). Les flammes sont souvent dévitrifiées (cristallisation sphérolitique) et riches en minuscules cristallisations (Trd). La composition de la pyroclastite est riolitique. L'épaisseur maximale de l'entraînement complet est dans la zone de Su Narboni (environ 15 m) (Carmignani et alii, 2012). Miocène? Inférieur-? Moyen (? Burdigaliano superiore -? Langhiano).

Unité Monte Crobu CBU. Cette formation comprend les unités de Monte Crobu et Conca Is Angius d'Assorgia et alii (1990). Les dépôts pyroclastiques référés par ces auteurs à deux unités distinctes doivent être considérés comme produits par un seul événement volcanique. Le passage de l'un à l'autre s'effectue à la fois verticalement et latéralement à travers une variation progressive des caractéristiques de soudage et du contenu des clastes lithiques ; de plus, les paléosols ou les dépôts épicyclastiques n'ont jamais été détectés dans cet entraînement. Les rhyolites de Monte Crobu sont généralement attribuables à une unité d'écoulement pyroclastique principale. Cette formation comprend également des dépôts pyroclastiques tombent et non soudé écoulement d'épaisseur métrique, affleure sur le toit d'une manière discontinue (par ex. Des casiers M. et Corongiu Murvonis dans S. Antioco, Giba), et les dépôts ponces d'épaisseur décimètres à tomber base du flux principal.

L'épaisseur totale est généralement variable de quelques mètres à quelques dizaines de mètres ; localement, l'épaisseur peut être beaucoup plus élevée (plus de 100 m) en raison de la paléomorphologie vivante sur laquelle repose la formation (Carmignani et alii, 2012). Miocène? Inférieur? Moyen (? Burdigaliano superiore -? Langhiano).

Unités Nuraxi NUR (rhyolites). Cette formation correspond à l'unité Nuraxi d'Assorgia *et al.* (1990) et est également très commun à Sulcis. Il repose généralement sur un paléo-rostre d'épaisseur décimétrique, parfois rougie, formé aux dépens des rhéolites de Monte Crobu et, localement, également aux dépens des termes sous-jacents. La formation se compose principalement d'un dépôt d'écoulement pyroclastiques, avec des couleurs variables du gris bleu azuré violacé rouge, dense ou modérément soudé, qui dispose d'une quantité importante de cristaux et / ou des agrégats plurimillimétrici de feldspaths. Une caractéristique commune à l'ensemble de la formation est la foliation marquée, avec un espacement de centimètre au décimètre, que juste au-dessus du niveau basal de vitrofirico est plus dense (de millimètre en centimètre). A la base de la formation en général on trouve un dépôt de pierre ponce de chute d'épaisseur décimétrique, riche en cristaux libres. Le dépôt de coulée pyroclastique est presque toujours caractérisé par un niveau basofirique basal, modérément riche en cristaux, d'une épaisseur allant du décimétrique à la métrique. Au-dessus du vitrofiro basal apparaissent des flammes très allongées (structure paratassitique), généralement de dimensions décimétriques et de couleur gris clair, également riches en cristaux de feldspaths. Dans la partie supérieure, les cristaux simples et / ou agrégés augmentent en taille jusqu'à environ 5-6 mm. Au microscope, la texture est porphyrique pour Pl et Sa ; le composant femelle (pyroxène) est pauvre et caractérisé par une altération systématique. La composition est riolitique). De nouvelles déterminations radiométriques, réalisées avec la méthode $^{40}\text{Ar} / ^{40}\text{Ar}$ avec isochrone sur Sa, indiquent pour ces roches $15,8 \pm 0,2$ Ma.

Les épaisseurs, relativement constantes dans toute la zone d'affleurement, sont d'environ 20 m. Miocène moyen (Langhiano).

Dépôts Quaternaires. Les dépôts quaternaires affleurant dans la zone d'étude sont principalement du sable et du grès avec des débris subordonnés et des dépôts alluvionnaires du Pléistocène supérieur (Litofacies dans le Subsintema de Portoscuso - SINTEMA DI

PORTOVESME) et plus tard les coutres éluviaux et colluviaux de l'Holocène (Carmignani et alii, 2012).

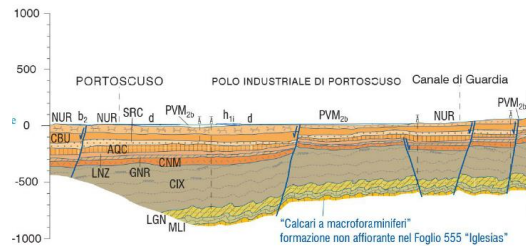
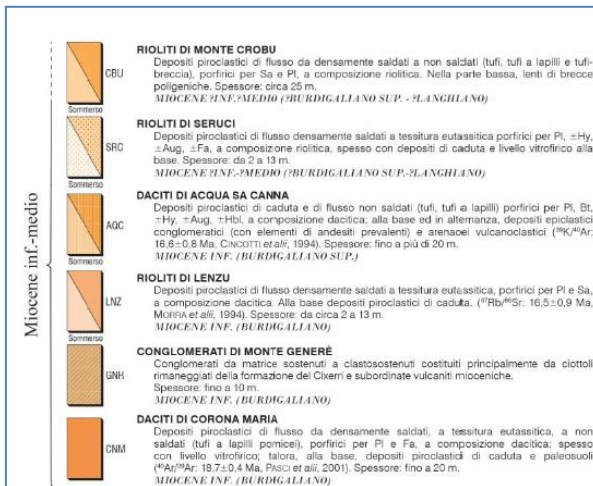
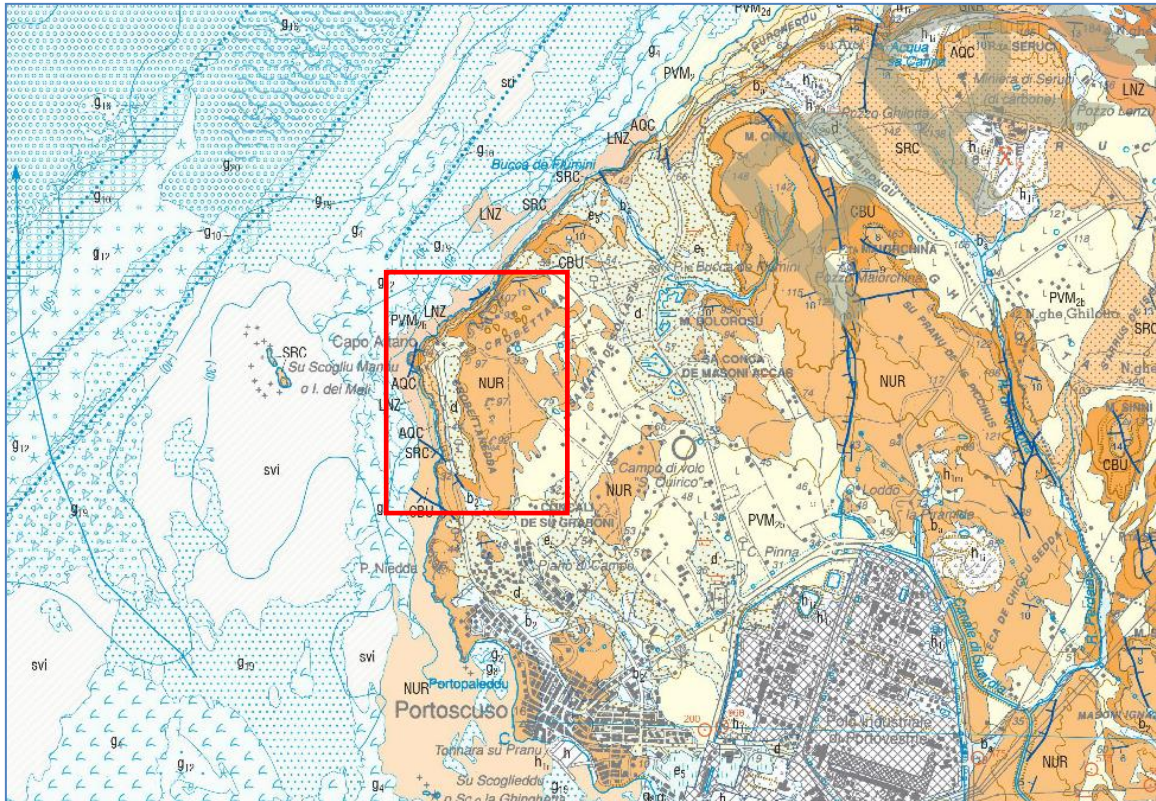


Illustration 3 – Extrait Carte géologique de l'Italie à l'échelle 1/50000-Feuille 555 - Iglesias. La zone côtière de Capo Altano, dominée par des falaises gravées sur des lithologies volcaniques, est particulièrement évidente.

Caractéristiques géomorphologiques

La géomorphologie du secteur côtier de Capo Altano est fortement influencée par les caractéristiques lithologiques, texturales et structurales des roches affleurantes et probablement par les récents mouvements tectoniques qui ont affecté cette partie de l'île.

Dans le secteur nord-est par rapport à Capo Altano, la ligne de côte se développe de manière sub-linéaire sur environ 1200 mètres et est modérément articulée ; les falaises atteignent une hauteur maximale de 52 mètres par mètre carré. (Illustration 3). Le profil en crête de ce secteur est faiblement étagé par l'érosion différentielle (Illustration 4 et Illustration 5). Des processus gravitaires

liés à des effondrements, des effondrements et des renversements et des cales qui donnent lieu à un dépôt de blocs au pied de la falaise aux dimensions de blocs très variables variant entre 1 m et 6 ÷ 7 mètres sont détectables dans tout le rocher. Bien qu'étant dans un contexte d'exposition maximale à l'action dynamique de la vague (ce secteur côtier est en fait exposé aux phénomènes météorologiques extrêmes des troisième et quatrième quadrants, avec l'un des plus grands *fetch* de la Méditerranée et avec des hauteurs de vagues conséquentes jusqu'à 9,5 mètres, Illustration 6), les dépôts de glissements de terrain peuvent être facilement détectés sur l'ensemble du secteur littoral de l'atelier; cet aspect peut être lié aux excellentes caractéristiques de résistance géomécanique de la masse rocheuse. Localement, sur la pente, les morphologies sont corrélées avec des processus accélérés de type érosion qui affectent les plus anciens dépôts de glissement de terrain. Dans la partie submergée il y a la présence d'une plate-forme d'abrasion avec une extension de zone réduite seulement dans la partie la plus proche de Capo Altano (Illustration 7) ; pour les autres secteurs, le dépôt effondré au pied de la falaise s'étend jusqu'à la bathymétrie de - 10 ÷ - 12 mètres de profondeur, jusqu'à la limite avec les sables du plateau continental interne.



Illustration 3 - Falaise au nord-ouest de Capo Altano. 1) Bord de falaise : 52 mètres au-dessus du niveau de la mer; 2) Niches de glissement de terrain d'effondrement et d'effondrement-renversement; 3) Les dépôts de glissement de terrain au pied de la falaise.



Illustration 4 - Falaise au nord-ouest de Capo Altano. 1) Les cils de la falaise ; 2) Niches de glissement de terrain d'effondrement et d'effondrement-renversement; 3) Les dépôts de glissement de terrain au pied de la falaise.

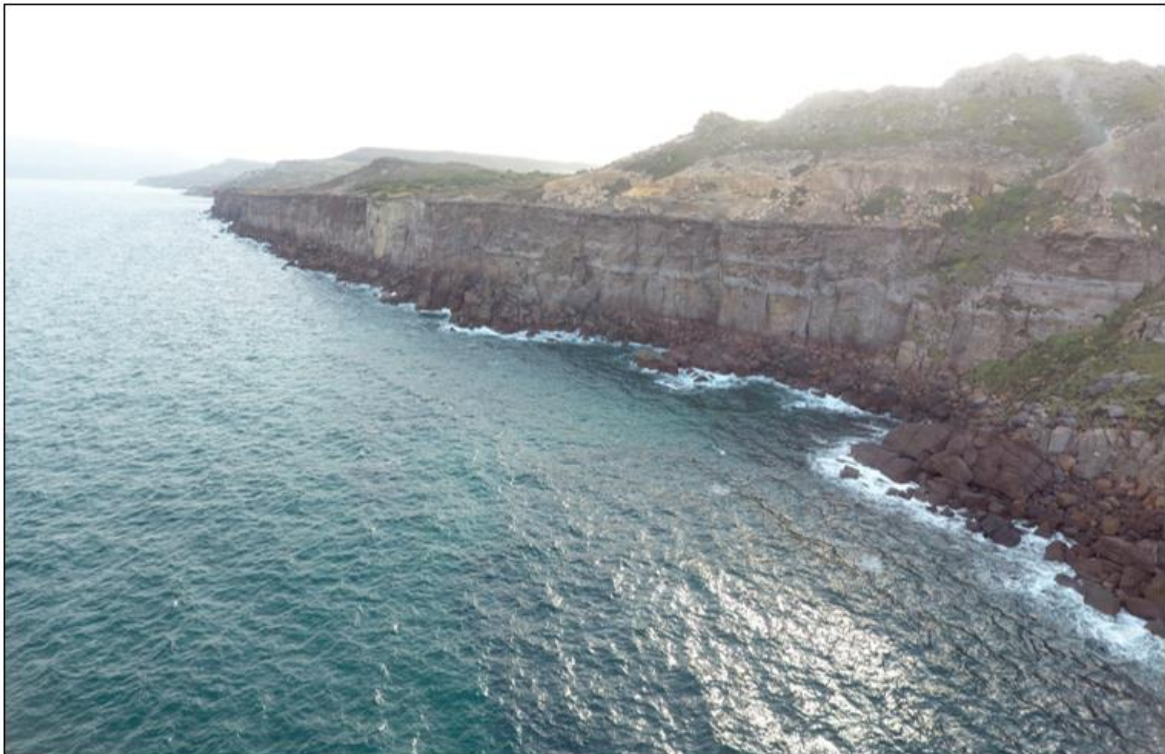
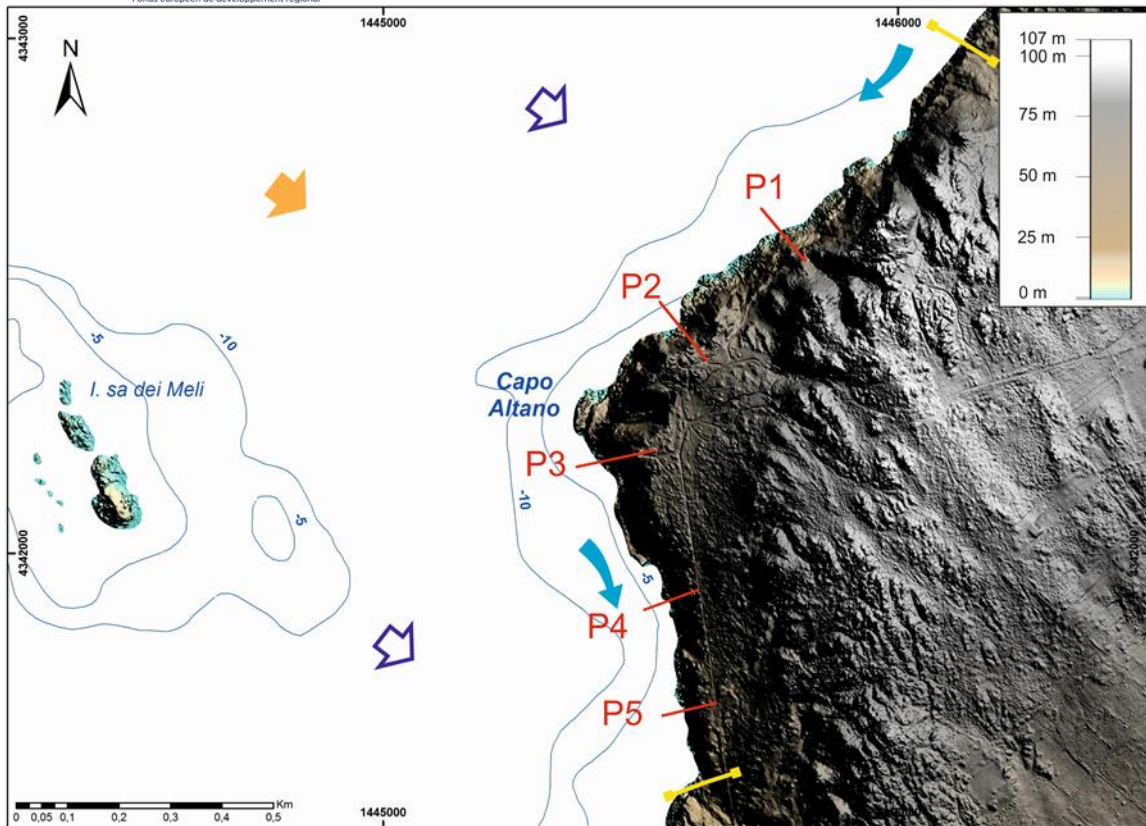


Illustration 5 - Falaise au nord-ouest de Capo Altano.



Profili topografici estratti dal DTM - RAS con passo cella 1 metro.

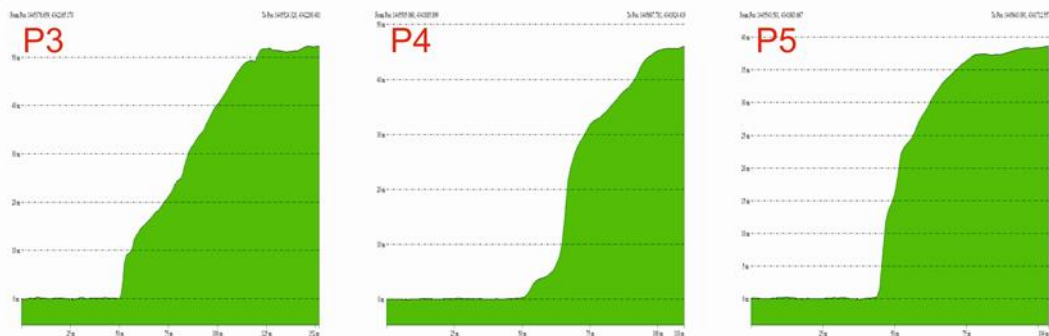


Illustration 6 - DTM - RAS avec un pas de 1 mètre dans la zone d'étude et les profils topographiques du rocher.

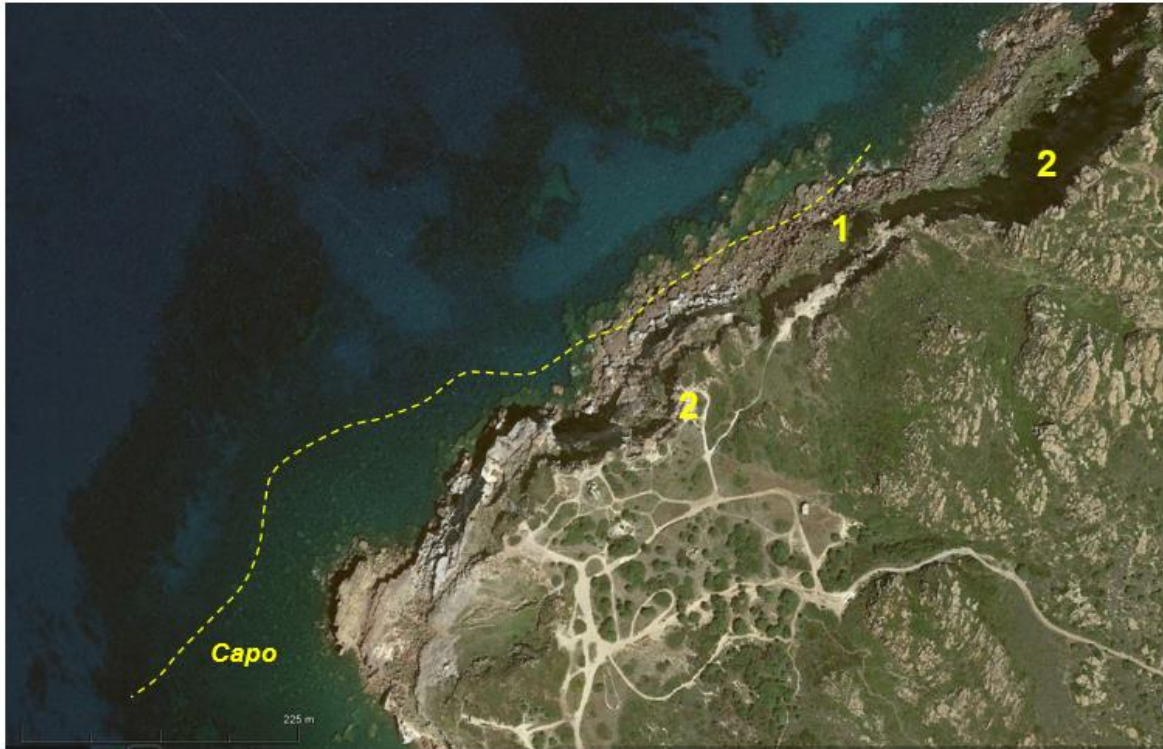


Illustration 7 - Falaise au nord-ouest de Capo Altano. 1) Plate-forme d'abrasion ; 2) Les dépôts de glissement de terrain au pied de la falaise. La ligne pointillée souligne l'étendue de la mer du dépôt effondré au pied de la falaise.

Les falaises au sud de Capo Altano atteignent une hauteur maximale de 32 m s.l.m (Illustration 8). Dans ce secteur également, les zones de falaises sont dominées par des zones étendues avec des processus gravitaires d'effondrement et d'effondrement-renversement (Illustration 9). Les dépôts relatifs de glissements de terrain au pied de la falaise sont principalement caractérisés par des blocs de vulcanites de dimensions comprises entre 2 ÷ 3 mètres et 6 ÷ 7 mètres (Illustration 10).

Le secteur immergé est caractérisé par la présence d'une vaste plate-forme d'abrasion qui s'étend jusqu'à environ -10 mètres de profondeur et, dans une moindre mesure, par les dépôts effondrés du pied de falaise (Illustration 11).

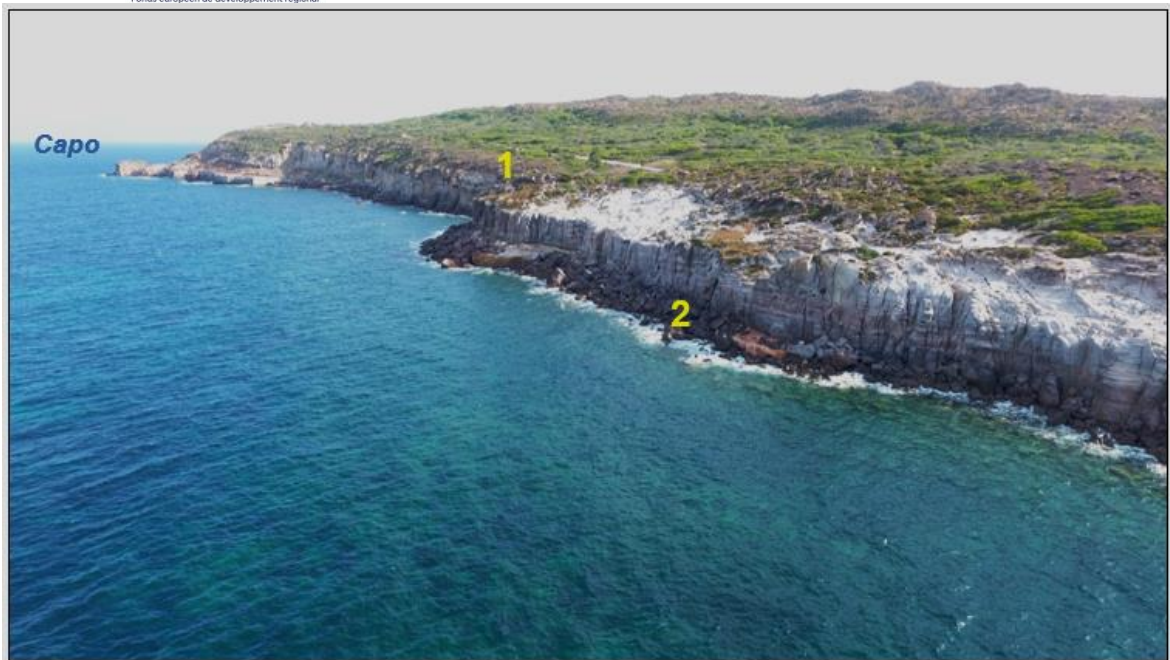


Illustration 8 - Zone côtière au sud de Capo Altano. 1) Bord de falaise, 2) Dépôts de glissement de terrain au pied de la falaise.



Illustration 9 - Zone côtière au sud de Capo Altano. 1) Bord de falaise, 2) Dépôts de glissement de terrain au pied de la falaise.



Illustration 10 - Zone côtière au sud de Capo Altano. 1) Bord de falaise, 2) Dépôts de glissement de terrain au pied de la falaise.

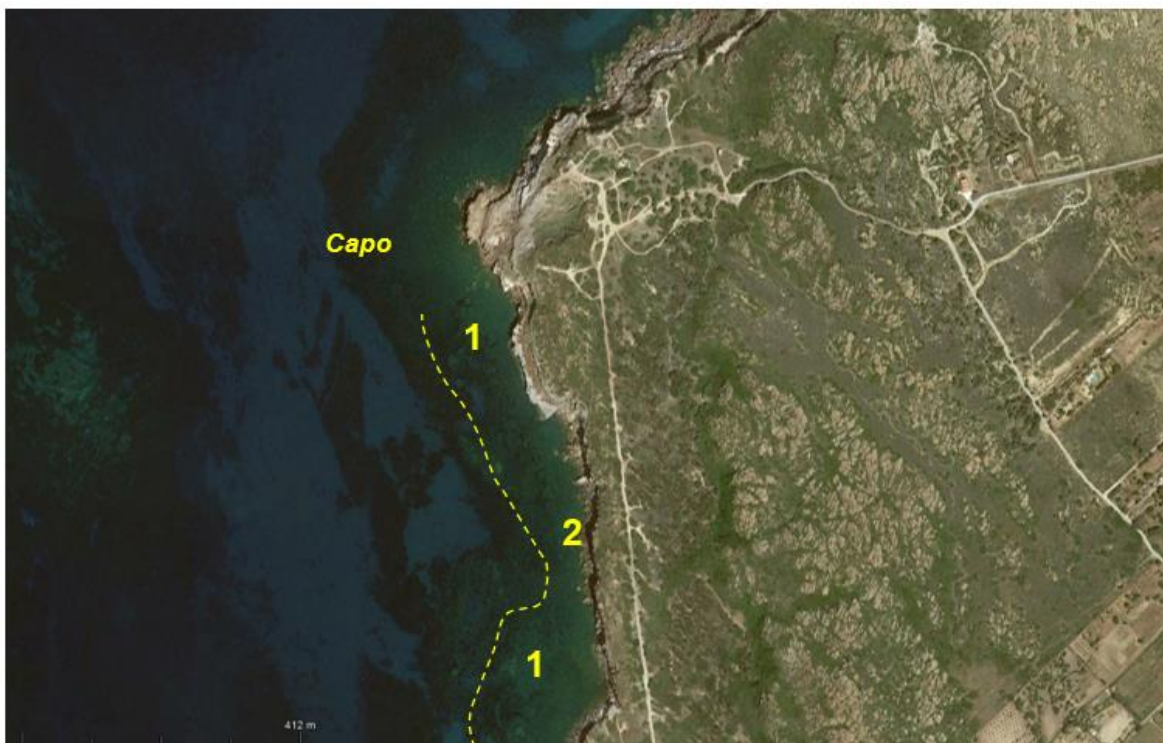


Illustration 11 - Falaise au sud de Capo Altano. 1) Plate-forme d'abrasion ; 2) Les dépôts de glissement de terrain au pied de la falaise. La ligne pointillée met en évidence l'étendue de la mer du dépôt d'effondrement au pied de la falaise.

[IFFI \(Inventaire des glissements de terrain en Italie\)](#)

Aucun point d'identification des phénomènes de glissement de terrain (PIFF) n'a été enregistré dans la zone d'étude.

PAI (Plan pour l'attitude hydrogéologique)

Les zonages identifiés dans le cadre de la P.A.I. délimitent les zones caractérisées par des éléments de danger hydrogéologique, dus à l'instabilité géomorphologique ou à des problèmes hydrauliques, sur lesquels sont appliquées les règles de sauvegarde contenues dans les Règles de mise en œuvre du Plan. Ces dernières s'appliquent également aux zones présentant des risques hydrogéologiques dont le périmètre provient d'études de compatibilité géologique-géotechnique et hydraulique, préparées conformément à l'article 8, paragraphe 2, des règles de mise en œuvre susmentionnées et représentées sur des couches d'informations spécifiques. La zone de Capo Altano est caractérisée par des risques de glissement de terrain très élevés (Hg4) (Illustration 12).

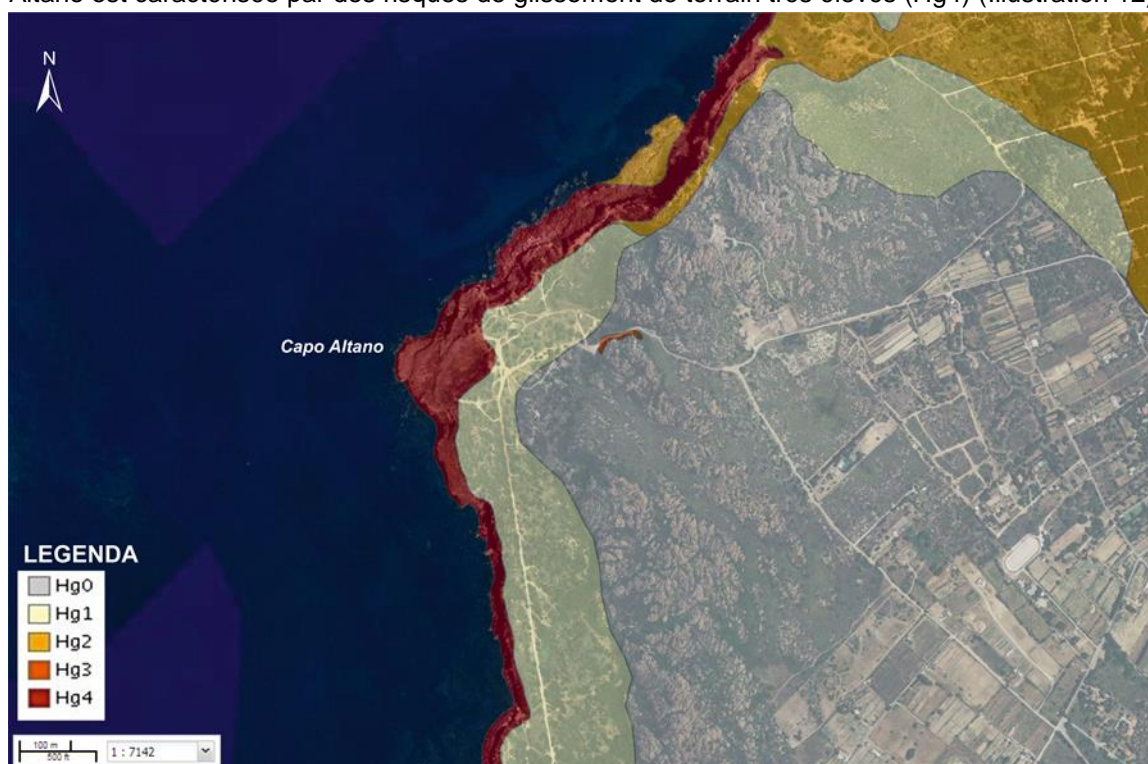


Illustration 12 - PAI-ART8C2 Zonage du Capo Altano.

PAC (Programme d'action côtière de Sardaigne 2013)

Dans le développement du Plan Côtier, le Conseil Régional a délibéré sur la rédaction d'un outil allégé afin d'identifier les lignes programmatiques pour les zones côtières avec une plus grande vulnérabilité d'instabilité et d'érosion et des lignes directrices intégrées d'application de gestion côtière. Le principal moteur de cette option a d'abord été favorisée par les besoins liés à la mise en œuvre de la ligne Opération 4.1.1b de la Sardaigne ROP FEDER 2007-2013 « protection des actifs, la prévention et la protection des zones côtières et le risque d'érosion côtière, l'échec, l'invasion de la mer et les interventions visant la gestion intégrée des zones côtières », une mesure financière qui, à bien des égards, a précédé un outil adéquat de planification propédeutique. Le programme Coste Action a créé la classification des zones côtières ayant la plus grande vulnérabilité géomorphologique-environnementale et posé les bases pour que les problèmes de protection, de protection et de défense des côtes s'inscrivent dans une approche globale de gestion côtière intégrée, à travers interventions organiques non seulement de nature structurelle mais aussi

avec un cadre réglementaire et de gestion. Dans le cadre de la PAC, un tronçon côtier très critique d'environ 1683 a été enregistré dans la municipalité de Portoscuso (Illustration 13).

INQUADRAMENTO 013 Su Scoglitteddu - Porto Paglia

Comune/i: Portoscuso - Gonnese

Data rilevamento: 02/05/2013

Lunghezza del tratto costiero di inquadramento [m]: 11250

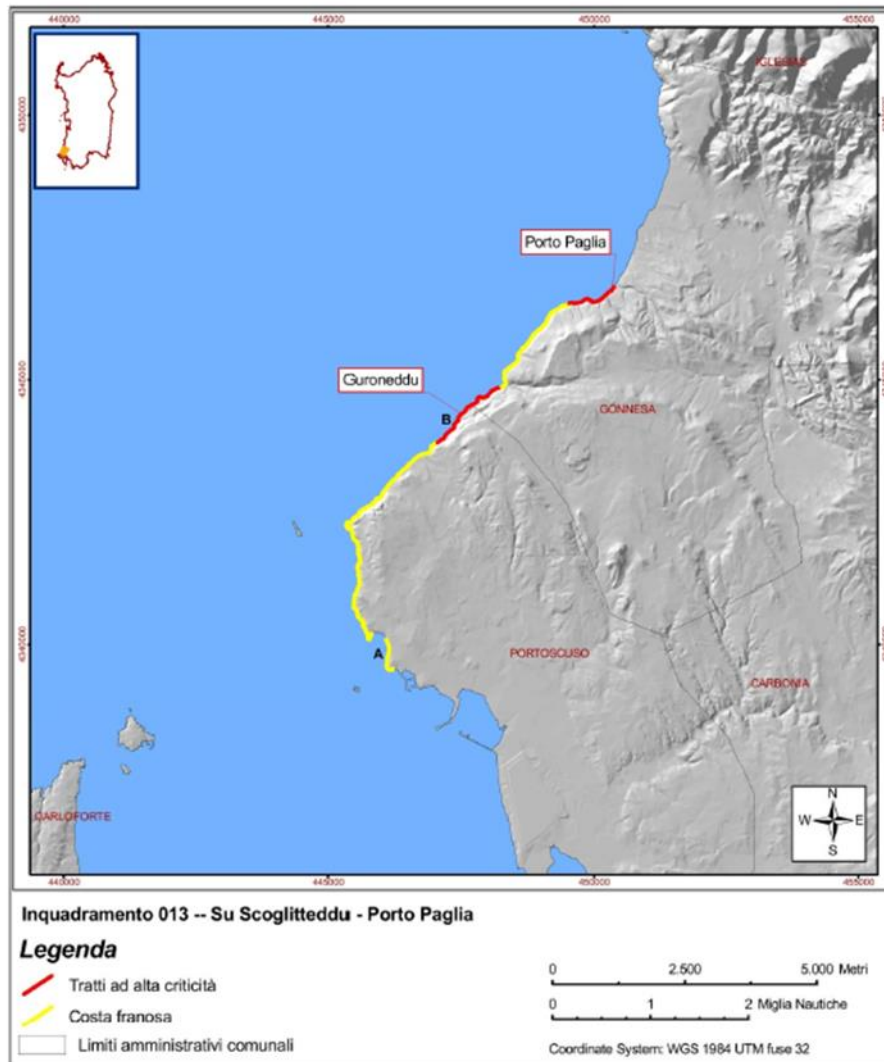


Illustration 13 - Classification des côtes dans le cadre du programme d'action sur les côtes - SRA de la zone d'étude, classification 013.

Données climatiques

Les données thermo-pluviométriques de référence se rapportent à la station météorologique d'Iglesias (Agence hydrographique) située à proximité de la zone d'étude ; il représente fidèlement les conditions climatiques générales du secteur. La série historique commence à partir de 1922 et arrive jusqu'à aujourd'hui.

Photos aériennes et images satellites

La région de Sardaigne met à disposition une série de photos historiques et de services WMS et TMS (Orthophotos et images satellites). Pour la zone d'étude il y a des photos historiques des années : 1968, 1977-78, 1998-99, 2003, 2006, 2008, 2010, 2013 (Illustration 14).

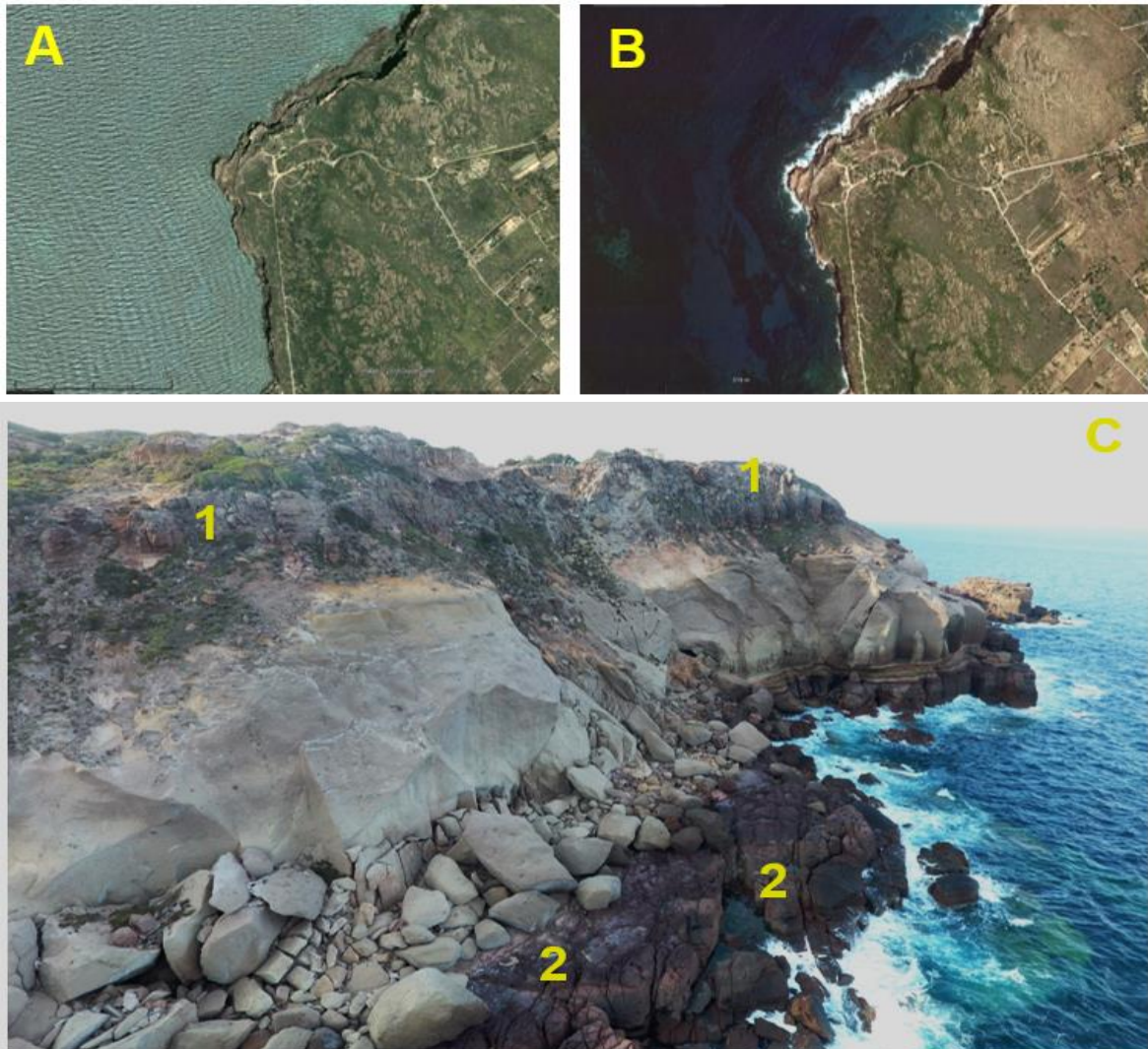


Illustration 14 - Analyse multi-temporelle sur une base orthophotographique des processus gravitaires. A) Orthophotos 2003 : les processus gravitaires sont quiescents ; B) Orthophotos 2017 : nouveaux dépôts de glissements de terrain pour la réactivation des processus d'effondrement gravitaire. C) Capo Altano : bord de la falaise ; 2- Réduire les dépôts de glissement de terrain et d'effondrement-retournement

Modèle numérique de terrain (DTM)

La région de Sardaigne met à disposition le DTM avec un pas de 1 mètre de cellules élaboré sur la base des acquisitions du LIDAR en 2008. Le DTM dispose d'une résolution adaptée à l'étude géologique et géomorphologique d'une vaste zone.

Carte géologique de l'Italie à l'échelle 1/50 000, feuille 555, Iglesias

La zone de Capo Altano se situe à l'intérieur de la feuille 555 "Iglesias" de la carte géologique de l'Italie, à l'échelle 1: 50.000 (Pasci *et al.*, 2012).

Aléas côtiers

Evolution du trait de côte

L'évolution morphogénétique du secteur littoral étudié semble être principalement représentée par une lente et progressive érosion rétrograde des falaises. Des processus gravitaires plus importants, tels que l'effondrement, l'effondrement et les rouleaux, qui constituent un élément de danger et représentent des conditions de risque occasionnelles, peuvent être déclenchés par la présence de gros blocs de vulcanites qui dépassent du sommet du mur. (ou niche de pente), en raison de la charge exercée par les blocs de vulcanites touchés par une facturation intense.

Plans de prévention

Malgré la tendance évolutive marquée à l'érosion et l'exposition importante au mouvement des vagues (l'un des plus grands fetch en Méditerranée avec des hauteurs de vagues jusqu'à 9,5 m), pour le secteur côtier en question, il n'existe actuellement aucun plan de prévention du danger côtier. À l'heure actuelle, le seul outil de planification disponible pour la région de Sardaigne, qui analyse les côtes côtières des hautes côtes, est le PAI qui définit l'étendue côtière en fonction des différents niveaux de danger. Le Programme d'Action Côtière (CAP) de la Région Sardaigne a également procédé à la classification des zones côtières présentant une plus grande vulnérabilité géomorphologique-environnementale. À l'avenir, il conviendrait de planifier des interventions structurelles visant à la délimitation temporaire de zones à haute vulnérabilité géomorphologique en attendant la construction de travaux visant à atténuer le danger dans les zones les plus fréquentées (plages et criques); dans les cas les plus extrêmes, il serait souhaitable d'interdire les zones les plus menacées. Une planification à moyen et long terme devrait garantir l'atteinte de niveaux de sécurité adaptés aux circonstances. L'aspect préventif des processus de défaillance peut se traduire par une augmentation du niveau de sécurité et une réduction des risques.

Conclusions

Rappel de problématiques du site

La structure morphostructurale et géomorphologique du tronçon côtier de Capo Altano et détermine un niveau élevé de danger pour les glissements de terrain ; l'ensemble du secteur côtier est dominé par la présence généralisée de processus d'effondrement gravitaire et de renversement par effondrement affectant le substrat rocheux aux vulcanites. Les principales causes d'amorçage, en plus d'être liées à l'arrangement géologique-structural de la masse rocheuse, sont liées aux conditions d'exposition des falaises au mouvement des vagues ; ce secteur côtier est en effet exposé aux phénomènes météorologiques extrêmes de secteur ouest.

Représentativité transfrontalière du site

L'analyse géologique-géomorphologique des falaises de Capo Altano, permet d'approfondir les connaissances sur les processus gravitaires qui affectent les zones de falaises sur les lithologies volcaniques (ignimbrites et coulées pyroclastiques) exposées à la dynamique des phénomènes météorologiques extrêmes et la corrélation avec les modèles hydrauliques mouvement d'onde basé sur des données expérimentales.

Bibliographie

Assorgia A., Balogh K., Lecca L., Ibba A., Porcu A., Secchi F.A. & Tilocca G. (1995) – *Volcanological characters and structural context of the Oligo-Miocene volcanic succession from Central Sardinia (Italy)*. In:

R. Polino & R. Sacchi (Eds.): Atti del Convegno "Rapporti Alpi Appennino", 14, Accademia Nazionale delle Scienze, Scritti e Documenti: 397-424, Roma.

Assorgia A., Fadda A., Gimeno D., Morra V., Ottelli L. & Secchi F.A. (1990) - *Le successioni ignimbriche terziarie del Sulcis (Sardegna sud-occidentale)*. Mem. Soc. Geol. It., 45: 951-963, Roma.

Carmignani L., Conti P., Funedda A., Oggiano G. & Pasci S. -2012 - *La geologia della Sardegna*. Geological Field Trips: 4,2.2, pp.104. doi: 10.3301/GFT.2012.04.

Cincotti F., Balogh K. & Assorgia A. (1994) - *Strongly explosive products, collapse column related, from Sulcis Area (SW Sardinia). Volcanological and K-Ar geochronological data and implications for structural evolution*. International Association of sedimentologists 15th Regional Meeting, 1-6, Ischia, Italy.

Pasci S., Carmignani L., Pisanu G., Sale V., Ulzega A., Pintus C. & Deiana G.- (2012) - *Note illustrative della Carta geologica d'Italia 1:50.000 "Foglio 564 - Carbonia"*, Servizio Geologico d'Italia, Roma.

Site-de Capo Mannu (Sardaigne, Italie)

Présentation du site

Localisation

Le site de Capo Mannu (centre-ouest de la Sardaigne) est situé dans la partie nord de la péninsule de Sinis qui, avec les îles voisines, a une superficie d'environ 170 kilomètres carrés et tombe administrativement dans la municipalité de San Vero Milis (OR). Cette zone comprend non seulement les falaises et les côtes sableuses, mais aussi les zones humides de Pauli Marigosa et Sa Salina Manna. La zone d'étude comprend la zone côtière qui s'étend sur environ 1400 mètres de la Torre di Capo Mannu (au nord) à Capo Mannu (au sud) (Illustration 1).

La zone est cartographiée dans la feuille 514 Section III - de la carte topographique de l'Italie à l'échelle 1/25.000 - Capo Mannu - et dans la carte technique numérique régional de la région Sardaigne (CTR) 514130 - Capo Mannu à l'échelle 1/10.000.



Illustration 1 - Emplacement de la zone d'étude de Capo Mannu- Orthophotographie RAS 2013

Caractéristiques Physiographiques-Écosystémiques

En raison de la particularité des caractéristiques naturelles, le promontoire de Capo Mannu est identifié comme un site d'importance communautaire S.I.C. "Stagno de Putzu Idu (Salina Manna et Pauli Marigosa)" (code ITB030038) et Oasis de protection de la faune "Capo Mannu" (Loi

régionale n ° 31/1989). Du plan de gestion du SIC *Stagno di Putzu Idu* (*Salina Manna* et *Pauli Marigosa*) (code ITB030038).

Les études réalisées dans le présent projet ont confirmé la présence de tous les 9 habitats présents dans la carte Natura 2000 et ont permis de vérifier la présence de 6 nouveaux habitats (2230, 2250 *, 5320, 5330, 6220 *, 9320). Globalement, les habitats vont de 9 à 15.

Les dunes du site sont affectées par la végétation annuelle attribuable à l'ordre *Malcolmietalia* (habitat 2230) et de plus la plupart des genévriers présents poussent sur les sables (habitat prioritaire 2250 *) plutôt que sur les autres substrats (habitat 5210). De nombreux habitats semi-naturels des régions les plus intérieures ont été négligés, comme les communautés herbacées (habitat 6220 *), les garrigues côtières de *Euphorbion pithusae* (habitat 5320), les arbustes de *Chamaerops humilis* (habitat 5330) et les formations olivier sauvage bien que très déstructuré (habitat 9320).

Les interprétations qualitatives présentes dans la liste des habitats de la carte Natura 2000 ne semblent pas partagées : nous voulons souligner que la représentativité ne doit pas être interprétée par rapport aux communautés ou aux habitats physiologiquement similaires, mais par rapport à des communautés similaires sur le plan syntaxique et écosystèmes insulaires. Par exemple, l'habitat prioritaire 1510* ne devrait pas être comparé aux prairies de *Limonium sp.*, mais avec ceux de l'association *Limonietum pseudolaeti-glomerati* diffusée uniquement dans le Sinis, qui représente donc le seul site mondial de cette communauté synendémique.

Connaissances disponibles

Caractéristiques géologiques

Les unités lithostratigraphiques dans la région de Sinis sont regroupées en :

- 1) succession volcano-sédimentaire Oligo-Miocène ;
- 2) succession volcano-sédimentaire Pliocène ;
- 3) Dépôts Quaternaires.

Dans la zone d'étude, au moins neuf complexes lithostratigraphiques peuvent être identifiés avec une signification paléogéographique et structurale différente représentée par les sédiments marins du Miocène inférieur -medio, du Miocène supérieur, du Pliocène inférieur, par des dépôts continentaux du Pliocène moyen, par des vulcanites du Pliocène supérieur, des dépôts marins du Pliocène supérieur, des dépôts continentaux du Pliocène supérieur, des dépôts de plages marines et des couvertures continentales du Pléistocène moyen-supérieur et, pour partie, de l'Holocène (Illustration 2 et Illustration 3).

Succession sédimentaire du Miocène Inférieur, Moyen et Moyen-Supérieur

Les termes marins sédimentaires attribués au Miocène Inférieur-Moyen, constitués de conglomérats polygéniques avec des clastes paléozoïques et vulcanites, sur lesquels des lentilles calcaires organogènes ont été superposées sur de grands *Ostreides* (Cherchi *et al.*, 1978 émergent sur le côté ouest de la *Costa Atzori*) grès conglomératique Richelement fossilifères, avec d'abondants éléments clastiques andésitiques de taille jusqu'à décimétrique, ont été récemment détectés en affleurement dans la localité de *Riu Maiore*, déposés en transgression sur les andésites et les tufs Oligo-Miocènes (Carboni *et al.*, 2002). Les pétoncles et les marnes arénacées, attribués au Tortonien sur la base du contenu de microfaunes (Cherchi *et al.*, 1978) émergent à *Serra Arous*.

Les microfaunes fossiles restaurées du Miocène inférieur et de l'Éocène trouvées dans les sédiments du Pliocène (Pecorini, 1972) témoignent d'une intense activité érosive dans la zone continentale sur une grande partie de la microplaque sarde, concomitante à la régression marine Messinienne intense connue dans le Méditerranée. Des faciès sédimentaires appartenant à une succession marine, transgressifs sur les unités terminales messiniennes ont été décrits, sur le promontoire de *Scau'e Sai* (Northern Sinis), par Cornee *et al.*, (2008). Sur la base de la position stratigraphique et surtout des analogies avec les associations faunistiques qui caractérisent la succession de *Capo San Marco* indiquée ci-dessus, ces Auteurs attribuent cette succession au Pliocène.

Succession continentale du Pliocène Moyen

Les sédiments continentaux du Pliocène Moyen sont représentés par des dépôts alluviaux qui peuvent être largement trouvés dans le secteur central du Sinis. Cette succession, localement puissante même d'une douzaine de mètres, est constituée de gravier et de microconglomères dans une matrice silico-argileuse fortement épaissie, avec des dépôts sableux fins d'épaisseurs métriques, des sables épais et des graviers en matrice sableuse fine. Ce sont des dépôts parfois organisés en niveaux mais plus généralement dans un arrangement chaotique, avec des variations locales différentes. L'abondante teneur en clastiques est principalement constituée de quartz et de roches métamorphiques, avec un haut degré de transformation. La matrice montre partout des caractères d'altération intense mis en évidence par le rougissement intense ; souvent la présence de nodules ferreux est observée. Le complexe, qui repose sur un support discordant sur le calcaire de la succession messinienne, a été déposé devant les basaltes qui constituent le "plateau" des Sinis (Carboni & Lecca, 1995).

Volcanites du Pliocène

Des coulées de lave basaltique, blanchie et scoriacée sont représentées, recouvrant divers lambeaux d'un paléo-plateau de Sinis et une structure de col, avec des affleurements laccolytiques, constitués localement de basalte en faciès de dolérite à structure colonnaire. Les basaltes constituent également la couverture supérieure du promontoire de Capo San Marco. L'épaisseur de ces vulcanites, qui recouvrent les sédiments continentaux argileux-quartziques du Pliocène, est variable, atteignant au maximum environ 10 mètres ; les dates radiométriques estiment l'âge à $3,12 \pm 0,19$ MA (Montigny *et al.*, 1981).

Formation de Capo Mannu

Sur les dépôts à faciès de vent de la séquence de calcaires de *Mandriola* repose également une succession de vent qui constitue la formation de Capo Mannu. Cela représente un corps de sable carbonate de l'épaisseur d'affleurement maximum de 50 mètres, constitué de la superposition de quatre unités principales de dunes latéralement en continu et de trois autres unités discontinues, séparées par des dépôts minces éoliens, à partir du lenticulaire de développement, contenant parfois des restes de mammifères. Les principales unités de dunes, qui dans certains cas atteignent une épaisseur moyenne de 6-9 mètres, présentent de nombreuses sous-unités de rang inférieur. Le contenu lytique de l'ensemble du complexe et principalement représentés par une fraction de la nature de carbonate biogénique et en variante, dans certaines sous-unités, par une fraction terrigène quartz-lytique. Les dépôts Eoliennes lentiform, généralement fortement rougie, montrent un squelette homogène textural, composé presque exclusivement de sable fin et quartz représentent des épisodes de remobilisation des éléments plus fins des corps des dunes principales, en bas régime de l'énergie éolienne. Sur la base de comparaisons avec d'autres situations stratigraphiques dans le contexte régional (Pecorini *et al.*, 1974) et sur la base interprétative de la stratigraphie cyclique climatique, ainsi que de la teneur faunique (Carboni &

Lecca, 1995, Abbazzi *et al.* 2008), cette formation a été attribuée au Pliocène Supérieur, sans exclure pour sa partie supérieure l'appartenance au Pléistocène Inférieur.

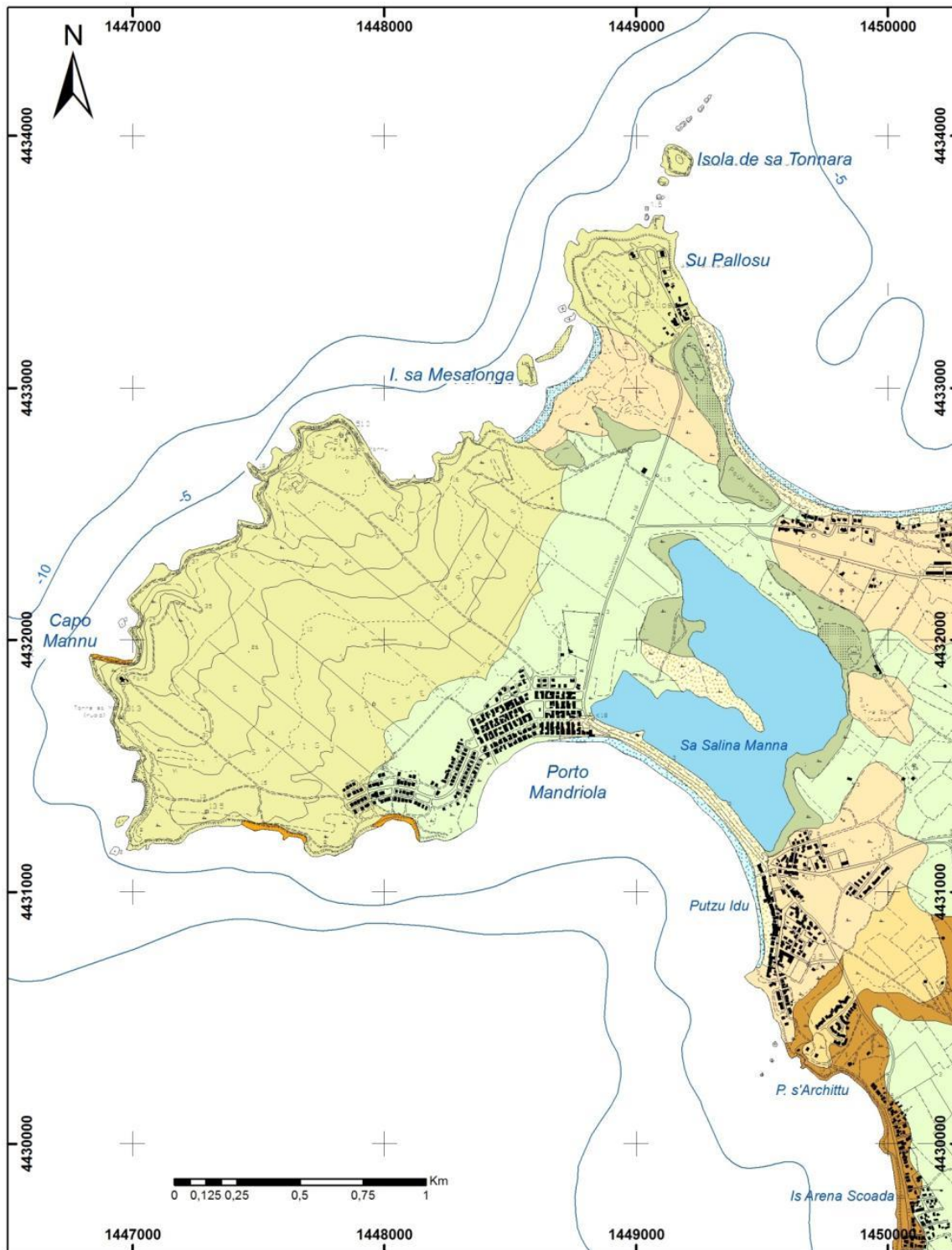


Illustration 2 - Extrait Carte géologique de l'échelle de la Sardaigne 1/25000, RAS.



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional

Legenda

- Laguna
- Coltri eluvio-colluviali. Detriti immersi in matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica. OLOCENE
- Depositi palustri. Limi ed argille limose talvolta ciottolose, fanghi torbosi con frammenti di molluschi. OLOCENE
- Depositi lacustri. Calcari lacustri talvolta con gasteropodi polmonati. OLOCENE
- Depositi eolici. Sabbie di duna ben classate. OLOCENE
- Depositi di spiaggia. Sabbie e ghiaie, talvolta con molluschi, etc. OLOCENE
- Depositi di spiaggia antichi. Sabbie, arenarie, calciruditi, ghiaie con bivalvi, gasteropodi, con subordinati depositi sabbioso-limosi e calcilutiti di stagno costiero. Spessore: fino a 3-4 m. ?PLEISTOCENE SUP. - ?OLOCENE
- Litofacies nel Subintema di Portoscuso (SINTEMA DI PORTOVESME). Sabbie e arenarie eoliche con subordinati detriti e depositi alluvionali. PLEISTOCENE SUP.
- Subintema di Calamosca (Panchina Tirreniana Auct.) (SINTEMA DI PORTOVESME). Conglomerati e arenarie litorali a cemento carbonatico, con malacofauna a molluschi (*Strombus bubonius*) e coralli (*Cladocora coespitosa*). PLEISTOCENE SUP.
- FORMAZIONE DI CAPO MANNU. Arenarie eoliche con paleosuoli intercalati ricchi in resti di vertebrati e microfossili rimaneggiati. PLEISTOCENE SUP.
- CALCARI DI TORRE DEL SEVO. Calcari e calcari dolomitici residuali, generalmente brecciati; biocalcarenti fossilifere con bivalvi. MESSINIANO
- CALCARI LAMINATI DEL SINIS. Calcari microcristallini e mame calcaree, con rari fossili di bivalvi. MESSINIANO
- FORMAZIONE DI CAPO SAN MARCO. Siltiti argillose e arenacee, calcari bioermali a *Cardidae*, *Mytilidae*, foraminiferi planctonici (*Globorotalia acostaensis*). MESSINIANO INF.
- CALCARI DI VILLAGRECA. Calcari bioclastici e biocostruiti (bioherme a coralli -*Porites*- e briozoi, e biostromi ad alghe -*Lithothamnium*- e molluschi -*Ostrea edulis lamellosa*-). AQUITANIANO INF.

Illustration 3 - Légende de la carte géologique

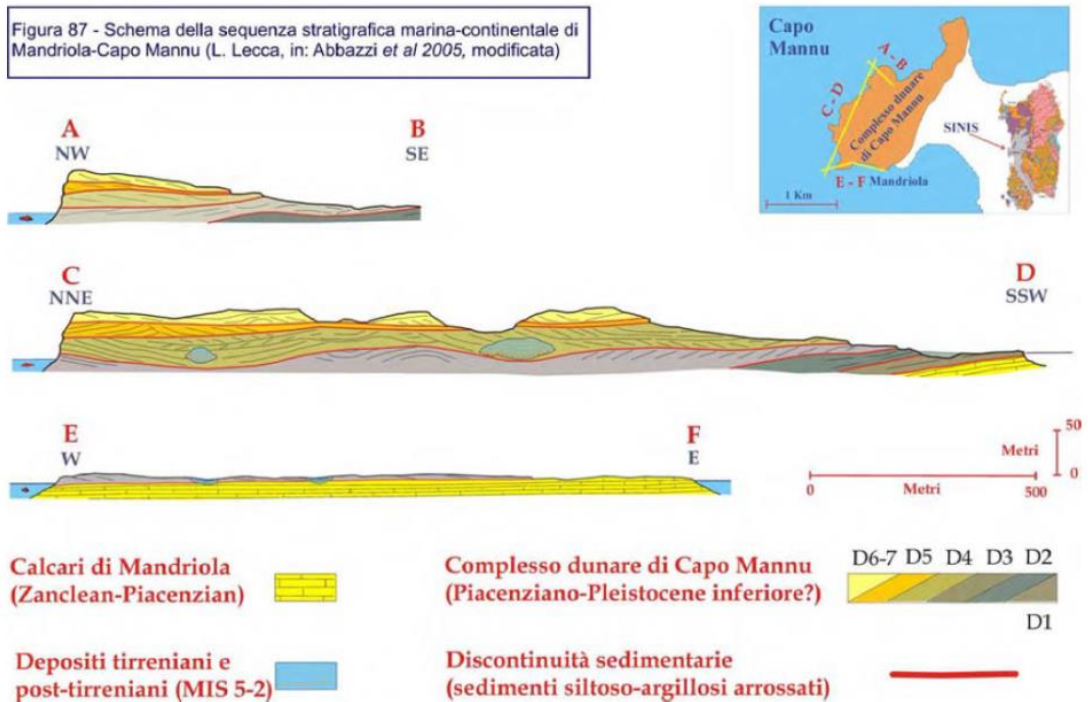


Illustration 4 - Schéma de la séquence stratigraphique marine-continentale de Mandriola-Capo Mannu (Lecca *et al.*, 2010).

Sédiments marins et coquilles continentales du Quaternaire

Les dépôts quaternaires sont représentés dans le Sinis par des sédiments marins et continentaux du Pléistocène supérieur moyen et de l'Holocène.

Dépôts Pléistocènes

Les dépôts dans les faciès marins côtiers et de la plage de Pléistocène, qui témoignent de la phase de dépôt en alternance associées à phase 5 de l'échelle des isotopes d'oxygène (Shackleton, 1987) représentent les produits de la sédimentation des *shoreface* et plage (il est apparu plage plus profonde, affectée par la houle Tyrrhénienne) et sont constituées essentiellement de grès, grès conglomératiques et conglomérats fossilifères, avec la fraction lytique détritiques constituée par du quartz, métamorphiques et volcanites rarement. Ces dépôts, qui émergent à des altitudes comprises entre 0 et 8 mètres sur le niveau actuel de la mer, affectant de nombreuses parties de la bande côtière, même avec rétro-plage shell étendue et dune ; ils sont également représentés dans les faciès de lagon et mer protégés dans les zones les plus internes et plats du Sinis, où ont été trouvés dans les enquêtes, à une profondeur de 7 à 10 mètres du niveau du sol (Tegas et Carboni 2000). Les différentes générations de grès de faciès de vent diversement rougie, marais faiblement cimenté limons, à gastéropodes pulmonate, l'évaporation de l'encrassement carbonate et encrassement de carbonates d'origine pédogénétiques intercalés représentent les processus de sédimentation dans la zone continentale les revendiquées, aussi de façon intermittente, entre le Pléistocène supérieur et l'Holocène.

Dépôts Holocènes

Les dépôts holocènes sont constitués de sédiments de plage, principalement sablo-graveleux, presque exclusivement de quartz dans les zones côtières du sud et du centre, fortement bioclastiques dans le nord et de larges cordons de plage arrière. La sédimentation des limons carbonatés à l'intérieur des terres en milieu marécageux ou seulement morphologiquement déprimé, les dépôts de pente avec des éléments basaltiques sur les pentes les plus abruptes, le vaste champ de dunes de las Arenas dans le secteur nord complète le contexte géologique de l'ensemble Sinis.

Caractéristiques Géomorphologiques

La zone côtière entre la Torre di Capo Mannu (au nord) et Capo Mannu (au sud) est dominée par un morphotype avec de hautes côtes rocheuses ; en particulier les falaises sont gravées sur la formation de Capo Mannu: grès sub-horizontal en forme de vent avec des paléosuoles entrelacées riches en restes de vertébrés et microfossiles remixés du Pliocène supérieur.

L'analyse géomorphologique permet de distinguer au moins deux secteurs :

Torre di Capo Mannu: c'est une zone dans laquelle la falaise est sub-verticale, parfois en porte-à-faux, qui atteint une hauteur maximale de 50 mètres et est exposée au nord-est (Illustration 5 et Illustration 6). Les niches de détachement qui peuvent être corrélées avec les processus gravitaires d'effondrement et d'effondrement-renversement sont évidents sur l'ensemble du rocher ; au pied de la falaise, il y a des blocs de dimensions variables entre 1 et 3 mètres. La présence réduite de gisements au pied de la falaise peut être corrélée à une action érosive intense par le mouvement des vagues lors d'événements météorologiques marins exceptionnels, et aux rares propriétés géomécaniques des lithotypes qui caractérisent ce secteur rocheux (Illustration 7).

La partie submergée est caractérisée par la présence d'une plate-forme d'abrasion, détectable jusqu'à une profondeur d'environ -3 mètres, qui conserve, avec les morphotypes typiques des formes d'érosion à la base des falaises telles que canaux, nids de poule, etc. les morphologies

caractéristiques de l'altération subaérienne (averses, lapiez, siphons) et riveraine (reliefs fongiformes, plateaux) (Forti S. & Orrù P., 1995).



Illustration 5- Falaise à la Torre di Capo Mannu. 1) Bord de la falaise : 50 mètres au-dessus du niveau de la mer; 2) Niches de glissement de terrain d'effondrement et d'effondrement-renversement; 3) Les dépôts de glissement de terrain au pied de la falaise; 4) plate-forme d'abrasion marine.



Illustration 7 - Falaise à la Torre di Capo Mannu. 1) Bord de la falaise : 50 mètres au-dessus du niveau de la mer; 2) Niches de glissement de terrain d'effondrement et d'effondrement-

renversement; 3) Les dépôts de glissement de terrain au pied de la falaise; 4) plate-forme d'abrasion marine.

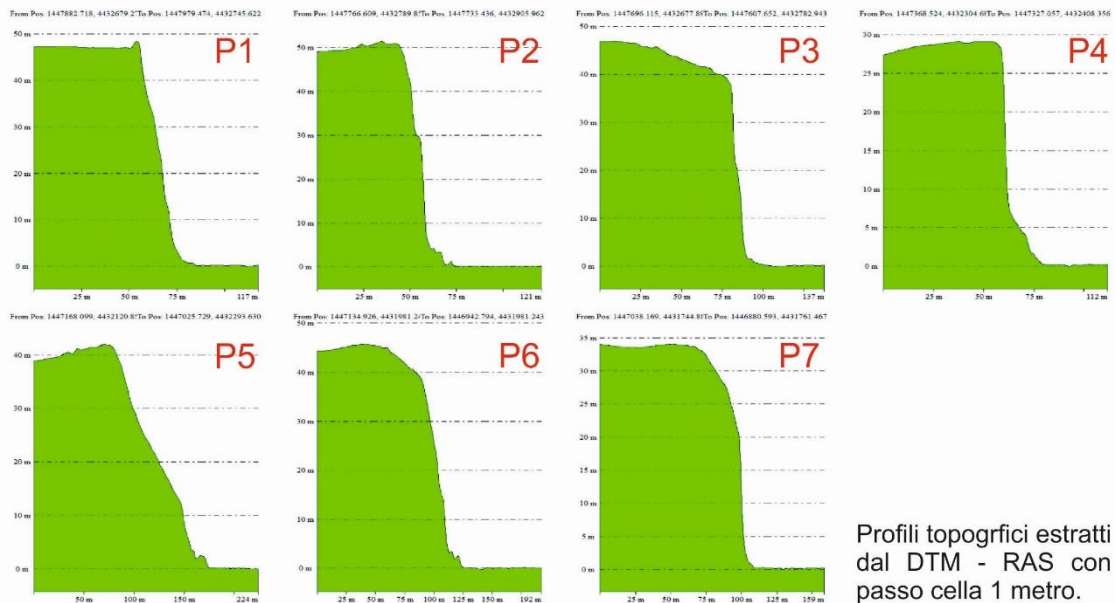
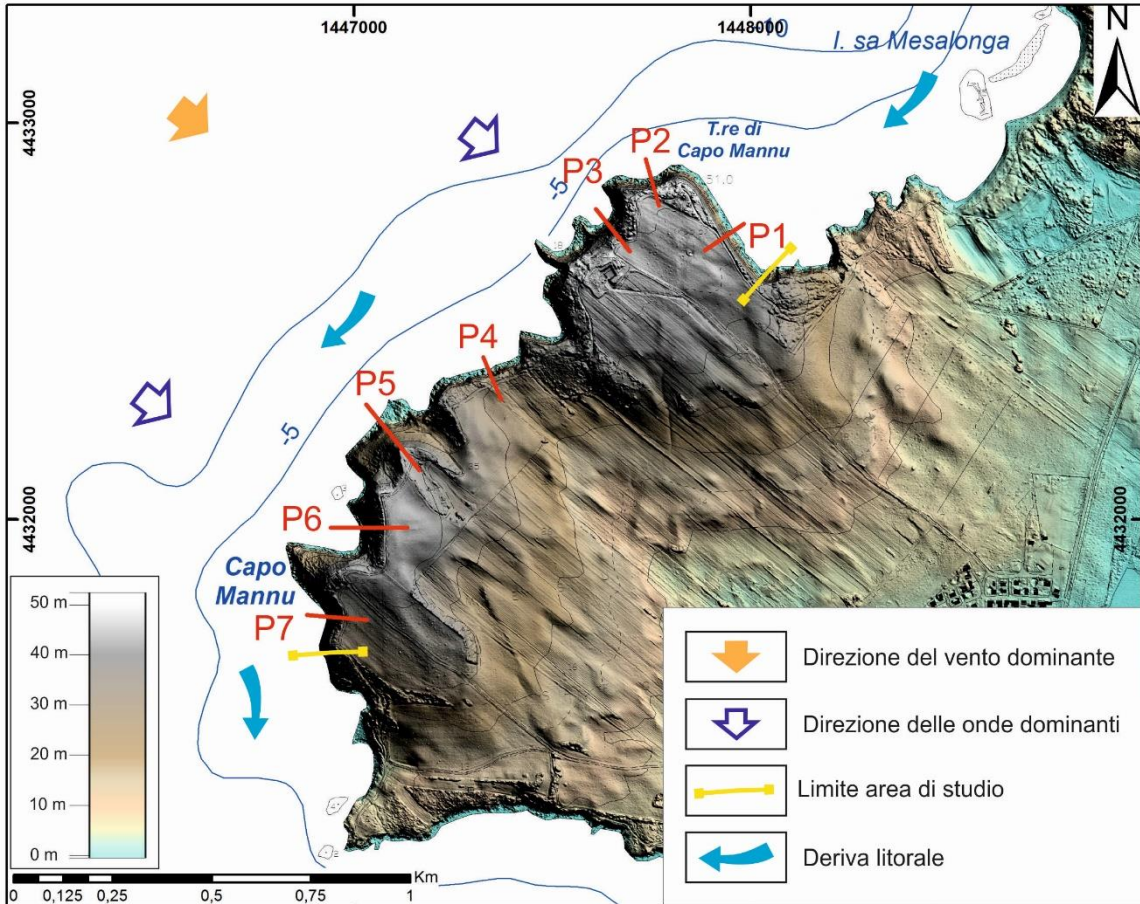


Illustration 6 - DTM - RAS avec un pas de 1 mètre dans la zone d'étude et les profils topographiques des roches.

Falaise entre *Torre di Capo Mannu* et *Capo Mannu*: s'étend sur environ 1300 mètres et se caractérise par des falaises avec exposition nord-ouest, avec inclinaison variable de la verticale à environ $55^\circ \div 60^\circ$ et hauteur du bord entre 42 et 32 mètres. La morphologie de la côte est articulée par l'alternance de petites baies et de promontoires gravés sur les grès (Illustration 8).

Aussi pour ce secteur les zones de falaises sont dominées par de vastes zones avec des processus gravitaires d'effondrement et d'effondrement-renversement. Les dépôts relatifs de glissement de terrain au pied de la falaise sont principalement caractérisés par des blocs de grès de dimensions comprises entre 2 ÷ 3 mètres et 6 ÷ 7 mètres (Illustration 9). Dans la partie submergée, il y a une plate-forme d'abrasion qui atteint l'extension de zone maximale près du promontoire de Capo Mannu.



Illustration 8 - Zone côtière entre *Torre di Capo Mannu* et *Capo Mannu* dominée par l'alternance de baies et de promontoires.



Illustration 9 - Zone côtière entre *Torre di Capo Mannu* et *Capo Mannu*; en évidence, l'effondrement se dépose à la base des rochers.

IFFI (Inventaire des glissements de terrain en Italie)

Sur le territoire régional (région de Sardaigne), 1 523 glissements de terrain ont été enregistrés, informatisés dans les glissements de terrain de la base de données (DBfrane) par cartographie. Dans la région de Sinis, un seul point d'identification des Phénomènes de glissements (PIFF) a été enregistré ; c'est un PIFF de troisième niveau. Les principaux types de glissements de terrain étudiés sont associés à des cinématiques complexes (Illustration 10).

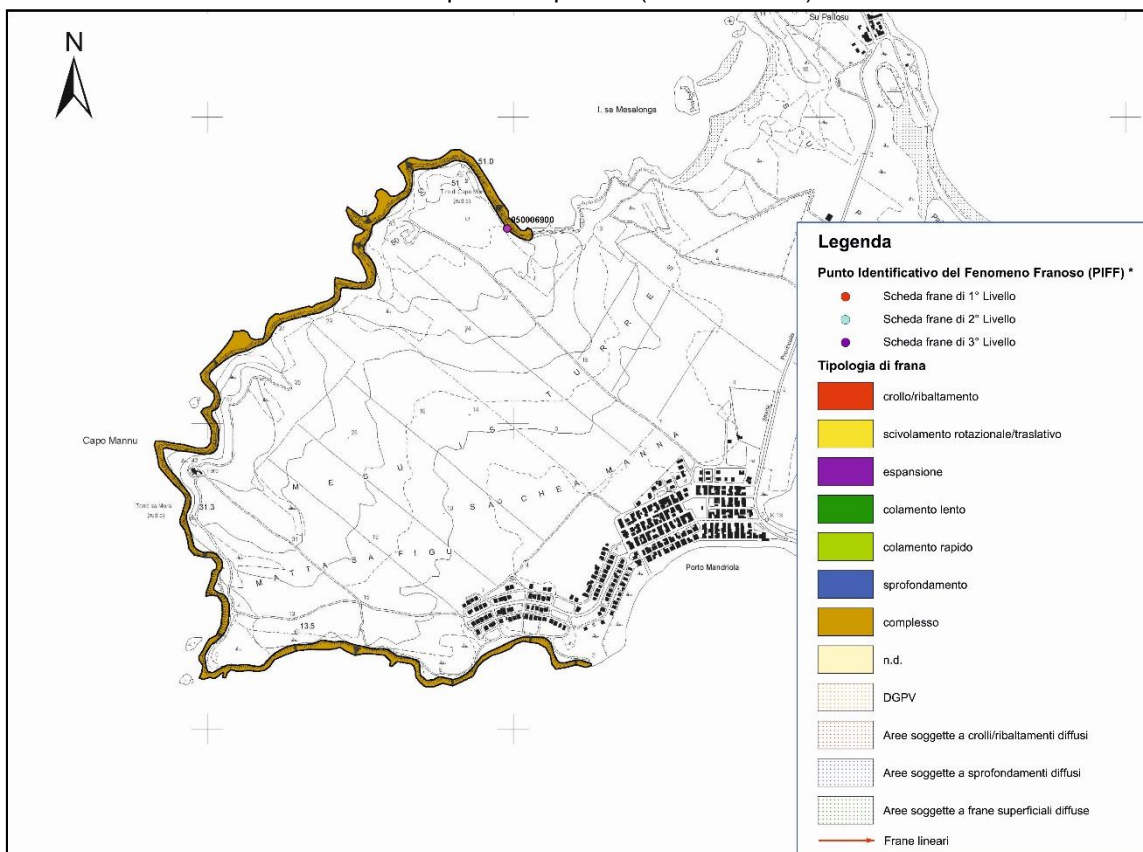


Illustration 10 - Carte d'inventaire des glissements de terrain en Sardaigne C.T.R. No 514-030.

PAI (Plan pour l'attitude hydrogéologique)

Les périmètres identifiés dans le cadre de la P.A.I. pour délimiter les zones caractérisées par des éléments de danger hydrogéologique, dus à l'instabilité géomorphologique ou à des problèmes hydrauliques, sur lesquels sont appliquées les règles de sauvegarde contenues dans les Règles de mise en œuvre du Plan.

Ces dernières s'appliquent également aux zones présentant des risques hydrogéologiques dont le périmètre provient d'études de compatibilité géologique-géotechnique et hydraulique, préparées conformément à l'article 8, paragraphe 2, des règles de mise en œuvre susmentionnées et représentées sur des couches d'informations spécifiques. La région de Sinis, y compris Isola sa *Mesalonga* et Capo Mannu, est caractérisée par des risques élevés de glissement de terrain (Hg3) (Illustration 12).



Illustration 12 - PAI-ART8C - Périmétration du Capo Mannu.

PAC (Programme d'action côtière de Sardaigne 2013)

Dans le développement du Plan Côtier, le Conseil Régional a délibéré sur la rédaction d'un outil allégé afin d'identifier les lignes programmatiques pour les zones côtières avec une plus grande vulnérabilité d'instabilité et d'érosion et des lignes directrices intégrées d'application de gestion côtière. Le principal moteur de cette option a d'abord été favorisée par les besoins liés à la mise en œuvre de la ligne Opération 4.1.1b de la Sardaigne POR FESR 2007-2013 (protection des actifs, la prévention et la protection des zones côtières et le risque d'érosion côtière, l'échec, l'invasion de la mer et les interventions visant la gestion intégrée des zones côtières), une mesure financière qui, à bien des égards, a précédé un outil adéquat de planification propédeutique. Le programme Coste Action a créé la classification des zones côtières ayant la plus grande vulnérabilité géomorphologique-environnementale et posé les bases pour que les problèmes de protection, de protection et de défense des côtes s'inscrivent dans une approche globale de gestion côtière intégrée, à travers interventions organiques non seulement de nature structurelle mais aussi avec un cadre réglementaire et de gestion.

Le secteur côtier du territoire municipal de San Vero Milis a également été inclus dans la PAC ; un tronçon côtier très critique de 2 839 mètres de longueur a été identifié, qui s'étend de la Torre di Scala 'et Sale (au nord) jusqu'à Punta S'Incodina (Illustration 12).

Tableau 1 - Extrait du tableau récapitulatif des données significatives par municipalité - de l'action du programme sur les côtes - Région de la Sardaigne).

Comune	Sviluppo costiero comun. [m]	n° tratti franosi	Sviluppo tratti franosi [m]	% costa franosa	n° tratti ad alta criticità	Toponimi tratti alta criticità	Sviluppo tratti alta criticità [m]
SAN VERO MILIS	21.786	5	11.354	52%	8	Punta S'Incodina; S'Arena Scoada - S'Archittu; S'Arena Scoada; Mandriola; Torre di Capo Mannu ; Torre Sa Mora; Torre di Scala 'e Sale; Su Pallosu	2.839

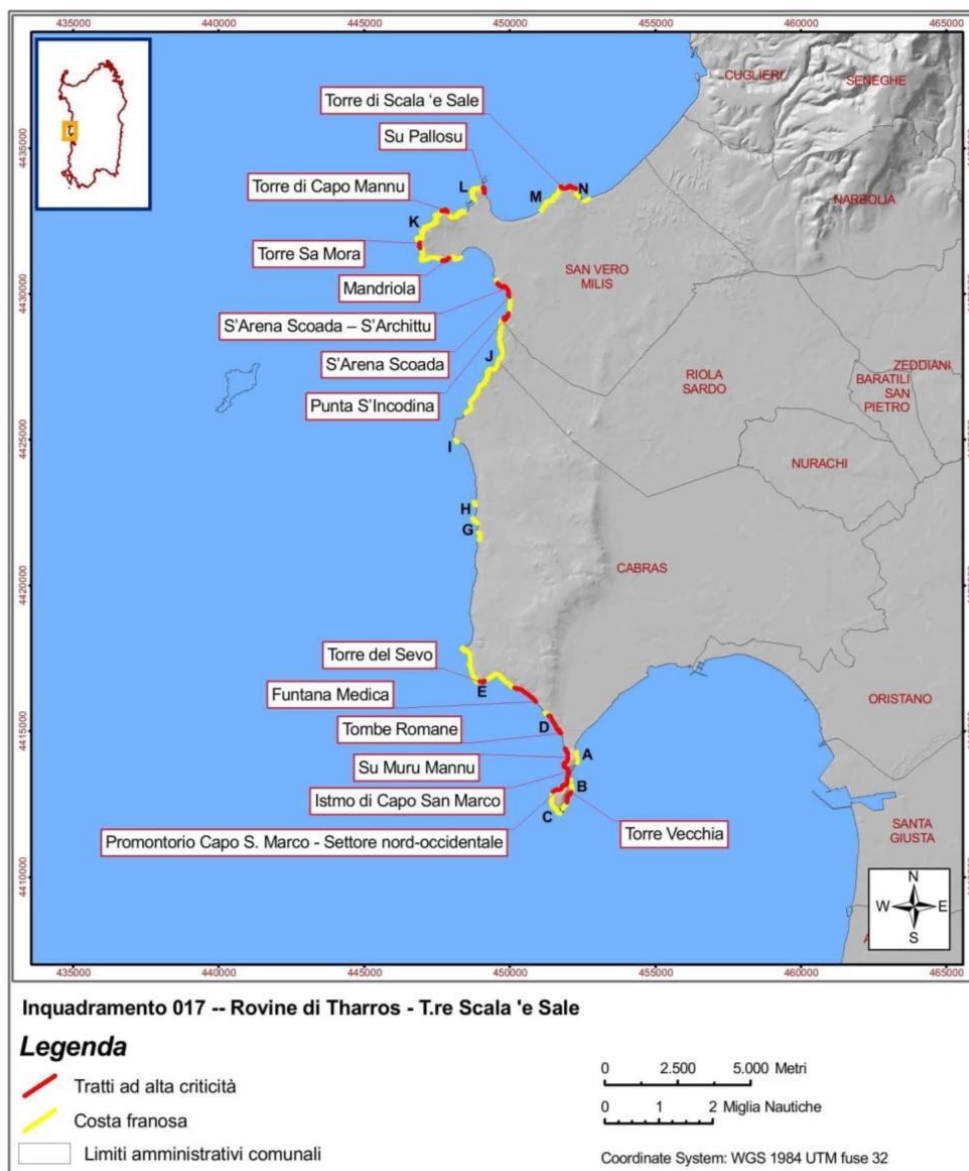


Illustration 12 - Classification des côtes dans le cadre du programme d'action "côtes"- RAS: classification 017 Ruines de Tharros - T. Scala 'e Sale.

Analyse stratigraphique-morphologique: étude des processus de glissements de terrain en cours dans la zone comprise entre Capo San Marco et Capo Marrargiu (centre-ouest de la Sardaigne)

La zone située entre Torre di Capo Mannu à Capo Mannu a été étudiée dans l'étude stratigraphique d'analyse morphologique et des processus de glissement de terrain dans la région entre le cap San Marco et le Cap Marrargiu (Sardaigne centre-ouest) (Lecca *et al.*, 2010, Illustration 13). Il est une recherche sur la côte de la province d'Oristano et les résultats ont attiré l'attention du Département de la protection de l'environnement de la province d'Oristano, intéressé par l'acquisition des données et informations scientifiques pertinentes à l'étude des processus de morphogenèse cette zone géographique. Le contenu de la trace de travail, dans une première partie, une description de géo-lithologiques, stratigraphiques, morphologique et un recensement initial sur les processus d'érosion et les tendances morfoevolutive ensemble du littoral de la province d'Oristano, côtes rocheuses relativement élevées, dans un cadre descriptif et qualitatif détaillé du modèle d'interprétation géologique des processus évolutifs en cours.

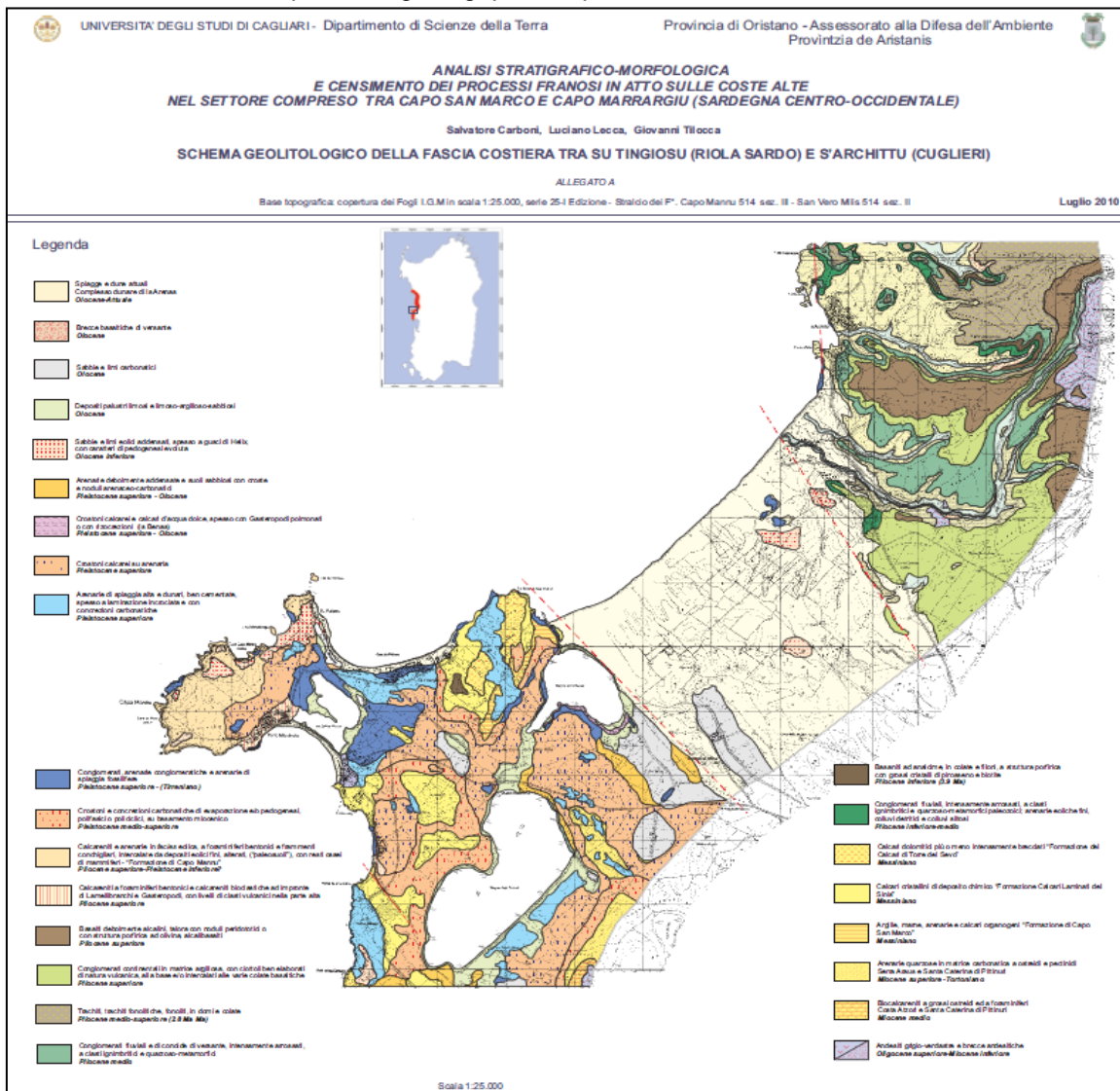


Illustration 13 - Schéma géolithologique de la bande côtière entre Su Tingiosu (Riola Sardo) et S'Archittu (Cuglieri) (Lecca *et al.*, 2010) ; la zone étudiée est mise en évidence.

Données climatiques

La climatologie du Sinis est influencée par sa position géographique et la morphologie de son territoire qui, sans obstacles orographiques d'une certaine importance, permet aux vents de développer une vitesse maximale. De la mer, la péninsule est ouverte aux vents du quadrant III et IV. De la vallée du Tirso sont canalisés les vents du quadrant I et en particulier le grecque et, de la plaine du Campidano, le sirocco.

En ce qui concerne les données sur la nébulosité, il semble qu'en moyenne dans les Sinis il y a 133 jours sereins, 112 avec un trouble moyen et 120 couverts (Service de comptage de l'Air Force de Capo Frasca, dans Fadda F.A. *et al.*, 1993).

En ce qui concerne les précipitations, on peut dire que les précipitations moyennes et annuelles sont relativement faibles et qu'elles ont leur maximum d'intensité entre octobre et mars et avec une période aride qui couvre une partie du printemps et tout l'été. D'après le graphique de L'Illustration 14, on peut voir qu'en mai, malgré quelques jours de pluie, un total de 4, 8,5 mm de précipitations ont été atteints. La même chose peut être dite pour le mois de septembre où dans 4 jours. de la pluie est tombé 10 mm de pluie.

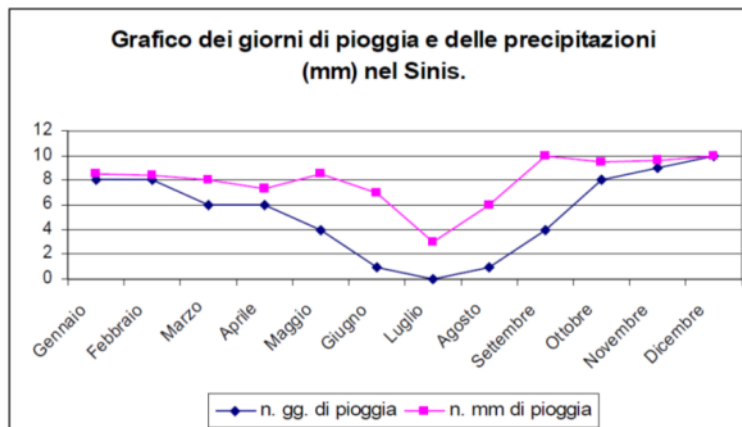


Illustration 14 - Valeurs de précipitations dans la péninsule de Sinis.

La température moyenne annuelle mesurée dans la station S. Giusta est de 16,7 ° avec la valeur mensuelle moyenne la plus élevée au mois d'août (24,1 °) et la valeur mensuelle moyenne la plus basse du mois de janvier (9,9 °) (Illustration 15).

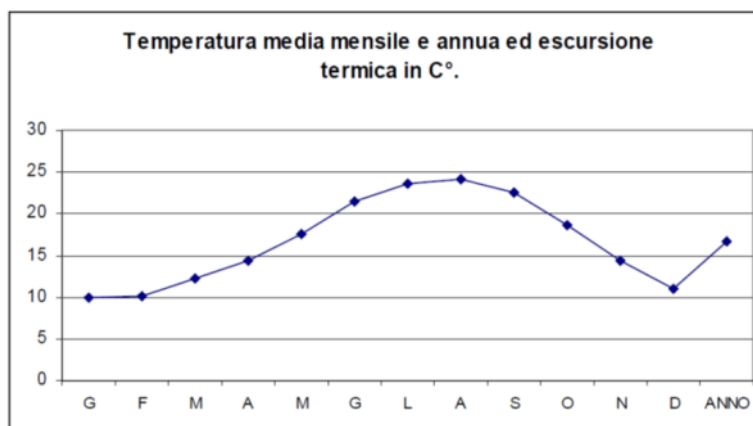


Illustration 15 - Valeurs moyennes de la température mensuelle dans la péninsule de Sinis.

Les températures maximales les plus élevées ont été détectées en juin, juillet, août et septembre. À l'inverse, les températures minimales les plus basses ont été observées en décembre, janvier et février (Illustration 16).

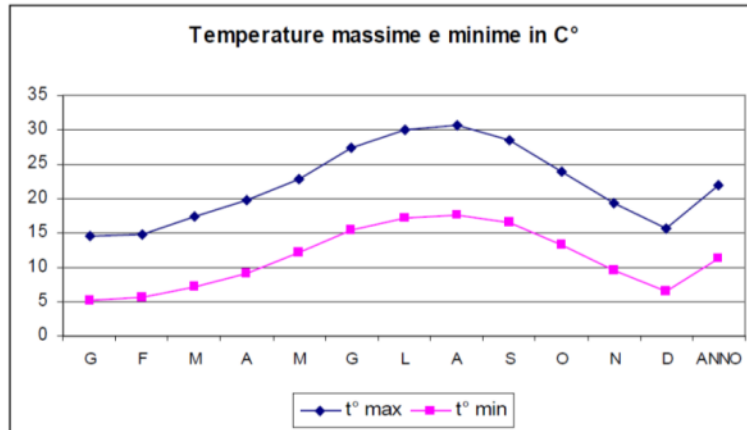


Illustration 16 - Températures maximales et minimales dans la péninsule de Sinis.

Photos aériennes et images satellites

La région de Sardaigne met à disposition une série de photos historiques et de services WMS et TMS (Orthophotos et images satellites). Pour la zone d'étude il y a des photos historiques des années : 1968, 1977-78, 1998-99, 2003, 2006, 2008, 2010, 2013 (Illustration 17).

Modèle numérique de terrain (DTM)

La région de Sardaigne met à disposition le DTM avec un pas de 1 mètre de cellules élaboré sur la base des acquisitions du LIDAR en 2008. Le DTM dispose d'une résolution adaptée à l'étude géologique et géomorphologique d'une vaste zone.

Aléas côtiers

Evolution du trait de côte

L'évolution morphogénétique de la zone côtière étudiée semble être principalement représentée par une érosion rétrograde lente et progressive des falaises. Des processus gravitaires plus importants, tels que l'effondrement et l'effondrement-renversement, qui constituent un élément de danger et représentent des conditions de risque occasionnelles, peuvent être déclenchés par la présence de gros blocs de grès en saillie le long du bord supérieur du mur d'escarpement, en raison de la charge exercée par les blocs de grès reposant directement sur les paléosols, et sur les coques collatérales détritiques-arénacées avec comportement plastique des produits d'altération (argiles et carbonates).

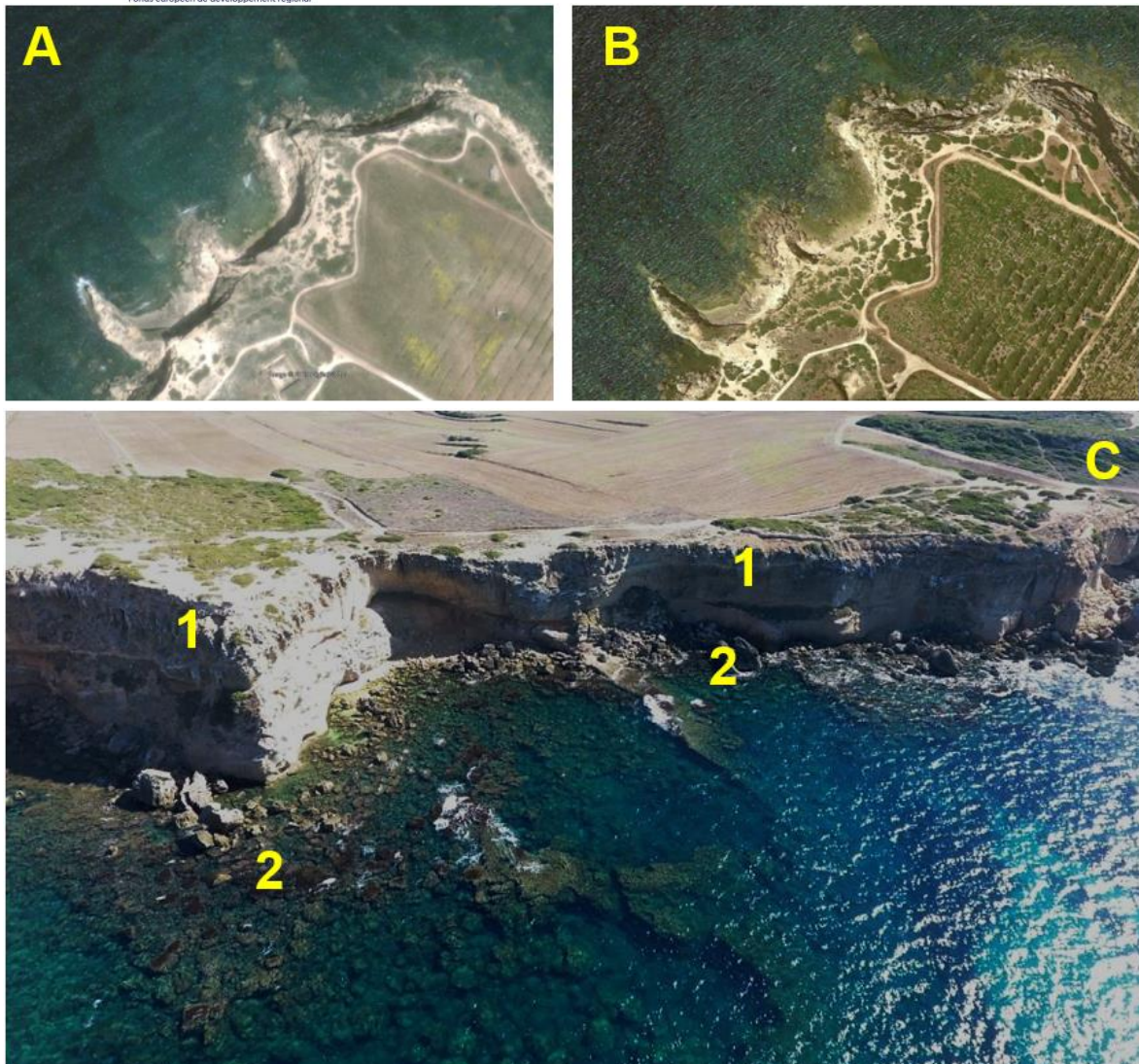


Illustration 17 - Analyse multi-temporelle sur une base orthophotographique des processus gravitaires. A) Orthophotos 2006 : les processus gravitaires sont quiescents ; B) Ortofoto 2017 : nouveaux dépôts de glissements de terrain pour la réactivation des processus d'effondrement gravitaire. C) Falaise au sud de Torre di Capo Mannu : bord de la falaise ; 2- Réduire les dépôts de glissement de terrain et d'effondrement-retournement.

Plans de prévention

Malgré la tendance évolutive marquée à l'érosion et l'exposition importante au mouvement des vagues (l'un des plus grands fetch en Méditerranée avec des hauteurs de vagues jusqu'à 9,5 m), pour le secteur côtier en question, il n'existe actuellement aucun plan de prévention du danger côtier. À l'heure actuelle, le seul outil de planification disponible pour la région de Sardaigne, qui analyse les côtes côtières des hautes côtes, est le PAI qui définit l'étendue côtière en fonction des différents niveaux de danger. Le Programme d'Action Côtière (CAP) de la Région Sardaigne a également procédé à la classification des zones côtières présentant une plus grande vulnérabilité géomorphologique-environnementale. À l'avenir, il conviendrait de planifier des interventions structurelles visant à la délimitation temporaire de zones à haute vulnérabilité géomorphologique en attendant la construction de travaux visant à atténuer le danger dans les zones les plus fréquentées (plages et criques) ; dans les cas les plus extrêmes, il serait souhaitable d'interdire les

zones les plus menacées. Une planification à moyen et long terme devrait garantir l'atteinte de niveaux de sécurité adaptés aux circonstances. L'aspect préventif des processus de défaillance peut se traduire par une augmentation du niveau de sécurité et une réduction des risques.

Conclusions

Rappel des problématiques du site

La physionomie morphostructurale et géomorphologique du tronçon côtier décrit ci-dessus détermine un niveau élevé de risque de glissement de terrain ; l'ensemble du secteur côtier est dominé par la présence généralisée de processus gravitaires d'effondrement et d'effondrement-renversement affectant le substratum rocheux du grès de la Formation de Capo Mannu.

Les principales causes d'amorçage, en plus d'être liées à l'arrangement géologique-structural de la masse rocheuse, doivent être reliées aux conditions d'exposition des falaises au mouvement des vagues ; ce secteur côtier est en effet exposé aux phénomènes météorologiques extrêmes des troisième et quatrième quadrants.

Représentativité transfrontalière du site

L'analyse géologique-géomorphologique des falaises de Capo Mannu, permet d'approfondir les connaissances sur les processus gravitaires qui affectent les zones de falaises sur les lithologies silico-clastiques exposées à la dynamique des phénomènes météorologiques extrêmes et la corrélation avec les modèles hydrauliques de mouvement des vagues. La présence de nombreux processus de perturbation active (glissement de terrain, effondrement-renversement et glissement) avec leurs temps de retour particulièrement courts pourrait fournir des données statistiques utiles sur la dynamique morphologique côtière.

Bibliographie

Angelone C. & Kotsakis T., 2001 – Rhagapodemus azzarolii n.s p. (Muridae, Rodentia) from the Pliocene of Mandriola (Weste m Sardinia, Italy). *Boll. Soc. Paleont. It.*, 40 (2), 12 7-132.

Beccaluva L., Civetta L., Macciotta G., Ricci C.A., 1985 – Geochronology in Sardinia: results and problems. *Rend. Soc. It. Mine r. Pet rog r.*, 40, 5 7-72.

Carboni S. & Lecca L., 1995 – Le Pliocène de Capo Mannu (Sardaigne occidentale): transition marin littorale-continental dunaire . *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 320, (II a), 1 203-1210.

Carboni S., Pala A., Guaita S., 1998 – Geologia e Idrogeologia di Is Arenas (Narbolia-San Vero Milis, Sardegna centro-occidentale). *Rend. Sem. Fac. S c. Univ. Cagliari*, LXVIII, 177-220.

Carboni S. e Tegas M., 2000 – Carta geologica del Sinis nord-occidentale . Università d i Cagliari, inedita.

Carboni S. e Zamma rano R., 2000 – Carta geologica dei depositi quaternari costieri tra Bosa Marina e Punta di Foghe . Università di Cagliari, in edita.

Carboni S., Nicolò C., Pala A. e Pili S., 2002 - Studio idrogeologico degli acquiferi profondi del Sinis (Sardegna centro-occidentale). *Rend. Sem. Fac. Sc. Univ. Cagliari*, 72, 51-90.

Cherchi A., Marini A., Murru M., Robba E., 1978 – Stratigrafia e paleoecologia del Miocene superiore della penisola del Sinis (Sardegna occidentale). *Riv. Ital. Paleont.*, 84, 973 -1036.

Cornée J -J. , Maillard A., Conesa G., Garcia F., Saint Martin J . P., Sage F., Münch P., 2008 – On shore to offshore reconstruction or the Messinian erosion surface in Western Sardinia: Implication for the Messinian salinity crisis. *Sedimentary Geology*, 210, 48-60.



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional

Di Battistin i G., Mezzadri M., Zerbi M., 1974 – Su un affioramento della formazione andesitoide superiore nei sedimenti quaternari del Sinis (Sardegna centro -occidentale). Ateneo Parmense, Acta Nat., 10 (1), 59-81.

Site-de Sella del Diavolo (Cagliari, Sardaigne, Italie)

Présentation du site

Localisation

La zone d'étude est située dans le territoire de Cagliari (Sardaigne-Italie), dans le promontoire qui se trouve dans la partie sud de la ville au niveau de la partie de la côte qui va du port de *Marina Piccola* jusqu'à *Capo Sant'Elia-Cala Mosca*, il couvre une longueur totale d'environ 2-3 km (Illustration 1). La zone est cartographiée dans la feuille 566 section III-IV de la carte topographique de l'Italie à l'échelle 1/25.000 - *La Maddalena* - et dans la carte technique numérique régionale de la Région Sardaigne (CTR) 566020 et 566030 à l'échelle 1/10.000.

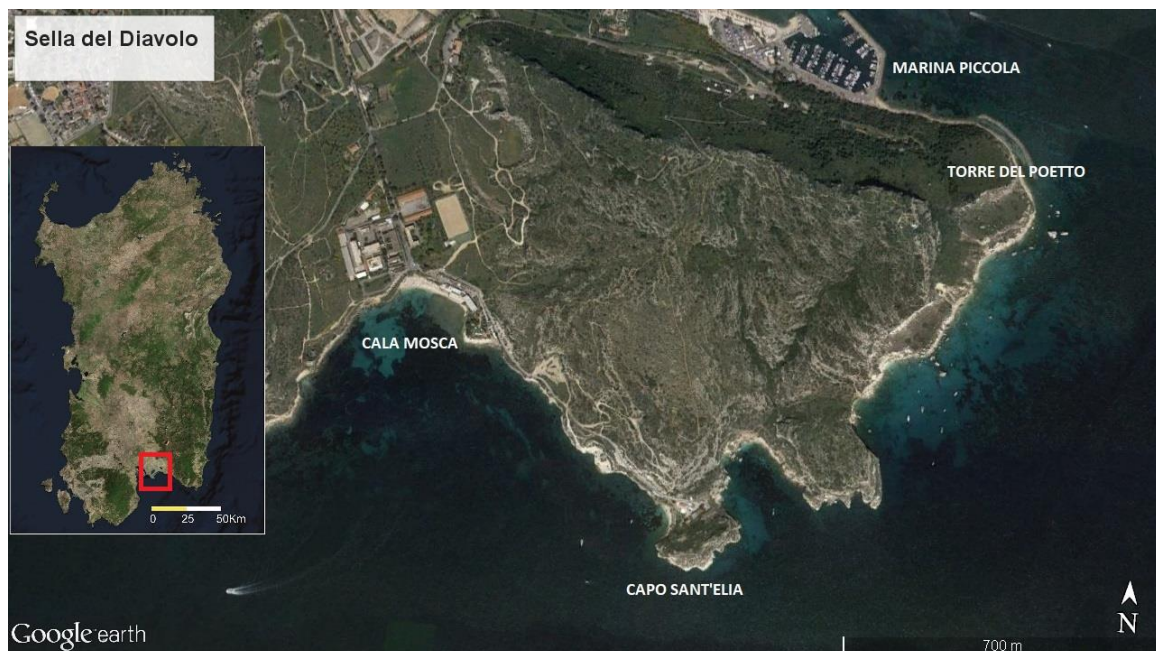


Illustration 4 - Zone de la *Sella del Diavolo* (Cagliari). Image de Google Earth.

Description géographique

La zone se compose d'une série de falaises surplombant la mer, à dessous de laquelle il y a souvent des dépôts d'effondrement et des petites plages. Au passé, le site a été intéressé par de nombreux processus d'instabilité qui malheureusement ont également causé des pertes humaines (juillet 1987). La zone qui présente le plus de problèmes est certainement celle située en contrebas de la *Torre del Poetto*. Récemment il y a eu d'autres effondrements dans le lieu mentionné ci-dessus (février 2017), heureusement ils n'ont pas causé de dommages aux biens ou aux personnes.

Caractéristiques physiographiques et-écosystémiques

Selon le point de vue du paysage, la *Sella del Diavolo* est une zone à haute valeur environnementale et paysagère qui représente l'un des symboles morphologiques les plus connus de la zone côtière des environs urbaines de Cagliari. En raison de la particularité des

caractéristiques naturelles, le promontoire de *Sant'Elia* est protégé par des restrictions de paysage (décret législatif n° 42/2004 et DM 26 avril 1965) et en partie avec des restrictions hydrogéologiques (décret royal n° 3267/1923 et suivantes modifications), il a été aussi identifié comme un site d'importance communautaire SIC *Sant'Elia - Cala Mosca - Cala Fighera* (code ITB002243) et future réserve naturelle régionale *Capo Sant'Elia* (Loi régionale n° 31/1989). La zone est encore comprise dans le territoire militaire (Armée italienne et Marine italienne, articles 822 et suivants du Code civil). Selon le nouveau plan d'urbanisme municipal, cette zone a été classée zone "H" avec la possibilité d'interventions de "valorisation touristique". Pendant ces dernières années, les associations écologiques avec la municipalité de Cagliari ont créé des Itinéraires naturaliste et archéologique qui ont favorisé la redécouverte publique de la *Sella del Diavolo* par de nombreux visiteurs.

Connaissances disponibles

Caractéristiques géologiques

La "Sella del Diavolo" est constituée par de reliefs provenant de la tectonique Plio-Pléistocénique ; une série de failles avec orientation préférentielle NNW-SSE, disloque et incline les séquences sédimentaires Miocènes (Illustration 2 et Illustration 3). Les lithologies principales sont : grès, calcaires, marnes, conglomérats, cônes de débris, dépôts de plages ; dépôts de glissements récents et antiques ; dépôts de marais ; dépôts éluviaux et colluviaux ; gisements anthropiques. Les formations géologiques affleurantes (Illustration 3) en ordre stratigraphique sont : *Arenarie di Pirri*, *Calcari di Cagliari* (Gandolfi et Porcu, 1967, Cherchi, 1974, Cherchi et Montadert, 1984) ; *Sintema di Portovesme*, Dépôts Quaternaires. La description la plus récente de cette succession est celle contenue dans la feuille 557-Cagliari (Barca *et al.*, 2005), dont proviennent la plupart des descriptions suivantes (Illustration 4) et dans la feuille de 566 "Pula" de la carte géologique d'Italie, à l'échelle 1/50.000.

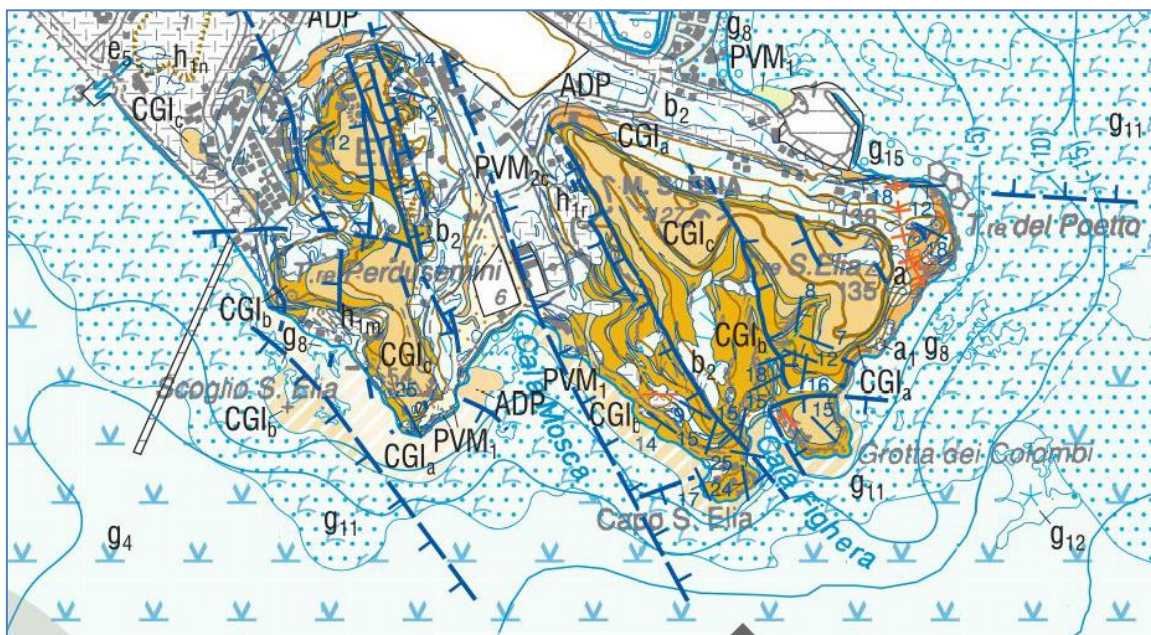


Illustration 5 – Extrait de la feuille 566 "Pula" de la carte géologique de l'Italie.

La formation des *Arenarie di Pirri* (ADP) est caractérisée par des grès bien cimentés et des sables gris-jaunâtres-médio-granulaires presque incohérents, constitués de granules de quartz (plus de 70%), de feldspath et de mica, avec du ciment carbonaté. L'unité est riche en fossiles, représentés

par des fragments abondants de mollusques, de bioturbations, de macro-foraminifères, de foraminifères planctoniques et de nannoplancton calcaire, uniquement localement. L'âge de la formation se réfère au Serravallien.

Les Calcaires de Cagliari sont divisés en trois lithofaciès : le calcaire marneux arénacé (*Pietra Cantone*), le calcaire argileux (*Tramezzario*), le calcaire massif blanc et le calcaire bioclastique (*Pietra Forte*).

Les lithofaciès de la **Pietra Cantone** possèdent une couleur jaunâtre, avec une intense bioturbation. Ça repose directement sur l'ADP avec un contact transgressif avec une surface de discontinuité presque horizontale. Le riche contenu paléontologique est représenté par les foraminifères planctoniques et benthiques, les bivalves, les gastéropodes, les échinides, les coraux isolés et les bioturbations. Des restes de crustacés, de poissons, de reptiles et de cétacés sont également connus. Les foraminifères planctoniques datent de l'âge des lithofaciès au Tortonien (Pecorini *et al.*, 1969, Cherchi, 1974, Cherchi et Montadert, 1984).



Illustration 6 - Caractéristiques lithologiques d'une pente près de la Sella del Diavolo.

Le **Tramezzario** a une couleur blanchâtre avec un aspect parfois farineux. A l'intérieur de ces littoraux, la présence de failles, d'affaissements et de rampes est remarquable. La stratification est plus grande que la *Pietra de Cantone* et a une position presque horizontale. Les caractéristiques lithologiques, sédimentologiques et paléontologiques montrent une certaine instabilité tectonique du bassin de sédimentation et l'absence d'une transition progressive avec les lithofaciès environnants (Leone *et al.*, 1992).

Le **Pietra Forte** a une couleur blanchâtre, généralement massive et avec une riche fraction paléontologique. Les mollusques bivalves sont très facilement distingués. La fracturation est très marquée et se développe principalement avec orientation Est-Ouest. Sa compacité comporte, grâce aussi à l'érosion, une morphologie de crête avec des parois presque verticales. La présence de surfaces irrégulières et de brèches mixtes est un témoin de l'instabilité du bassin de sédimentation. L'âge relatif (qui ne peut pas être spécifié uniquement sur des données micropaléontologiques) sur la base de corrélations stratigraphiques se réfère au Tortonien (Cherchi, 1985c, Leone *et al.*, 1992, Assorgia *et al.*, 1997b); certaines affinités avec des formations similaires émergeant dans le golfe d'Oristano ne peuvent exclure a priori un âge Messinien.

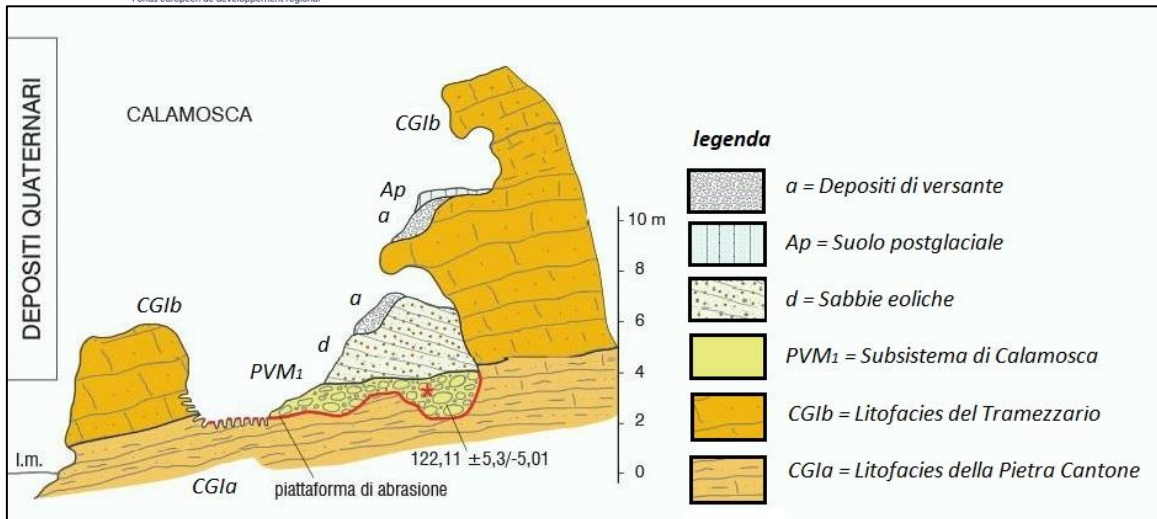


Illustration 7 - Relations stratigraphiques entre les Dépôts Quaternaires et les Calcaires de Cagliari (de la feuille Cagliari 1/50.000 ISPRA).

Le **Sintema di Portovesme**, avec une référence particulière au *Subsintema di Calamosca*, comprennent principalement des dépôts constitués de sédiments côtiers tels que des conglomérats carbonatés et des grès (Vardabasso, 1956, Comaschi *et al.*, 1959, Ozer *et al.* 1980, Ulzega *et al.*, 1982, Belluomini *et al.*, 1986, Hearnthy *et al.*, 1986, Ulzega et Hearnthy, 1986, Kindler *et al.*, 1997) ; ces dépôts sont caractérisés par la présence d'une faune typique des mers chaudes, référant à l'intervalle de temps du stade isotopique 5^e (Tyrrhénienne).

Les **Dépôts Holocènes** sont principalement des dépôts gravitaires, représentés par de cônes de débris, dépôts de glissements récents et antiques, dépôts éluvial et colluviaux, gisements anthropiques. Il s'agit principalement de dépôts continentaux provenant du démantèlement et de l'érosion des lithologies affleurantes dans le voisinage immédiat.

Caractéristiques géomorphologiques

La zone côtière entre Marina Piccola et Capo Sant'Elia a des pentes particulièrement significatives avec des dépôts gravitaires, constitués par débris de cône de débris, dépôts de glissements récents et anciens, dépôts éluviaux et colluviaux. Certains processus sont maintenant actifs avec des temps de retour d'environ à partir de 10 à 30 ans. Les falaises sont composées par des séquences stratigraphiques différentes et elles ont des altitudes considérables (jusqu'à 70-80 m), aussi comme des déclivités verticales ou presque verticales. Les côtés sont composés par dépôts du quaternaire avec des angles de repos très élevés, en quelques cas jusqu'au 40°. La différence de compétence des lithologies provoque une érosion différentielle qui va influencer la morphologie des côtés, ceci se manifeste notamment dans les lithologies les plus tendre avec les formes calanchives (Illustration 5). Le sillon de marée est développé au niveau des lithologies calcaires entre Capo Sant'Elia et Cala Mosca, sa formation pourrait être corrélée par l'interaction avec la surface de la mer et le mouvement des vagues. Le long du promontoire de la Sella del Diavolo, des formes et des dépôts de glissements antiques ont été préservés (Illustration 6 et Illustration 4). Ils peuvent être observés des cas de mouvements de glissements de terrain gravitaires et rotationnels souvent caractérisés par des surfaces de décollement profondes, contrôlées par des failles. D'autres part, il y a de grands corps de glissements de terrain de dépôt, souvent cimentés ou faiblement cimentés, dont la surface supérieure est coupée par les processus en arrière de la

niche de détachement actuelle ; la base du corps du glissement de terrain était donc éloignée à la ligne de rivage actuelle, sur le plateau continental interne.

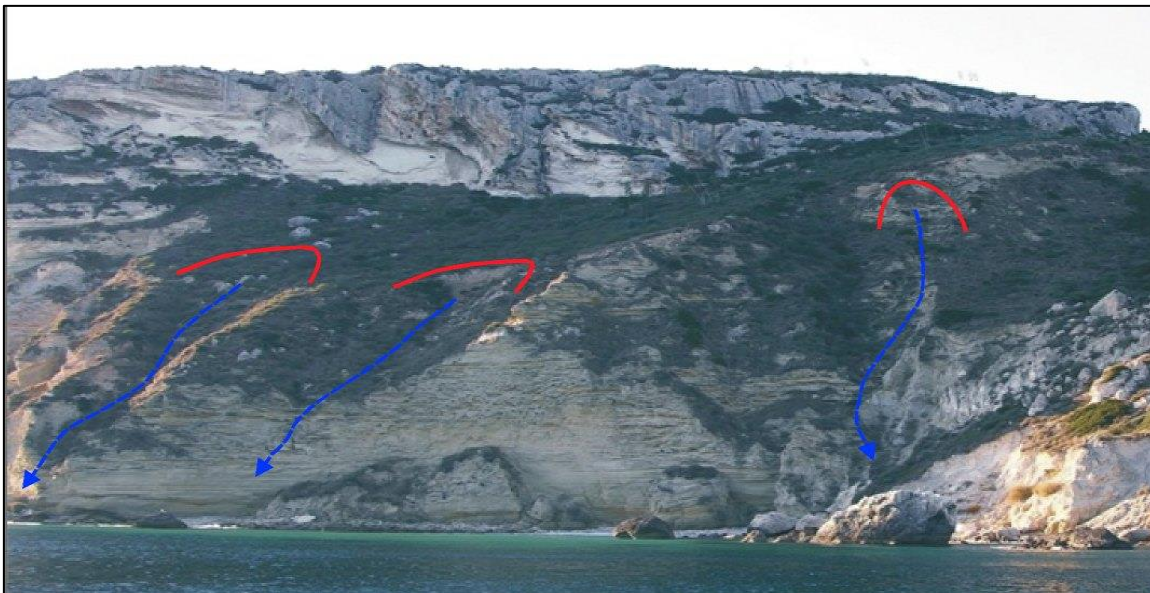


Illustration 8 - Sillons d'érosion accélérés sur des grès à matrice marneuse sur la côte du promontoire de Sella del Diavolo (Cagliari) ; à la fois l'érosion calanchive linéaire et les ogives d'érosion rétrograde sont notées.

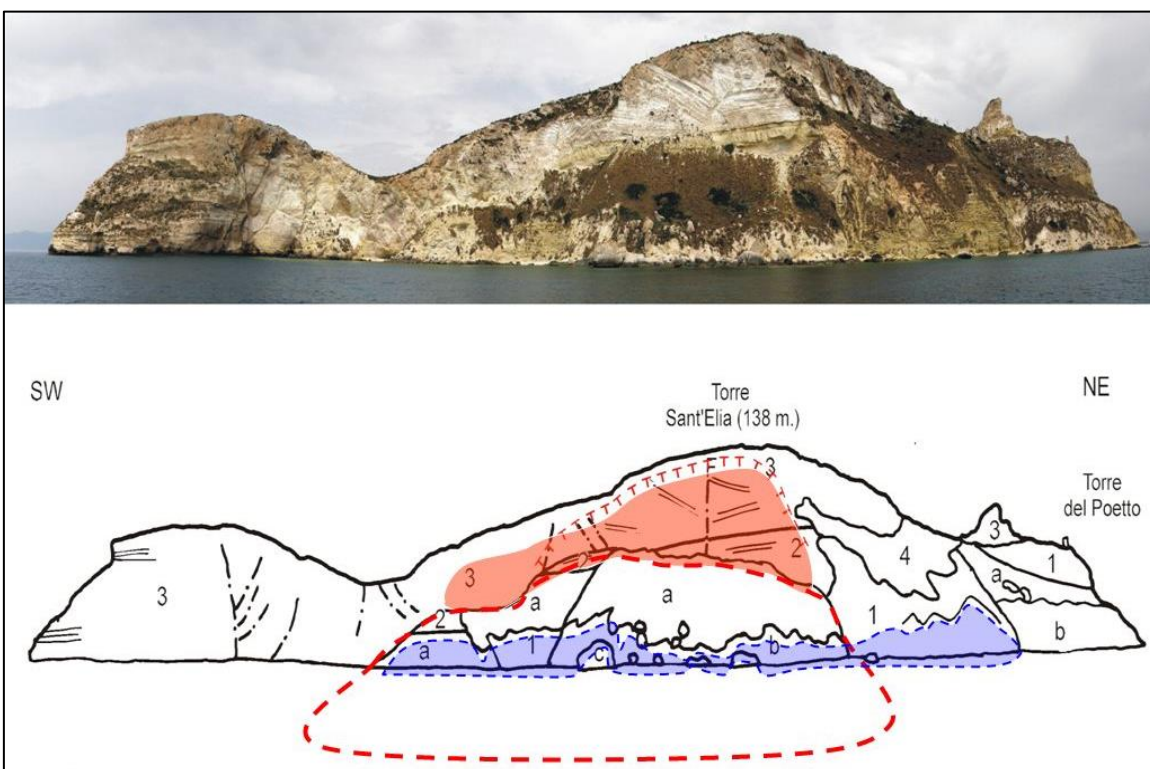


Illustration 6 - Glissements de terrain anciens le long de la côte du promontoire de Sella del Diavolo (Cagliari) ; on distingue le paléo falaise tectonique (a) ; le corps de glissement de terrain, côté de dépôt de remplacement (b) ; la banque d'érosion en retraite accélérée incisée par la ligne côtière actuelle.

Sur le territoire régional (région de Sardaigne), 1 523 glissements de terrain ont été enregistrés, informatisés dans les glissements de terrain de la base de données (DBfrane) cartographique. Dans la zone de la Sella del Diavolo, 11 points d'identification pour les phénomènes de glissement de terrain (PIFF) ont été identifiés, dont 8 sont de premier rang, 2 sont de deuxième rang et 1 est le troisième rang. Les principaux types de glissements de terrain sont associés à des effondrements / renversements (Illustration 7).

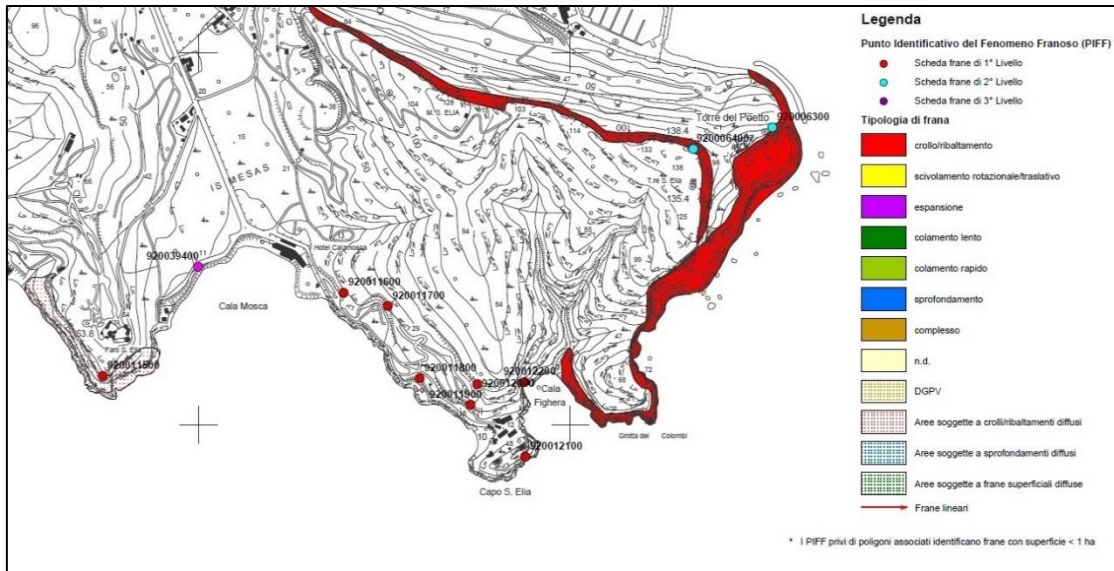


Illustration 7 - Carte d'inventaire des glissements de terrain en Sardaigne C.T.R. N ° 566-020/030.

PAI (Plan pour l'attitude hydrogéologique)

La périmétration dans le cadre de P.A.I. identifié les zones caractérisées par des risques hydrogéologiques, dues à l'instabilité géomorphologique ou à des problèmes hydrauliques, sur lesquelles sont appliquées les règles de sauvegarde contenues dans les Règles de mise en œuvre du Plan. Ces dernières s'appliquent également aux zones présentant des risques hydrogéologiques dont le périmètre provient d'études de compatibilité géologique-géotechnique et hydraulique, préparées conformément à l'article 8, paragraphe 2, des règles de mise en œuvre susmentionnées et représentées sur des couches d'informations spécifiques. La zone de la "Sella del Diavolo" a un risque très élevé (Hg4) inclus dans la partie de la côte qui va de Marina Piccola à Cala Mosca (Illustration 8).

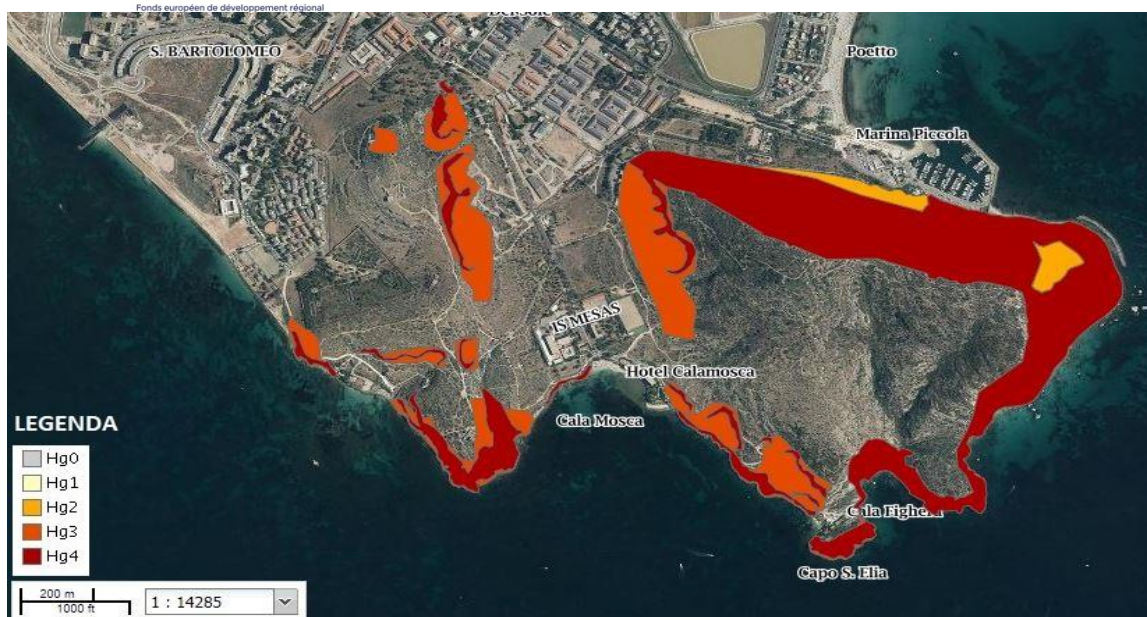


Illustration 8 - Identification des zones PAI dans la Sella del Diavolo (Cagliari).

PAC (Programme d'action côtière de Sardaigne 2013)

C'est un instrument capable d'identifier les lignes programmatiques pour les zones côtières avec des vulnérabilités d'instabilité et d'érosion les plus hautes, aussi comme des lignes directrices intégrées d'application de la gestion côtière (**Illustration 9**). Le Programme d'Action Côtière (PAC a réalisé la classification des zones côtières selon la vulnérabilité géomorphologique-environnementale et a jeté les bases pour la gestion des problèmes de défense des côtes avec une approche globale de gestion côtière intégrée par des interventions organiques. Le programme d'action Coste décrit et groupe les preuves phénoménologiques de régression du littoral régional liées aux processus d'érosion des côtes sablonneuses et des glissements de terrain des sections rocheuses. Des implications critiques pour l'environnement, l'économie et la sécurité publique dépendent de ces conditions critiques, avec la considération évidente que les phénomènes de pente descendante ne peuvent et ne doivent pas être classés avec un exclusif sens négatif. En effet, ils représentent le résultat des tendances générales d'évolution qui s'inscrivent dans la dynamique naturelle des systèmes physiques terrestres où l'homme, par des travaux ou des usages spécifiques, peut conditionner localement, en modifiant la vitesse de transformation ou même en déclenchant les processus.

Comune	Sviluppo costiero comun. [m]	n° tratti franosi	Sviluppo tratti franosi [m]	% costa franosa	n° tratti ad alta criticità	Toponimi tratti alta criticità	Sviluppo tratti alta criticità [m]
MARACALAGONIS	5.317	3	3.041	57%	1	Torre delle Stelle;	2.218

Illustration 9– Programme d'action côtière en Sardaigne (2013).

La zone de Sella del Diavolo a également été incluse dans la PAC; un tronçon côtier très critique d'environ 2090 m de longueur a été identifié, qui s'étend de la tour Poetto à la tour Perdusemi (Illustration 9).

Données climatiques

Les données thermo-pluviométriques de référence sont celles relatives à la station météorologique de Cagliari (*Ente Idrografico*) située près de la zone d'étude. Il représente fidèlement les conditions

climatiques générales du secteur. La série historique commence en 1922 et remonte jusqu'à nos jours (Illustration 10).

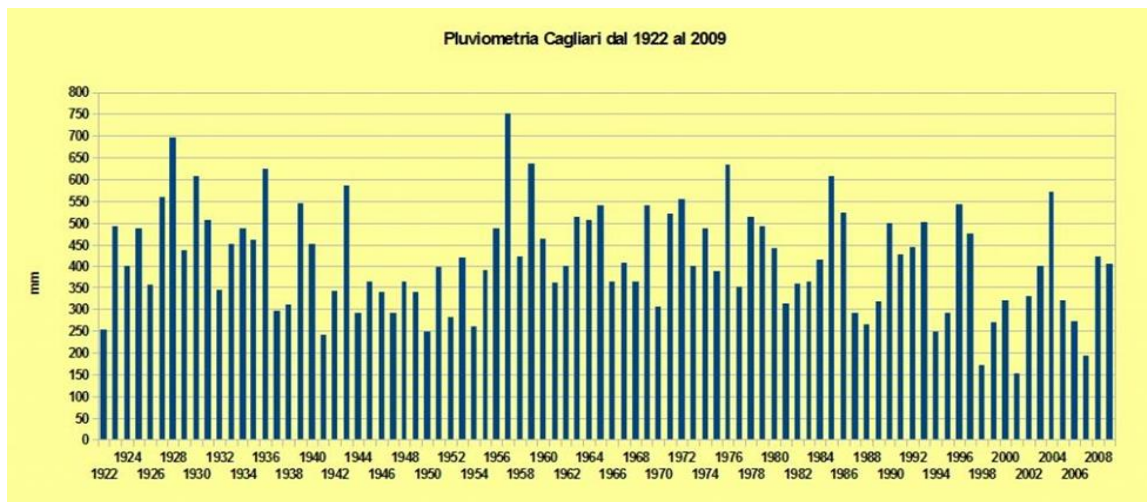


Illustration 9 – Précipitation totale à Cagliari depuis 1922 à 2009.

Caractéristiques géologiques et géotechniques des terres de la zone urbaine de Cagliari (Barrocu G., Crespellani T., Loi A., 1979)

L'étude identifie les caractéristiques géologiques et géotechniques des terrains de la zone urbaine de Cagliari, avec une référence particulière à l'évaluation des paramètres les plus significatifs qui définissent le comportement mécanique des différents lithotypes et les problèmes inhérents aux travaux de fondation. Les données stratigraphiques ont été élaborées avec de procédures statistiques appropriées afin de déterminer les caractéristiques géotechniques typiques et les affinités respectives par rapport aux problèmes qui se posent dans la réalisation des travaux d'ingénierie. L'intention est de fournir des informations géotechniques de base pour les projets bruts, en fournissant les éléments essentiels pour la planification des recherches géologiques et techniques les plus appropriées pour la bonne exécution des travaux. Dans le travail toutes les caractéristiques géologiques-stratigraphiques et géomécaniques des lithologies affleurantes et aussi les données géotechniques de la terre et de l'hydrogéologie sont traitées en détail.

Photographiés aériennes et images satellites

Sur le Géoportail de la Région Sardaigne est disponible une série de photos historiques et de services WMS et TMS (Orthophotographies et images satellites). Pour la zone d'étude, il y a des photos historiques des années : 1968, 1977-78, 1998-99, 2003, 2006, 2008, 2010, 2013 (Illustration 11).

Aléas côtiers

Notoirement, les falaises avec des pentes faisant face à la *Sella del Diavolo* ont longtemps été affectées par de nombreux processus d'instabilité qui exposent les visiteurs, les structures présentes et les baigneurs à des risques.

Après le glissement de terrain en 1987 (Illustration 12), qui a causé la mort d'une personne, a commencé à être publié une série de mesures qui interdisent l'accès aux zones sensibles. Les

autorités portuaires ont promulgué une ordonnance qui, entre autres interdictions, interdisait l'accès à la zone côtière par les voies existantes en dehors de la zone maritime appartenant à l'État, c'est-à-dire de la verticale de *Torre de Su Perdusemmini* jusqu'à 200 mètres au nord de la *Torre del Poetto*. D

'autres glissements de terrain dans la même zone (survenus les 12 et 18 juillet 2010) ont entraîné une nouvelle interdiction de transit et de stationnement le 27 juillet 2010 et une nouvelle interdiction a été émise près de la zone de *Cala Mosca* à la suite des effondrements se sont produits après une grosse tempête.

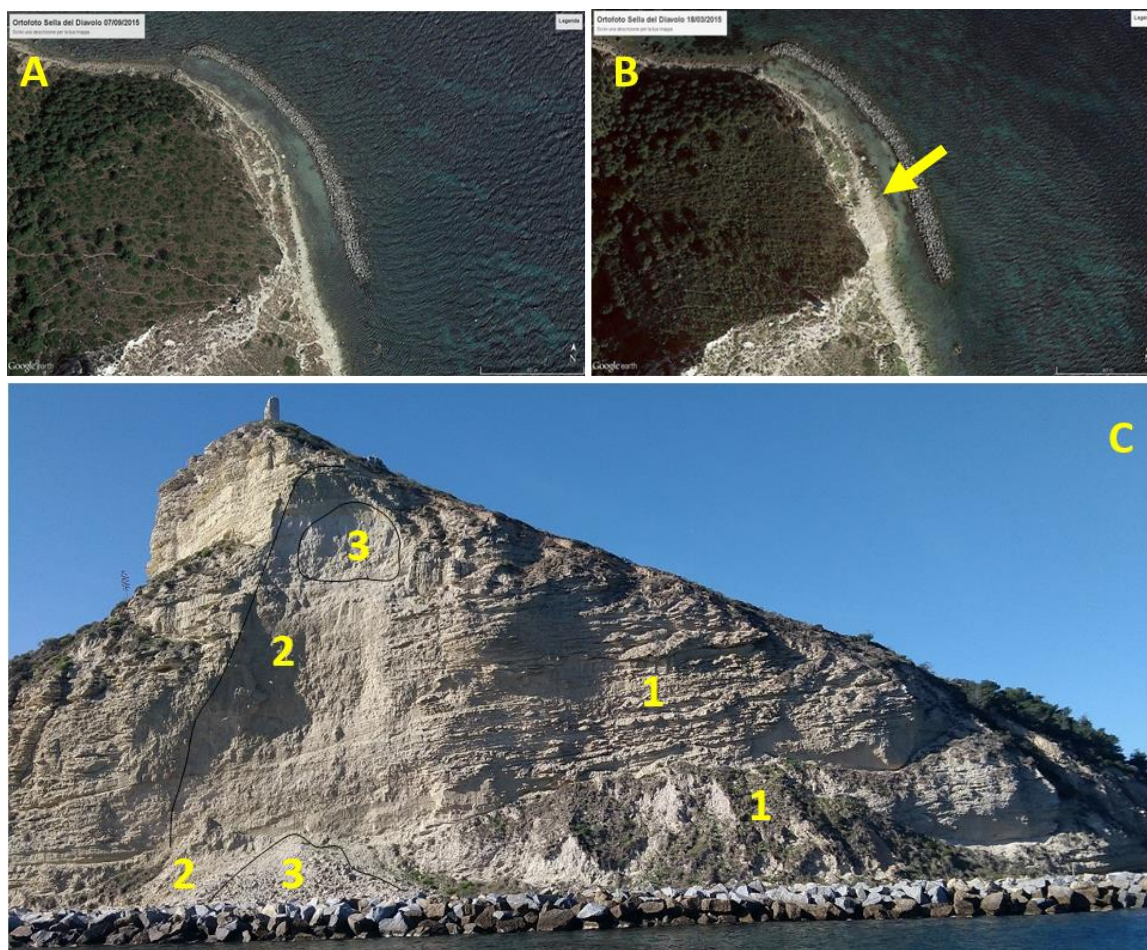


Illustration 10 – L'analyse multi-temporelle sur une base photographique des processus gravitaires du promontoire de *Sella del Diavolo* où les glissements de terrain se sont développés le long des surfaces sous-planaires de fracturation et d'effondrement avec une temps de retour de trente ans. A) Orthophotographie 2015 : les processus gravitaires sont quiescents ; le dépôt de glissement peut être corrélé avec l'événement du 30 juillet 1987. B) Orthophotographie 2017 : nouveaux dépôts de glissements de terrain pour la réactivation des processus gravitaires (février 2017). C) Effondrement des dépôts de glissements de terrain à *Marina Piccola* : 1) les niches de détachement altérées et le dépôt colonisé par la végétation ont évolué entre 1940 et 1950 ; 2) une niche de détachement et de

dépôt au pied du glissement de terrain du 2 juillet 1987 ; 3) créneau d'affichage et de classement du 21 février 2017. Au premier plan la barrière de protection en roche mise en place après l'événement de 1987.

Evolution du trait de côte

La zone d'étude montre une dynamique morphologique accentuée due à la fois à l'action du mouvement des vagues et aux processus d'évolution de la pente arrière ; les tempêtes avec des conditions particulières sont capables de déstabiliser les falaises et les pentes. La présence de nombreux processus d'effondrement récents et passés reflète un fort dynamisme du littoral. Les rochers présentent de nombreuses conditions d'instabilité potentielle en raison des caractéristiques géomécaniques médiocres de la masse rocheuse intensément altérée et fracturée ; de la même manière, les dépôts du Pléistocène et de l'Holocène montrent des caractéristiques géotechniques et géomécaniques défavorables qui, avec le temps, conduisent à un effondrement gravitaire progressif des rochers et des pentes. L'action continue du mouvement des vagues, ainsi que les processus d'altération, tendent au fil du temps à éliminer les dépôts d'effondrement le long de la rive, exposant ainsi le pied de la falaise à une dynamique érosive plus poussée.



Illustration 11 – Coupe de la falaise du promontoire de *Sella del Diavolo*, sous la *Torre del Poetto*, plusieurs fois le site de l'activité de glissement de terrain de 1987 à 2017, on note l'accumulation de glissements de terrain au pied de la falaise et la surface le long du détachement.

Plans de prévention

En dépit de la tendance évolutive marquée à l'érosion et de l'exposition importante au mouvement des vagues (hauteur des vagues atteignant 5-6 m), pour le secteur côtier en question, il n'existe actuellement aucun plan de prévention de aléas côtier. À l'heure actuelle, le seul outil de planification disponible pour la région de la Sardaigne, qui analyse les côtes côtières des hautes côtes, est le PAI qui définit l'étendue côtière en fonction des différents niveaux de aléas côtier. Le Programme d'Action Côtière (CAP) de la Région Sardaigne a également procédé à la classification

des zones côtières présentant une plus grande vulnérabilité géomorphologique-environnementale. À l'avenir, il conviendrait de planifier des interventions structurelles visant à la délimitation temporaire des zones à forte vulnérabilité géomorphologique en attendant la construction de travaux visant à atténuer le péril dans les zones les plus fréquentées (plages et criques). Dans les cas les plus extrêmes, il serait souhaitable d'interdire les zones les plus à risque. Une planification à moyen et long terme devrait garantir l'atteinte de niveaux de sécurité adaptés aux circonstances. L'aspect préventif des processus de défaillance peut se traduire par une augmentation du niveau de sécurité et une réduction des risques.

Conclusions

Rappel des problématiques du site

Les problèmes les plus importants de la *Sella del Diavolo* sont essentiellement liés au péril géomorphologique élevé, concentré près des falaises et des pentes le long du périmètre côtier. L'érosion des formations géologiques présentes peut être atténué (si possible) uniquement par des interventions de consolidation et de stabilisation ciblées, mais dans les cas les plus extrêmes, des modes de gestion contraignante visant à réduire l'exposition au risque sont nécessaires. La structure morphostructurale du secteur côtier de l'étude détermine un niveau de péril élevé pour les glissements de terrain, et à l'heure actuelle, il est difficile de prévoir une réduction significative des risques si des mesures significatives ne seront pas prises pour consolider les zones à risque de glissement de terrain. Toute intervention future devrait résulter à partir d'une analyse détaillée spécifique pour chaque site adapté pour identifier tous les éléments (géologique, géomécanique, géomorphologique, etc.) capables de mettre en évidence différentes vulnérabilités géostatistiques.

Représentativité transfrontalière du site

La *Sella del Diavolo* est une zone de grande valeur environnementale et paysagère qui représente l'un des symboles morphologiques les plus connus de la zone urbaine de Cagliari (Illustration 12). Il est particulièrement populaire tout au long de l'année à la fois par les randonneurs, les touristes et les nageurs.

D'un point de vue géomorphologique, comme cela a été largement expliqué ci-dessus, il existe une série de processus d'éboulements qui, dans le passé, ont causé des dommages dans une certaine mesure aux choses et aux personnes. La représentativité du site est donnée par un certain nombre de fonctionnalités qui permettent d'approfondir les connaissances en ce qui concerne les processus gravitaires qui affectent les zones de falaise de types de roches carbonatées, largement répandus dans tout le bassin méditerranéen (corrélation avec les autres partenaires : par exemple les falaises de Bonifacio ou les falaises calcaires de Provence). L'interaction du substrat rocheux avec l'érosion marine pourrait être utile pour évaluer sa vulnérabilité par rapport à l'augmentation de l'énergie des vagues liée au changement global. La présence de nombreux processus de perturbation active avec leurs temps de retour particulièrement courts pourrait fournir des données statistiques utiles sur la dynamique morphologique côtière. La zone en question présente une exposition assez variable (de W Torre Perdusemi à E-NE de Marina Piccola) qui permet d'évaluer l'influence des courants dominants et des tempêtes par rapport à la direction d'origine.

Bibliographie

Assorgia A., Barca S. & Spano C. (1997b) - A synthesis on the Cenozoic stratigraphic, tectonic and volcanic evolution in Sardinia (Italy). Boll. Soc. Geol. It.: 116, 407-420, Roma.

Barca, S., *et al.* (2005) - "Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000, Foglio 557, Cagliari." Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, Servizio Geologico d'Italia.

Barrocu G., Crespellani T., Loi A (1979). Caratteristiche Geologico-Tecniche dei terreni dell'area urbana di Cagliari. Università degli Studi di Cagliari – Facoltà di Ingegneria.

Cherchi A. (1974) - Appunti biostratigrafici sul Miocene della Sardegna (Italia). Inter. Nèogène Medit., Lyon-1971, Mem. B.R.G.M.: 78, 433-445, Orleans.

Cherchi A. & Montadert L. (1984) - Il sistema di rifting oligomiocenico del Mediterraneo occidentale e sue conseguenze paleogeografiche sul Terziario sardo. Mem. Soc. Geol. It.: 24, 387-400, Roma.

Cherchi A. (1985c) - Oligo-Miocene Basin. "19th European Micropaleontological Colloquium-Guide Book", AGIP, Sardinia, October 1-10, 1985, 87-101.

Cugusi, P., *et al.* "Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000-Foglio 566 Pula-progetto Carg."

Gandolfi R. & Porcu A. (1967) - Contributo alla conoscenza delle microfacies mioceniche delle colline di Cagliari (Sardegna). Riv. It. Paleont. Strat.: 73, 313-348, Milano.

Leone F., Pontillo C. & Spano C. (1992) - Benthic paleocommunities of the middle-upper Miocene lithostratigraphic units from the Cagliari hills (Southern Sardinia, Italy). In: CARMIGNANI L. & SASSI F.P. (Eds.), Contribution to the Geology of Italy with special regard to the Paleozoic basement. A volume dedicated to Tommaso Cocozza. IGCP Project No. 276, Newsletter, 5, 151-158, Siena.

Pecorini G. & Pomesano Cherchi A. (1969) - Ricerche geologiche e biostratigrafiche sul Campidano meridionale (Sardegna). Mem. Soc. Geol. It.: 8, 421-451, Roma.

Site-du Villaggio Nurra (Sassari, Sardaigne, Italie)

Présentation du site

Localisation

La zone d'étude est située sur le territoire de Sassari (Sardaigne-Italie), près de la zone résidentielle Villaggio Nurra, sur la partie de la côte allant du Punte di Lu Nibaru à Punta Furana (Illustration 1) ; il couvre une longueur totale d'environ 2 km. La zone est cartographiée dans la feuille 440, section II de la carte topographique de l'Italie à l'échelle 1/25.000 - Pozzo San Nicola - et dans le document technique régional numérique de la région Sardaigne (CTR) 440150 à l'échelle 1/10.000.



Illustration 12 - Zone pilote du Villaggio Nurra (Sassari). Image de Google Earth Description Géographique

Description géographique

La zone d'étude se compose d'une série de pentes abruptes avec quelques falaises surplombant la mer, au-dessous desquelles il y a des dépôts d'effondrement. La partie la plus importante de la côte, aux fins de l'étude, est certainement celle située entre le Punte de Lu Nibaru et la Cala di Rena Minori.

Caractéristiques physiographiques-et écosystémiques

Le tronçon de côte étudié est une zone naturelle et d'accès difficile, mais présente également des aspects liés à une utilisation antérieure du territoire qui montre une dégradation du paysage et de l'environnement (maisons construites sur la crête des falaises ou sur des pentes vers la côte, déforestation et mauvais travail agricole). La région abrite quelques criques avec des plages particulièrement populaires pendant l'été.

Dans le linéaire côtier, les plages *Rena Majori* et *Rena Minori* sont également incluses. Ces deux plages sont parmi les plus représentatives de la côte nord-ouest ; *Rena Majori* se compose d'une

plage caractérisée par du sable à grain moyen avec de petits cailloux lissés par la mer, tandis que *Rena Minori* est moins étendue et profonde.

Connaissances disponibles

Caractéristiques géologiques

La zone d'étude est caractérisée par la présence de basement varisque et des dépôts quaternaires. Les métamorphites sont affectés par une déformation polyphasique qui génère de structures tectoniques telles que des chevauchements et des plis. Les séquences varisques sont dans différentes unités tectoniques (Unità di Li Trumbetti, Unità di Canaglia, Unità dell'Argentiera) séparées par une série de chevauchements principaux et secondaires (Illustration 2 et Illustration 3, Oggiano & Mameli, 2006). La succession paléozoïque de la Nurra diffère de la zone externe et des zones externes (datées sur des bases biostratigraphiques) en raison du faible contenu paléontologique ; les seules données paléontologiques actuelles concernent quelques orthoceratides (Venerandi, 1965) chez le filladi silurien noir (Di Pisa & Oggiano, 1984; Oggiano & Mameli, 2006).

Unità dell'Argentiera: à la base de cette unité se trouve la Formation de Monte Forte composée de grès et de quartzites avec des âges référés au Cambrien-Ordovicien inférieur; suit la formation de Palmadula composée de argillites laminaires et de pélites noires avec l'âge se référant à l'Ordovicien-Silurien supérieur.

Unità di Li Trumbetti: à la base se trouve la Formation de Flumin'Alis constituée de grès, de siltites et de shales référençable à l'âge Cambrien-Ordovicien; suit le Formation du Capo Negru, composé de deux lithofaciès: une de volcanites acid et l'autre de grauwackes et volcanites acides attribuables à l'âge l'Ordovicien moyen (Di Pisa *et al.*, 1992); ci-dessus il y a les shales noires de la Formation de La Pedraia avec l'âge référant au Silurien; suivre les gabbros et les dolérites d'âge présumé silurien.

Unità di Canaglia: à la base de cette unité tectonique est la formation Biancareddu divisé à son tour en des lithofaciès, la premier lithofaciès est constitué par conglomérats avec des concentrations de fer oolithiques (Ordovicien moyen-supérieur), suivi de deux lithofaciès de volcanites acides et volcanites basiques avec l'âge attribués à l'Ordovicien moyen, ferme le toit des lithofaciès avec shales finement laminés (ordoviciennes mi-hauteur); au-dessus du la Formation du Bianceddeddu suivent les shales noires siluriennes de la Formation de Li Corti.

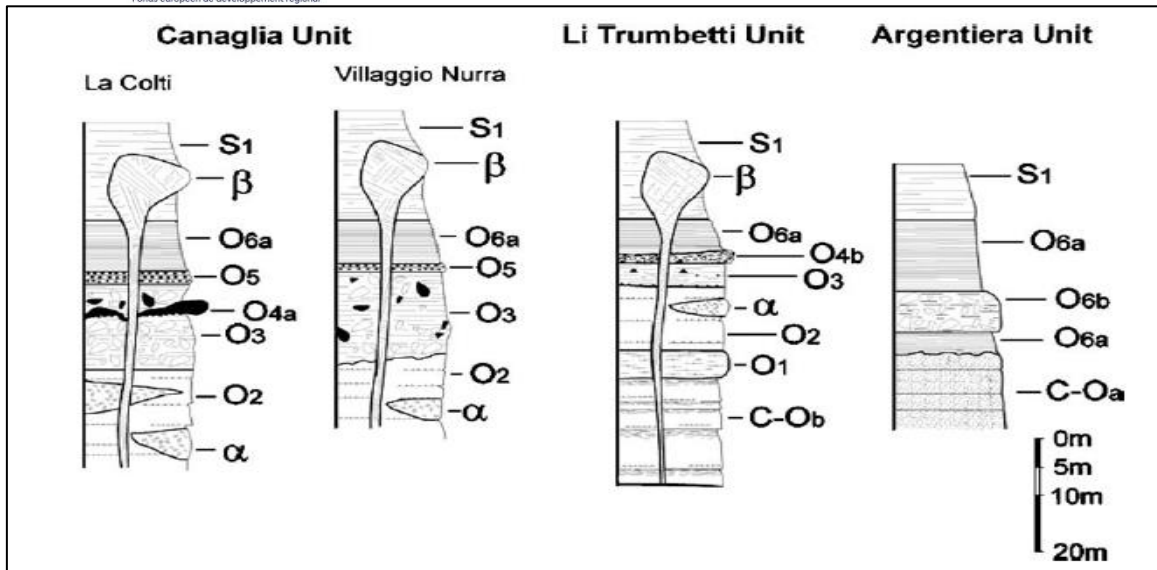


Illustration 13 - Stratigraphie des séquences à la base des schistes noirs siluriens dans les unités tectoniques du Nurra central. Légende : C-Oa, grès et quartzites (Cambrien-Ordovicien) ; C-Ob, grès et ardoises (? Cambrien-Ordovicien) ; O1, vulcanites acides (Ordovicien moyen) ; O2, grauwackes (Ordovicien supérieur) ; O3, Diamictite et grovacs de grand diamètre avec horizon de pyrite ; O4a, conglomérat de fer dur ; O4b, microconglomérats ; O5, niveaux minces de argilite ; O6a, argilite finement stratifiés ; O6b, Argentiera diamictite ; S1, phyllades noir (Siluriane) ; α, à metabasaltes alcaline ; β, gabbres alcalin et dolerites (Oggiano & Mameli, 2006).

Au-dessus du Basement métamorphique il y a le **Sintema di Portovesme**, avec une référence particulière au Subsintema di Calamosca, comprend principalement des dépôts de sédiments côtiers tels que des conglomérats carbonatés et des grès (Vardabasso, 1956, Comaschi *et al.*, 1959, Ozer *et al.* 1980, Ulzega *et al.*, 1982, Belluomini *et al.*, 1986, Hearthy *et al.*, 1986, Ulzega et Hearthy, 1986, Kindler *et al.*, 1997).

Ces gisements se trouvent principalement le long du secteur sud de la plage de Rena Majore et vont jusqu'au village de Nurra. Il existe également des faciès relatifs au **Subsintema di Calamosca** (attribués à l'intervalle de temps du stade isotopique 5e Tyrrhénienne), émergeant près de la côte, jusqu'à quelques mètres de hauts composés principalement de grès bioclastiques.

Dépôts Holocènes. Ce sont principalement des dépôts gravitaires constitués de dépôts éluviaux et colluviaux, de dépôts de glissements de terrain, cônes de débris. Les dépôts continentaux sont générés au démantèlement des lithologies affleurant tout près. Les dépôts côtiers actuels se composent principalement de sable de quartz grossier et de gravier avec des petits galets. L'âge de ces dépôts fait référence au Pléistocène supérieur de l'Holocène.

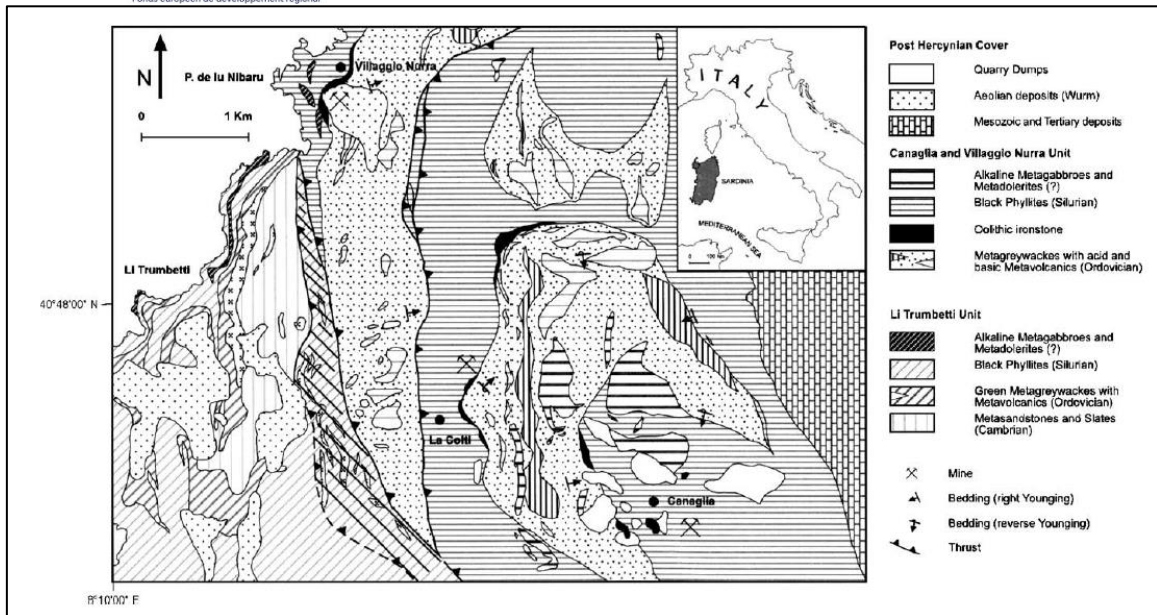


Illustration 14 – Carte Géologique-Structurale de la Nurra central (Oggiano *et al.*, 2006).

Caractéristiques géomorphologiques

La zone d'étude est insérée dans un contexte physiographique dominé par la haute côte rocheuse modelée au pied de la pente par les vagues et autres agents érosifs. Les reliefs supérieurs sont principalement tabulaires, atteignant des hauteurs de l'ordre de 100-150 m s.l.m; ils se distinguent par un bassin versant assez marqué dans le voisinage immédiat de la côte (environ 100 ÷ 200 m).

Le réseau hydrographique a une extension limitée et est principalement torrentiel. Les pentes sont plutôt inclinées avec des falaises surplombant la mer et des pentes qui atteignent des angles proches de 40-45° ; dans certains cas, une banque d'érosion de forme irrégulière se développe et sa hauteur varie entre quelques mètres et une douzaine de mètres. L'arrière-pays présente une morphologie plate à faiblement ondulée. La structure morphodynamique montre des processus évidents d'effondrement tels que des effondrements et des glissements ; ces dépôts sont soumis à l'action incessante des tempêtes et aux processus d'altération physico-chimique. Dans certaines sections, certains processus d'érosion régressive avec une extension de l'instabilité vers le haut sont évidents. La masse rocheuse est intensément fracturée, principalement en raison des fortes contraintes tectoniques que les roches ont subies au cours de leur histoire ; le lay avec la fracturation facilite l'initiation des glissements de terrain de l'effondrement et du glissement le long des falaises, ceux-ci pouvant affecter directement les zones sous-jacentes fréquentées par les nageurs durant l'été.

Les processus d'effondrement et de renversement, peuvent également se produire dans le grès pléistocène, en particulier au niveau du sillon, ainsi qu'aux dépens de la base varisque ; l'érosion donne lieu à de multiples formes en saillie, qui déterminent l'accumulation le long de la plage de grands et de petits blocs. Dans certains points, il existe également des plates-formes d'abrasion marine dérivées du démantèlement progressif et du recul de la haute côte par le mouvement des vagues (Illustration 4).



Illustration 15 – Une portion de côte près du village de Nurra.

IFFI (Inventaire des glissements de terrain en Italie)

Aucun point d'identification des phénomènes de glissement de terrain (PIFF) n'a été enregistré dans la zone d'étude.

PAI (Plan pour l'attitude hydrogéologique)

La périmétration dans le cadre de P.A.I. identifié les zones caractérisées par des risques hydrogéologiques, dues à l'instabilité géomorphologique ou à des problèmes hydrauliques, sur lesquelles sont appliquées les règles de sauvegarde contenues dans les Règles de mise en œuvre du Plan. Ces dernières s'appliquent également aux zones présentant des risques hydrogéologiques dont le périmètre provient d'études de compatibilité géologique-géotechnique et hydraulique, préparées conformément à l'article 8, paragraphe 2, des règles de mise en œuvre susmentionnées et représentées sur des couches d'informations spécifiques. La majeure partie de la côte est classée dans la classe Hg4, donc de danger géomorphologique maximum (Illustration 5).



Illustration 16 - Périmétration PAI de la partie côtière dans le Villaggio Nurra.

PAC (Programme d'action côtière de Sardaigne 2013)

C'est un instrument capable d'identifier les lignes programmatiques pour les zones côtières avec une plus grande vulnérabilité de l'instabilité et de l'érosion et des lignes directrices intégrées d'application de la gestion côtière (Illustration 9). Le Programme d'Action Côtière (CAP) a réalisé la classification des zones côtières avec une plus grande vulnérabilité géomorphologique-environnementale et a jeté les bases pour que les problèmes de protection, de protection et de défense des côtes s'inscrivent dans une approche globale de gestion côtière, intégrée à travers des interventions organiques non seulement de nature structurelle mais aussi avec un cadre réglementaire et de gestion. Le programme d'action Coste décrit et classe les preuves phénoménologiques de l'arriération du littoral régional liées aux processus d'érosion des côtes sablonneuses et des glissements de terrain des sections rocheuses. Des implications critiques pour l'environnement, l'économie et la sécurité publique découlent de ces conditions critiques, avec la considération évidente que les phénomènes de pente descendante ne peuvent et ne doivent pas être classés avec le seul sens négatif. En effet, ils représentent le résultat des tendances générales d'évolution qui s'inscrivent dans la dynamique naturelle des systèmes physiques terrestres et que l'homme, par des travaux ou des usages spécifiques, peut conditionner localement, en modifiant la vitesse de transformation ou même en déclenchant les processus.

Comune	Sviluppo costiero comun. [m]	n° tratti franosi	Sviluppo tratti franosi [m]	% costa franosa	n° tratti ad alta criticità	Toponimi tratti alta criticità	Sviluppo tratti alta criticità [m]
SASSARI	48.058	6	39.707	83%	6	Platamona; Torre de Bântine Sale; Torre Bianca - Torre Negra; Argentiera; Argentiera nord; Punta de su Nibbaru;	2.458

Illustration 17 – (Programme d'action côtière de Sardaigne 2013).

Au sein de la PAC, la zone du Villaggio Nurra a également été étudiée, avec une référence particulière aux points de De Lu Nibaru, dans lesquels une section très critique a été identifiée.

Données climatiques

Les données thermo-pluviométriques de référence sont celles relatives à la station météorologique Stintino (Ente Idrografico) située à environ 15 km à vol d'oiseau de la zone d'étude ; il représente fidèlement les conditions climatiques générales du secteur. La série historique commence à partir de 1934 et arrive jusqu'en 2011.

Photos aériennes et images satellites

Sur le Géoportail de la Région Sardaigne, une série de photos historiques et de services WMS et TMS sont disponibles (Orthophotos, photos aériennes et images satellites). Pour la zone d'étude il y a des photos historiques des années : 1954-55, 1968, 1977-78, 1998-99, 2003, 2006, 2008, 2010, 2013. Les images de Google Earth de 2004 à 2017 (Illustration 7 and Illustration 8).



Illustration 18 – Photo aérienne 1954-55 de la zone de Nurra Village (Géoportail de Sardaigne).

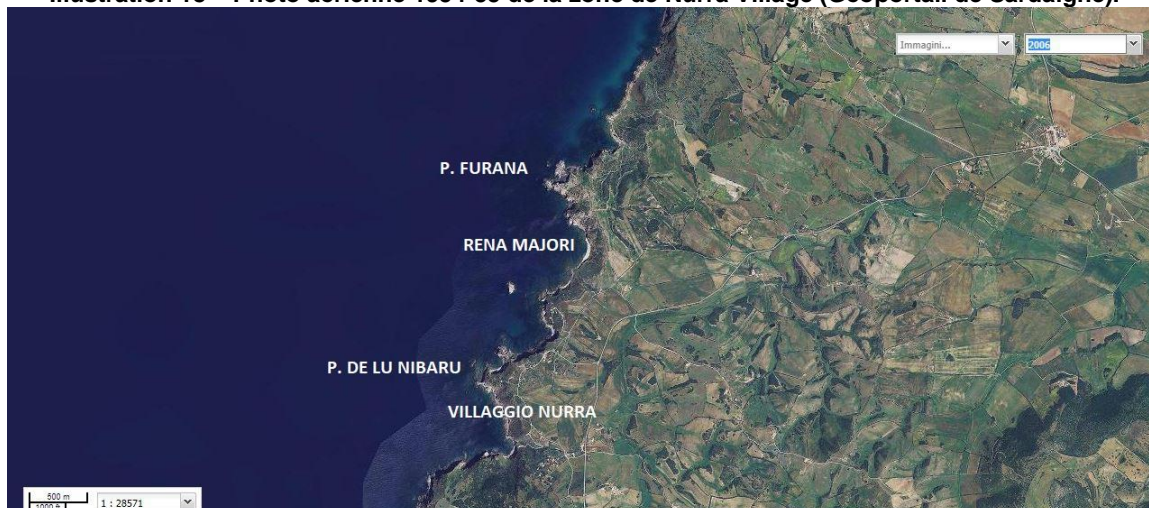


Illustration 19 - Orthophotos 2006 de la zone de Nurra Village (Géoportail de Sardaigne).

PPR (Plan régional d'aménagement du paysage du golfe d'Asinara)

La zone d'étude est incluse dans la fiche de zone n ° 14 du golfe d'Asinara. Le système côtier occidental, qui est l'un des éléments environnementaux du système paysager, est défini par les falaises et la haute côte rocheuse sur les affleurements paléozoïques et s'intéresse, plus au sud, aux dépôts métalliques historiquement cultivés à travers le centre minier d'Argentiera .

Aléas côtiers

Le tronçon côtier en question désigne une série de problèmes géostatiques d'une certaine vulnérabilité résultant d'une série de causes naturelles et en partie anthropiques. Les falaises environnantes abritent une série de processus gravitaires (effondrements et glissements) susceptibles d'affecter les zones de baignade sous-jacente avec un danger élevé qui en résulte pour tous les utilisateurs. Aux processus gravitaires s'ajoute l'érosion superficielle qui se produit pendant des pluies intenses et prolongées ; la présence d'ouvrages anthropiques (tels que les routes et les chemins) d'accès aux plages, ont des pentes raides et sont par conséquent siège du processus de ruissellement qui peuvent faciliter l'initiation des processus d'érosion à la fois surfaciques ou linéaires. Les dépôts de talus avec les coutres éluvial et colluviaux peuvent reposer directement sur le substrat rocheux ; lorsque cette position par rapport à la pente, peut favoriser, surtout après les périodes de pluie prolongée, les processus de glissement qui vont affecter les voies sous-jacentes côtière. Heureusement, la plupart de ces processus se produisent pendant les mois d'hiver, lorsque les plages sont désertes, et par conséquent le risque diminue de manière significative.

Evolution du trait de côte

La zone d'étude montre une dynamique morphologique accentuée due à la fois à l'action du mouvement des vagues et aux processus d'évolution de la pente arrière ; les tempêtes dans des conditions déterminantes sont capables de déstabiliser les falaises et les pentes. La présence de nombreux processus d'effondrement récents et passés reflète un fort dynamisme du littoral ; l'exposition particulière du littoral le rend particulièrement vulnérable aux grandes tempêtes venant des secteurs occidentaux. Les rochers présentent de nombreuses conditions d'instabilité potentielle en raison des caractéristiques géomécaniques médiocres de la masse rocheuse fortement déformée et fracturée ; de la même manière, les dépôts du Pléistocène et du Quaternaire présentent des caractéristiques géotechniques et géomécaniques défavorables qui, avec le temps, conduisent à un effondrement gravitaire progressif des rochers et des pentes.

Plans de prévention

En dépit de la tendance évolutive marquée à l'érosion et de l'exposition importante au mouvement des vagues (hauteur des vagues atteignant 9,5 m), pour le secteur côtier en question, il n'existe actuellement aucun plan de prévention de aléas côtier. À l'heure actuelle, le seul outil de planification disponible pour la région de Sardaigne, qui analyse les côtes côtières des hautes côtes, est le PAI qui définit l'étendue côtière en fonction des différents niveaux de aléas côtier. Le Programme d'Action Côtière (CAP) de la Région Sardaigne a également procédé à la classification des zones côtières présentant une plus grande vulnérabilité géomorphologique-environnementale.

À l'avenir, il conviendrait de planifier des interventions structurelles visant à la délimitation temporaire des zones à forte vulnérabilité géomorphologique en attendant la construction de travaux visant à atténuer le danger dans les zones les plus fréquentées (plages et criques). Dans les cas les plus extrêmes, il serait souhaitable d'interdire les zones les plus à risque. Une planification à moyen et long terme devrait garantir l'atteinte de niveaux de sécurité adaptés aux circonstances. L'aspect préventif des processus de défaillance peut se traduire par une augmentation du niveau de sécurité et une réduction des risques.



Illustration 20 - Cala di Rena Majore (après du Villaggio Nurra).



Illustration 21 – Glissement de terrain au pied de la falaise après du Villaggio Nurra.

Conclusions

Rappel des problématiques du site

Les caractéristiques morphostructurale de l'étendue côtière examinée détermine un niveau de danger élevé pour les glissements de terrain (Illustration 10); à l'heure actuelle, il est difficile de prévoir une réduction significative des risques si des mesures significatives ne sont pas prises pour

consolider les zones à risque de glissement de terrain. Le type d'interventions futures possibles devrait découler d'une analyse détaillée spécifique à chaque site visant à identifier tous les éléments (géologiques, géomécaniques, géomorphologiques, etc.) susceptibles de mettre en évidence les différentes critiques géostatiques. Les problèmes les plus importants sont essentiellement liés au danger géomorphologique élevé, concentré le long du périmètre côtier ; l'érosion des lithologies présentes ne peut être atténuée (si possible) que par des interventions de consolidation et de stabilisation ciblées, dans les cas les plus extrêmes, il est possible de ne réaliser que les prescriptions de gestion visant à réduire l'exposition au risque.

Représentativité transfrontalière du site

La côte du Villaggio Nurra est certainement une zone à haute valeur environnementale et paysagère, qui abrite des criques avec des plages particulièrement appréciées durant l'été (plage *Rena Majori* et *Rena Minori*). Du point de vue géomorphologique, comme expliqué ci-dessus, il est le foyer d'une série de processus de perturbation actifs qui affectent les criques et les plages ci-dessous. Un aspect de la représentativité des frontières du site est le fait que vous avez un certain nombre de fonctionnalités qui permettent d'approfondir les connaissances en ce qui concerne les processus gravitaires qui affectent les zones de falaise de roches impliquées de feuilletage envahissants, les plis et le clivage (corrélation avec les autres partenaires : par exemple, les rochers liguriens). La présence de nombreux processus de perturbation active avec leurs temps de retour particulièrement courts pourrait fournir des données statistiques utiles sur la dynamique morphologique côtière. La zone examinée présente une exposition au NO qui permet d'évaluer l'influence de la crue maximale pendant les tempêtes les plus importantes ; il existe des données de référence ondulées (National Wave Network R.O.N. gérées par le I.S.P.R.A.) relatives au Boa di Alghero.

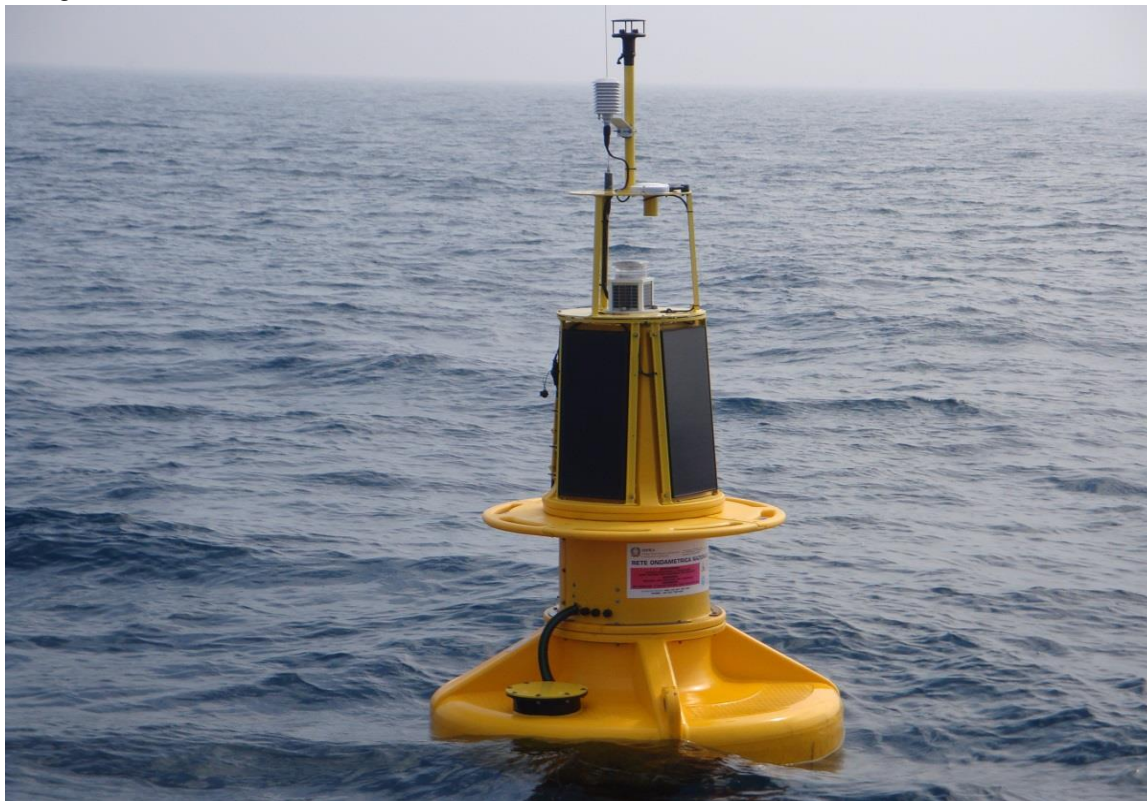


Illustration 22 – Bouée vague-métrique du Réseau National vague-métrique géré par le I.S.P.R.A.

Bibliographie

Belluomini G., Branca A., Delitala L., Pecorini G. & Spano C. (1986) - Isoleucine Epimerization Dating of Quaternary Marine deposits in Sardinia, Italy. *Zeit. Geomorph.*, N.F., Suppl. Bd., 62: 109-117, Stuttgart.

Carmignani, L., Franceschelli, M., Pertusati, P.C., Ricci, C.A., 1979. Evoluzione tettonico-metamorfica del basamento della Nurra (Sardegna NW). *Memorie della Società Geologica Italiana* 20, 57-84.

Comaschi Caria I. (1959a) - Il Miocene in Sardegna. *Boll. Soc. Geol. It.*, 77: 183-198, Roma.

Di Pisa, A., Oggiano, G., 1984. Segnalazione di un orizzonte carbonatico nella Nurra paleozoica e suo significato stratigrafico nelle successioni dell'ercinico sardo. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie Serie A91*, 141-154.

Di Pisa, A., Gattiglio, M., Oggiano, G., 1992. Pre-Hercynian magmatic activity in the Nappe Zone (internal and external) of Sardinia: evidence of two Within Plate basaltic cycles. In: Carmignani, L., Sassi, F.P. (Eds.), *Contribution to the Geology of Italy with Special Regard to the Paleozoic Basement. A Volume Dedicated to Tommaso Coccozza. IGCP Project 276, Newsletter 5*, Siena, pp. 33-44.

Hearthy P.J., Bonfiglio L., Violanti D., Sazo B.J. (1986) - "Age of late Quaternary marine deposits of Southern Italy determined by aminostratigraphy, faunal correlation and uranium-series dating". *Riv. It. Paleont. Strat.*, 92: 149-164, Milano.

Kindler P., Davaud E. & Strasser A. (1997) - Tyrrhenian coastal deposits from Sardinia (Italy): a petrographic record of high sea level and shifting climate belts during the last Interglacial (isotopic substage 5e). *Paleo3*, 133: 1-25, Amsterdam.

Ozer A., Paskoff P. & Ulzega A. (1980) - Essai de corrélation du Pleistocène supérieur de la Sardaigne et de la Tunisie. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 291: 801-804, Paris.

Ulzega A. & Ozer A. (1982) - Comptes-Rendus de l'Excursion-Table rond sur le Tyrrhénien de Sardaigne orientale. *INQUA*, pp. 110, Cagliari.

Ulzega A. & Hearty J.P. (1986) - Geomorphology, Stratigraphy and Geochronology of late Quaternary marine deposits in Sardinia. *Z. Geomorph.*, N.F., Suppl. Bd., 62: 119-129, Stuttgart.

Vardabasso S. (1956) - Il Quaternario della Sardegna. *Atti IV Congr. Intern. Quat. Rome-Pisa, 1953*, 2: 995-1018.

Venerandi, I., 1965. Nuove osservazioni sul giacimento ferrifero della Nurra. *Rendiconti della Società Mineralogica Italiana* 21, 317-333..

Site de Santa Margherita (Sardaigne, Italie)

Présentation du site

Localisation

Le site pilote de Santa Margherita di Pula est situé dans le sud-ouest de la Sardaigne (Sulcis inférieur) et comprend le secteur côtier de la municipalité de Pula, il se développe entre Port d'Agumu au nord et Pinus Village au sud et sous-tend le bassin des Rii. Palaceris / Santa Margherita, Su Tintiori et des bassins mineurs (Illustration1).

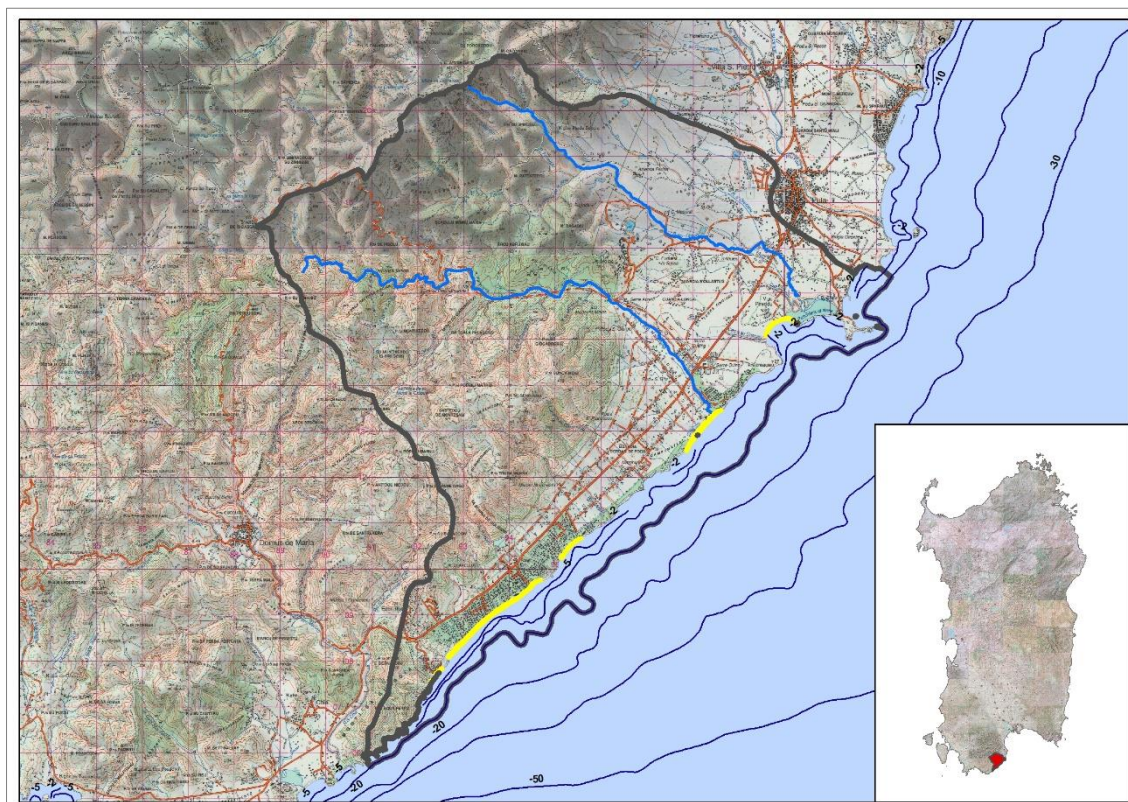


Illustration 1 - Encadrement corographique. Le bassin versant et le littoral sous-jacent.

Description géographique

Geologie

À l'exception d'une petite partie du bassin versant à formations anciennes du Cambrien inférieur-Ordovicien (ceroid calcaire, GNN, formation Campo Pisano, CPI et formation Cabitza, CAB), le bassin du fleuve pilote dans son ensemble se caractérise par une base formée dans une large mesure par des unités du complexe intrusif carbonifère-Permien, où prédomine l'unité intrusive Villacidro (VLD) à leucogranite. Ces lithotypes émergent largement dans les parties montagneuses et les contreforts du bassin, en se poussant vers la côte sur son bord sud-ouest.

Sur les bassins versants et au niveau avec des cadres de filoniane se produisent des processus d'effondrement gravitaire sur les masses rocheuses, tandis que les pentes inférieures sont

généralement caractérisées par des débris et regolitiche concentrés principalement dans les collines de franges non modifiées, fournissant directement les fonds de la vallée. Dans ces derniers, les lits de cours d'eau, recueillis ou confinés, présentent, dans les différentes configurations morphologiques (Riffle, Cascade, etc.), des volumes discrets de sédiments alluvionnaires dissous de l'Holocène (b) et actuel.

Ceci à l'épreuve des fonds très mobiles qui engendrent souvent des canaux de remplissage tels à faire supposer que dans ces traits se détermineront des solutions de continuité du transport dans le canal pendant la douce et un effet de bride dans les mêmes inondations. Parmi tous les bassins, seulement celui du Riu Tintioni manifeste de façon flagrante une abondance de sédiments alluviaux de l'Holocène (bb et b) même en dehors du contexte de la montagne et piémont. Ce sont des couvertures à large extension de surface qui chevauchent toujours les débris du Subsistema de Portoscuso (PVM2a) du Pléistocène supérieur.

Ceux-ci en tant que lithofaciès PEDEMONTANE ou comme colluvi, constituent en particulier vers SudOuest le raccord à la côte, en allant à se sceller, en fait, au pied des reliefs morphostructuraux, à savoir de la structure tertiaire tectonique N60 qui abaisse le basamento. Dans sa partie engloutie, en outre, la stratigraphie sur les granites va s'enrichir de grès gris violacé de la formation du Cixerri (CIX) de l'Éocène moyen- ? Oligocène sous-jacents de laves andésitiques (andésite Monte Arrubiu, MAB) attribués à l'Oligocène supérieur - Aquitain.

Celles-ci sont abondantes dans les contreforts et dans la bande côtière du bassin Tintioni, mais on les retrouve très clairement jusqu'à la zone Agumu sur le côté gauche du bassin Palaceris, tandis que sur le droit émergent près des falaises de Cala d'Ostia, en s'accompagnant aux cailloux continentaux et au calcaire, et continuent dans la mer, probablement jusqu'à Is Morus. À partir d'ici la formation du Cixerri en bancs arénacés rouges ou gris en amples plis (Hôtel Is Morus), tend en émergence à être oblitérée par contact direct avec les sédiments sus-jacents détritiques pleistocène (Pléistocène supérieur) de PVM2a tout en parvenant à émerger dans des espaces restreints sur les plages et surtout dans la mer sur le fond submergé dans les salles de bains en dessous de la profondeur de fermeture.



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional

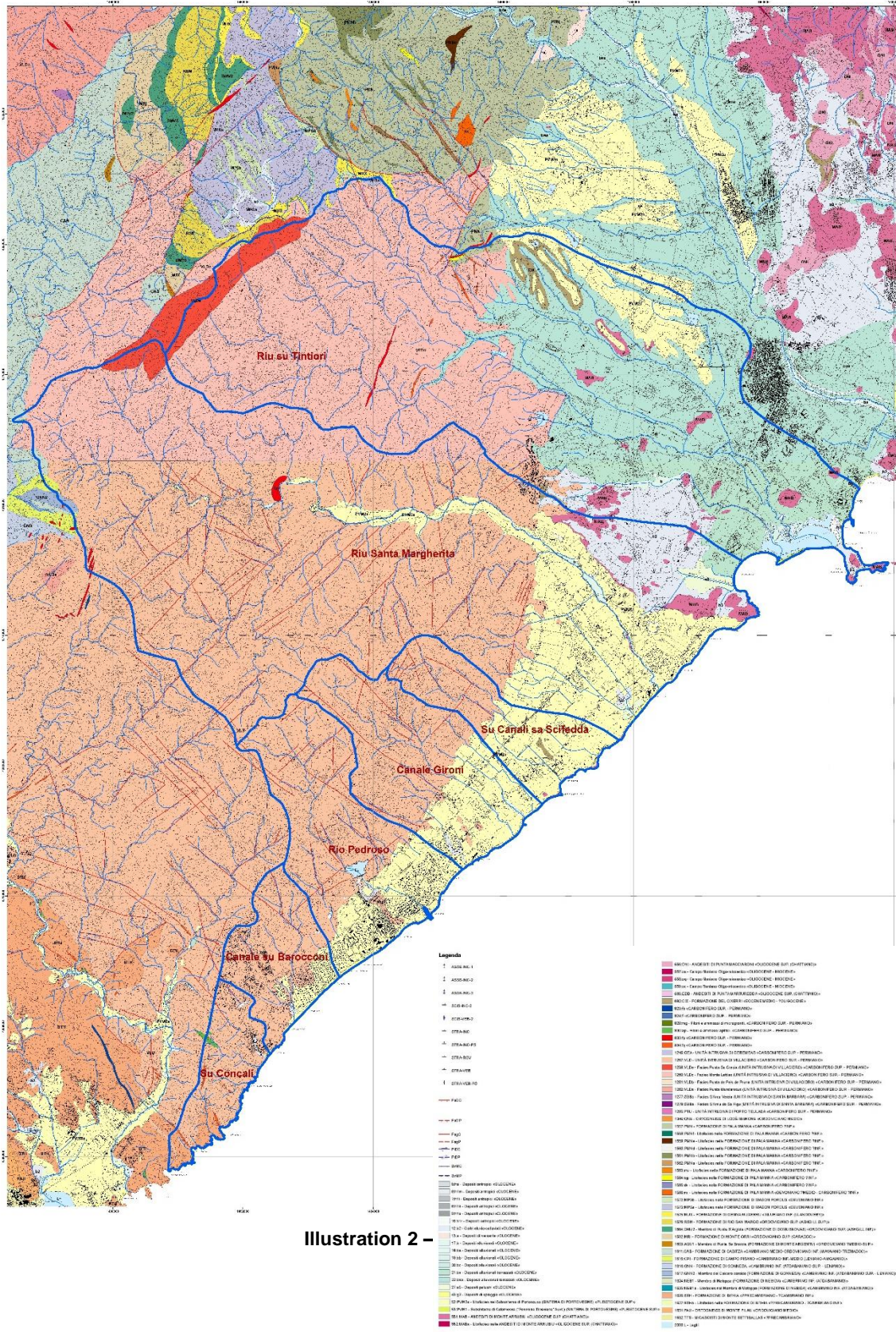


Illustration 2 -

Bassin hydrographique

Le bassin sous-tendu au secteur côtier est donné par le développement des bassins fluviaux des cours d'eau suivants (de NordEst à SudOuest):Riu su Tintiori):

1. Canale de Su Cristallu/Canale Saliu
2. Canale d'Agumu
3. Riu Palaceris/Riu Santa Margherita/Riu Foxi de Sali
4. Riu Canali de Sa Scifedda
5. Canali Gironi
6. Canale Bangiarrubiu
7. Riu Perdosu
8. Canale Su Baracconi
9. Canale de Passiali
10. Riu Su Concali

Et il a une surface d'environ 90 km² qui comprend également une série de complexes mineurs d'ordre hiérarchique faible, (Illustration2) le plus souvent s'égouttant directement dans la mer ou au bord du modeste système conoïdal sud-occidental, souvent déviés ou semi-oblitérés par les colonies.

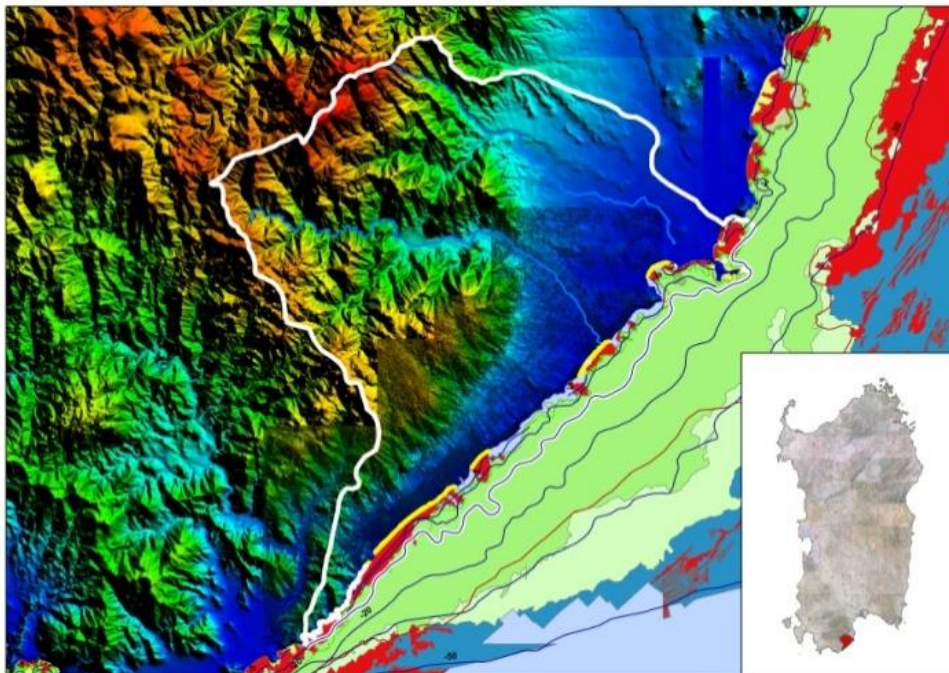


Illustration 2 - Cadre physiographique (MNT).

Le bassin versant de l'enveloppe est configuré selon une physiographie pouvant être divisée en trois parties:

1. une partie de nature du piémont et surtout alluviale centrée sur le seul Riu Tintiori, tombant dans la dénommée Piana di Pula;
2. une partie montagneuse largement dominante comprenant une grande partie du bassin Riu Palaceris, celui des mineurs à l'ouest et, au nord, le secteur montagneux du Riu Tintiori;

3. un contrefort se reliant à la zone côtière dont la marge inclinée est comprise entre 50m et 30m s. L.M. en direction nord-est-sud-ouest, mais qui est poussé vers l'amont à environ 100m s.l.m seulement dans la vallée de Palaceris

Le secteur côtier

La côte de référence s'étend du promontoire de Nora au nord-est jusqu'à presque le cap Spartivento au sud-ouest.

Aux fins de l'exposition dans cette gamme d'environ 14 km d'extension on peut distinguer, au moins quatre macroségments à leur tour séparable sur la base des éléments géomorphologiques et morphodynamiques (du nord-est au sud-ouest):

1. le port de Porto d'Agumu, marqué par une côte essentiellement lagunaire et bordé par les promontoires rocheux du cap de Pula-Punta d'Agumu (Illustration3);
2. la côte de lithologies bancaires, en grande partie du Pléistocène et sous réserve du tertiaire, avec des plages formées en prévalence de galets, entrecoupées de plages de sable en retrait et peu provisionnées qui se développent de Porto Agumu jusqu'à la bouche, sur le roc, du Riu Perdosu (aujourd'hui marqué par les projections artificielles du Port de Cala Verde), (Illustration4);
3. une large plage de sable avec une rive tournée vers l'arrière sur un cône de piémont pléistocène qui s'étend jusqu'à Cala Bernardini (Illustration5);
4. la côte à falaise de granit avec de rares et étroites plages de poche encastrées géométriquement selon la fracturation (Pinus Village), à travers falaise active avec de modestes glissements de terrain aux pieds et donnant une plage immergée (Porto de Su Scovargiu; Su Monti de Mesu), (Illustration 5).



Illustration 3 – Secteur côtier entre Nora e Agumu.

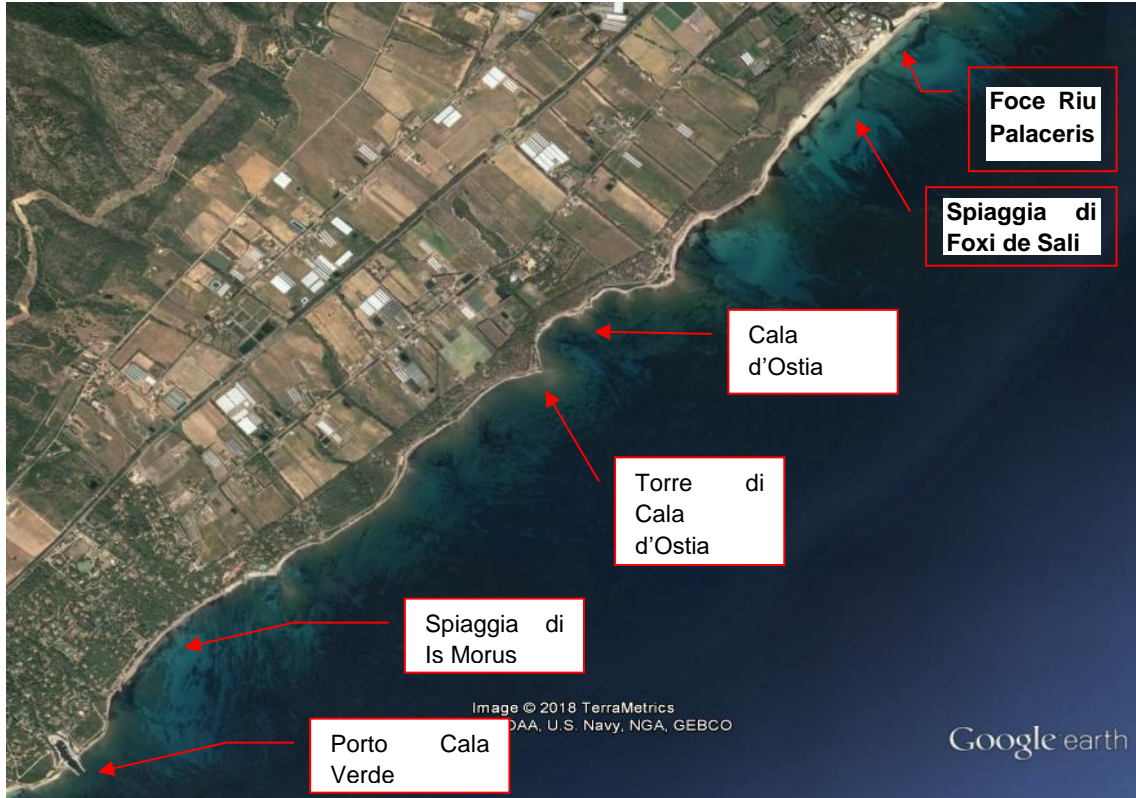


Illustration 4 – Secteur côtier entre Agumù e la bouche du Riu Perdosu Cala Verde.



Illustration 5 – Plage de Santa Margherita di Pula, da Cala verde a Pinus Village.

Caractéristiques physiographiques et écosystémiques

Du point de vue de l'écosystème la zone pilote se caractérise par la présence du site d'importance communautaire pour le réseau Natura 2000 (SCI) appelé « Entre Forte Village et Perle Marine » (morue. ITB042231).

Le réseau comprend tous les domaines identifiés et proposés, car ils contiennent des habitats et des espèces animales et végétales inscrites dans la directive Habitats 92/43 / CEE et les espèces d'oiseaux inscrites dans la directive Oiseaux 79/409 / CEE appelées Sites d'importance communautaire (SIC) et Zones de protection spéciale (ZPS).

Le Sic nommé "Entre Forte Village et Perla Marina" a une superficie de 0.32 Ha avec un développement longitudinal de 1 km.

Le plan de gestion du Sic a plutôt délimité et pris en considération une superficie beaucoup plus grande d'environ 22 hectares et avec un développement longitudinal de 2,6 km.

Les habitats d'intérêt, présents et classés dans le site comme une "priorité" sont trois: dunes côtières avec *Juniperus* spp (cod.2250), les dunes avec des forêts de *Pinus Pinea* et / ou *Pinus pinaster* (cod.2270) et des Prairies de Posidonies (*Posidonia oceanica*) (cod.1120).

Les deux premiers environnements dunaires sont souvent mixtes et difficilement séparables du point de vue cartographique; ils se trouvent dans les secteurs dunaires stabilisés à une cote allant jusqu'à 6-8 mètres au-dessus du niveau de la mer. On souligne que la présence de pins est presque certainement le boisement d'origine anthropique ou artificiel, ou encore pour la régénération spontanée après l'implantation d'arbres de pins dans les zones touristiques. Ce sont des individus morphologiquement semblables à l'espèce d'arbustes ou arborescentes (mastic et genièvre "coccolone") généralement modelées par le vent, et donc avec une allure prostrée, qui toutefois, jouent un rôle de protection et de stabilisation de la dune.

En ce qui concerne l'habitat Prairies de Posidonia, sa présence est sûre dans les grandes zones de plage immergée qui ont fait l'objet d'études, d'analyse et de suivi pour définir leur présence, leur étendue et leur caractère particulier surtout en relation aux effets et aux impacts environnementaux déterminés par la réalisation de travaux de défense et de contraste à l'érosion au cours des 15 dernières années.

Le plan de gestion du Sic a également souligné l'importance de la présence d'autres habitats non prioritaires « Dunes avec des champs de *Malcolmietalia* », que l'on peut observer dans les zones situées derrière les dunes embryonnaires et « La végétation annuelle des lignes de dérive », qui se retrouve dans les zones en face des dunes mobiles, caractérisées par la présence de searocket européenne maritime (roquette de mer) et d'autres espèces à caractère pionnier. Dans ce cas également, ce sont des zones fragmentées et sujettes à des actions perturbatrices, surtout mécaniques.

Un autre habitat non prioritaire, près du Sic, est représenté par des « Falaises avec végétation côtière méditerranéenne avec *Limonium* spp endémique »: il s'agit de zones à haute valeur naturelle, généralement sur des substrats andésite, sur lesquelles est présente une couverture végétale discontinue et une rare présence d'espèces endémiques, y compris le *Limonium Tigulianum*, une espèce exclusive du sous-secteur biogéographique du Sulcis.

Connaissances disponibles

La zone côtière de Santa Margherita di Pula a été particulièrement touchée depuis quelque temps par des perturbations hydrogéologiques érosives sur certains recoins sablonneux qui la caractérisent et qui, dans certains secteurs, depuis une quinzaine d'années, ont rendue nécessaire. La mise en œuvre de mesures de protection, en plus de diverses solutions tampons saisonnières ou d'urgence. Ces interventions, ont porté en particulier sur le secteur de la plage devant le complexe appelé Forte Village Resort, qui pour diverses raisons dont on discutera plus tard, semble être le plus souffrant, malgré sa vocation touristique particulière.

La zone, pour son intérêt, a également fait l'objet de recherches scientifiques approfondies, auxquelles on fait référence en marge, et de plusieurs études, projets et suivis, brièvement énumérés ci-dessous:

1. « Projet de restauration du littoral devant le Forte Village Resort » (2003) qui impliquait une alimentation en sable de carrière d'environ 15 000 m³, dont seulement 1 500 m³ ont été déversés; pour l'exécution de ces travaux, des études géologiques, granulométriques et minéralogiques ont été effectuées;
2. "projet de sécurisation du littoral devant le Forte Village Resort" (2006) qui impliquait la construction de 7 barrières soufflées constituées de géotubes remplis de sable provenant d'une carrière appropriée. Le projet a été précédé de deux années de surveillance correntométrique et ondamétrique et, à la suite de sa mise en œuvre en 2009, a été réalisé un suivi triennal de ses caractéristiques morphologiques et environnementales;
3. "projet d'enlèvement des ouvrages de protection du littoral devant le Forte Village Resort avec reprise simultanée du sable résiduel dans la plage émergée - intervention localisée à la suite des dégâts causés par la tempête du 1/7 mars 2013", réalisée en 2014 et 2017, avec le déplacement total d'environ 1400 m³ (800 en 2015 et 600 en 2017) des sédiments provenant des géotubes visés au point précédent, désormais endommagés; Pendant les travaux, les composantes environnementales du site ont été surveillées.

Dans la même zone, une autre intervention a été récemment organisée, intitulée "Entretien périodique du littoral devant Forte Village Resort - Intervention nutritionnelle annuelle de moyenne entité conformément au décret ministériel n ° 173/2016", qui a été soumise à la procédure d'EIE, à cause de l'impossibilité d'exclure des impacts environnementaux négatifs et significatifs pour l'intervention en question

État des connaissances

Aleas cotiers

Evolution du trait de cote

L'analyse globale de l'évolution du littoral, issue de l'observation d'orthophotos historiques, montre une tendance générale de la plage à se réduire dans son secteur oriental. Toute la plage et en particulier le tronçon devant la structure réceptive du Forte Village Resort, a subi au cours des 60 dernières années des reprises du littoral d'entité variable entre 15 et 35 m (Illustration7)



Illustration 7 Évolution récente 1977-2008, tirée de PAC (Coastal Action Program, RAS - Onglet des plages très vulnérables)

Submersion marine

Comme mentionné dans l'introduction, toute la côte de Santa Margherita di Pula est affectée par les perturbations hydrogéologiques côtières qui affectent les espaces sablonneux ou parfois caillouteux, les falaises ou plus souvent les rochers. Au-delà de la vulnérabilité naturelle liée à l'environnement côtier et à la morphodynamique associée, à la base de l'état général du déséquilibre géomorphologique, il semble exister une certaine stratification des causes, souvent concomitantes, liées aux eaux maritimes et continentales.

Plans de prévention

En Sardaigne, il n'existe pas de plan de prévention des risques côtiers (érosion et / ou inondations), cependant, tout au long de la circumnavigation de la côte sarde, dans le cadre du plan de gestion des risques d'inondation, une étude a été réalisée, la cartographie du danger d'inondation des événements météorologiques, constituant la condition préalable à la préparation de la cartographie du risque d'inondation requis par le plan de gestion des risques, conformément à la directive 2007/60 / CE et décret législatif 23 Février 2010, n. 49.

Enjeux littoraux présents

Toute la zone côtière de référence est exposée à la dynamique saisonnière du temps marin hivernal. Le principal élément de risque est actuellement représenté par les installations d'hébergement du Forte Village Resort. Le tronçon en face d'une telle structure qui apparaît plus sensible à la relégation du littoral, dans un contexte qui, cependant, doit être considérée comme très dynamique dans l'espace, ainsi que dans le temps, au cours des saisons, en partie pour des raisons déjà expliquées.

En outre, dans la région côtière nord-est de Cala Verde, plus précisément dans Is Morus, sont détectables différents processus de rétraction et des phénomènes d'effondrement (Illustration 8) au niveau du Paléolithique mûr qui ont connu une croissance des développements résidentiels et touristiques populaires.

Enfin il y avait, à la suite des dépôts fréquents des restes de Posidonia océanique, l'arrêt périodique du port touristique de Cala Verde, qui obligeait les concessionnaires à de fréquentes opérations d'enlèvement et au nettoyage de l'étendue d'eau.



Illustration 8 – L'emplacement I Morus. Effondrement des phénomènes sur la berge rocheuse



Illustration 9 – Resort à Forte Village - Photo du 19/03/2018. Début de la section au désarrangement maximum. Photo du Nord Est au Sud Ouest

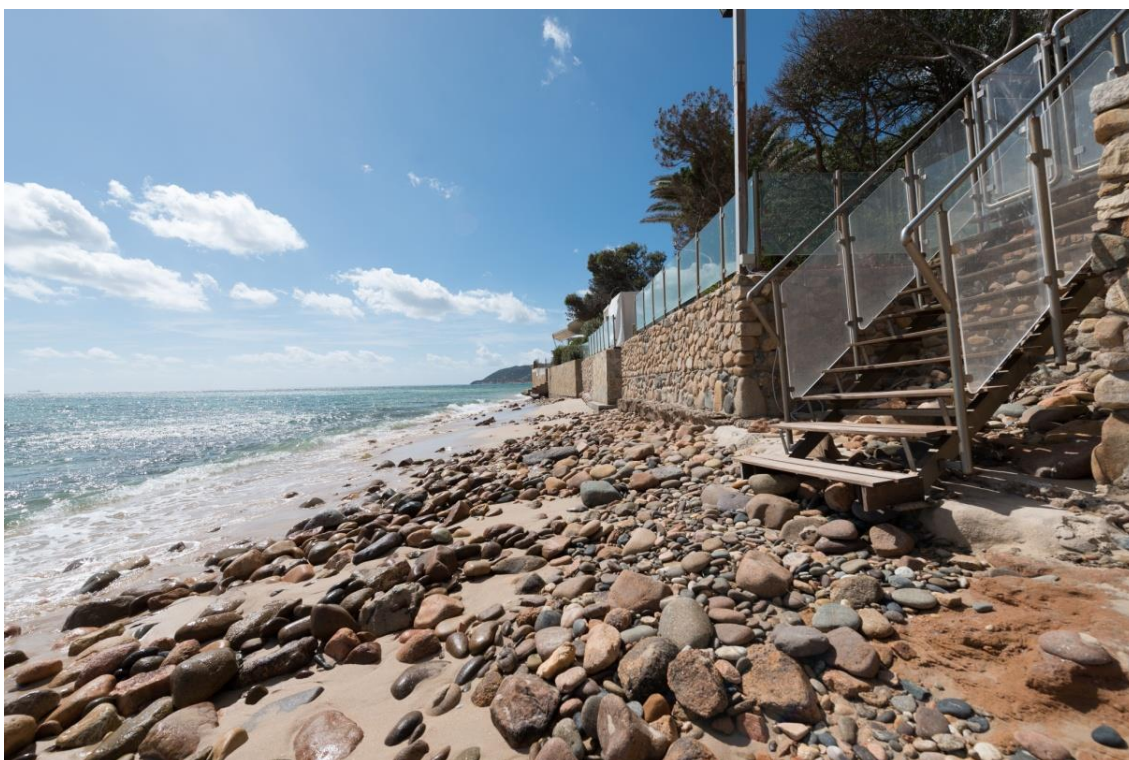


Illustration 10 – Forte Village Resort - Exhumation des volumes de cailloux par l'enlèvement drastique de sable vers la plage dynamique submergée et érosive qui passe sous le bâtiment, l'endommageant



Illustration 11 – Resort di Forte Village - La Swash zone interessa la struttura muraria in quanto l'assetto di spiaggia è privo di berma. La conllustrationzione del manufatto è precaria



Illustration 12 – Forte Village Resort - La zone de swash affecte la structure du mur car la structure de la plage est dépourvue de berme. La configuration du produit est précaire



Illustration 13 – Forte Village Resort - Souillement actuel de la fondation du mur.



Illustration 14 – Is Morus village résidentiel - Dommages structurels au mur qui délimite la structure.



Illustration 15 - Est-Morus village résidentiel D'autres dommages structurels à la clôture qui délimite la structure touristique.

Conclusion

Rappel de la problématique du site

Ci-après, en bref, les principaux problèmes de la zone pilote:

1. Réduction drastique de l'approvisionnement en eau torrentielle solide et du réseau hydrographique du premier ou du second ordre (sensu Horton-Strahler), conséquence de la réduction des apports d'eau vers la côte, provoquée par les habitations.
2. Réduction progressive de l'apport de matériaux solides due à l'absence totale d'entretien du lit du torrent (gestion des sédiments) et à la formation de brides naturelles dues à une inondation excessive (Riu Pula et Riu Palaceris-Santa Margherita).
3. Réduction drastique des eaux de ruissellement pour la création de réservoirs artificiels, plus ou moins importants.
4. Le retrait décennal de la berme des restes de *Posidonia oceanica* avec une vulnérabilité sensible de l'équilibre géomorphologique saisonnier régulant la morphodynamique elle-même et finalement la résilience de la plage concernée.
5. Augmentation relative de la réflectivité des parties du site due à la présence de structures rigides qui limitent la berme et donc la dissipation d'énergie de l'onde.
6. Augmentation relative des volumes sableux retirés de la plage immergée au niveau avec les secteurs visés au point précédent.
7. Interruption de l'échange longitudinal le long de la côte en raison de l'intervention de structures transversales (Port de Cala Verde).
8. Soustraction décennale définitive des volumes sablonneux provenant de la remise en état du colmatage de *Posidonia oceanica* dans le port de Cala Verde.
9. La relative susceptibilité érosive des lithotypes pléistocènes constituant les dorsales récurrentes, qui génère principalement l'érosion locale ou les glissements de terrain de parties relativement petites

Réprésentativité transfrontalière du site

Le site de Santa Margherita, en raison de ses caractéristiques physiographiques, écosystémiques et environnementales, présente un besoin évident d'adopter une approche intégrée de planification avec une analyse des principaux aspects environnementaux (équilibre sédimentaire, mouvement des vagues, habitats et écosystèmes), etc.).

De plus, en raison de ses caractéristiques territoriales et urbaines particulières et de la présence généralisée d'éléments à risque, il est important pour la gestion du risque côtier à des fins stratégique transfrontalière et pour son application dans des zones présentant des caractéristiques physiographiques comparables.

En plus des aspects spécifiques liés au «risque d'érosion côtière», les éléments qui rendent la zone significative pour les aspects transfrontaliers sont configurés dans ses caractéristiques géologiques, géomorphologiques et écosystémiques qui peuvent être trouvées dans toutes les autres régions transfrontalières.

Bibliographie

De Muro S. (2013) - Progetto pilota di gestione ambientale integrata in un'area contermina alla foce del Rio Santa Margherita nel Comune di Pula

Di Gregorio, F., Federici, P. R., Fierro, G. & Ginesu, S. (1998) - Atlante delle spiagge della Sardegna, Fogli (167, 168, 179, 180, 192, 199, 205, 208, 219, 216, 224, 227, 232, 234, 235, 239) R.A.S, Cagliari.

Di Gregorio F., Atzeni A., De Muro S. & Piras G. (2004) - Carta del Rischio Geoambientale nelle coste della Sardegna – 2004 pubblicato unitamente a: Di Gregorio F., Federici P.R., Fierro G., Ginesu S. -Atlante delle spiagge della Sardegna.

Di Gregorio F., Pusceddu, M. & Serreli, A. (2009) - Valutazione del rischio costiero mediante tecniche GIS del litorale di Pula (Sardegna Sud-occidentale), 903–908.

Kalb C (2008),– I sedimenti superficiali della piattaforma interna del Golfo di Cagliari. Relazioni tra moto ondoso, correnti indotte e processi di sedimentazione su sistemi di spiagge campione – Dottorato di ricerca in Scienze della Terra - XX ciclo – Università di Cagliari.

Pusceddu M. (2008) - Database geografico e applicazioni gis per l'analisi geoambientale della fascia costiera di Pula (Sardegna SO)- Dottorato di Ricerca in Difesa e conservazione del suolo, vulnerabilità ambientale e protezione idrogeologica. Ciclo XIX. Pp.153. Università di Cagliari.

Sole F.M. (2015) - Valutazione della vulnerabilità delle coste della Sardegna a fenomeni di erosione ed inondazione dovuti all'impatto degli eventi estremi meteo- marini. Dottorato di Ricerca in Difesa e conservazione del suolo, vulnerabilità ambientale e protezione idrogeologica - Ciclo XXVIII. Pp.154. Università di Cagliari.

Temi srl – Ingegneria per la sostenibilità (2006) Piano di gestione dei Siti Natura 2000 – “Tra Forte Village e Perla Marina” (cod.ITB042231).

Site de Torre delle Stelle et Solanas (Sardaigne, Italie)

Présentation du site

Localisation

Le site pilote de “Geremeas - Torre delle Stelle - Solanas” est situé dans le sud-est de la Sardaigne, dans les municipalités de Quartu Sant’Elena, Maracalagonis et Sinnai et est inclus dans une large bande côtière, caractérisée par la présence de caps et de falaises à composition granitique dominante, en alternance avec des plages sableuses et graveleuses.

Le système côtier limite le golfe de Cagliari à l’est, entre Capo Boi à l’est et Torre di Cala Regina à l’ouest et sous-tend les principaux bassins versants suivants et une hydrographie complémentaire mineure (Genn’e Mari et Portu Perdosu) essentiellement montagneuse et à basse hiérarchie, d’où proviennent les principaux apports sédimentaires qui alimentent les plages étudiées (Illustration 1):

- Riu Murtaucci (Plage de Murtaucci, Mari Pintau);
- Riu Geremeas (Plage de Geremeas);
- Riu Baccu Mandara (Plage de Geremeas);
- Riu Gavoi (Plage de Cann’e Sisa - Genn’e Mari);
- Riu Solanas (Plage de Solanas).

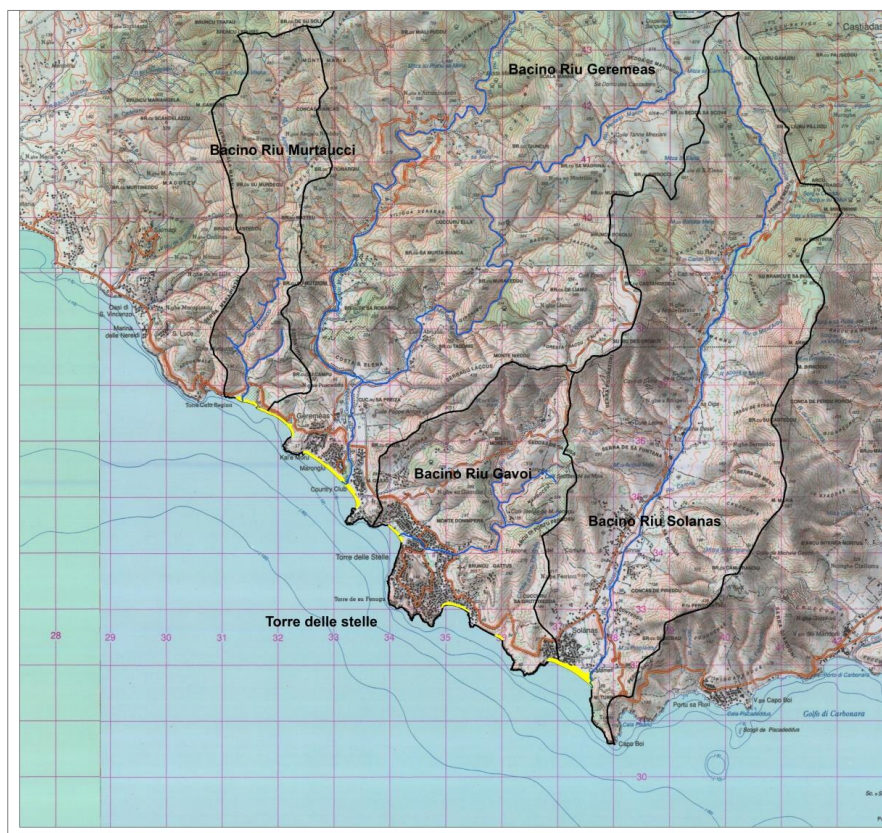


Illustration 1 - Cadre géographique du site pilote.

Représentatif du tronçon de haute côte, l'objet spécifique d'analyse et d'étude est le large promontoire (Illustration 2), situé dans le territoire de Maracalagonis, dans la zone résidentielle de Torre delle Stelle inclus dans le tronçon de la côte qui va de la plage de Genn'e Mari à la plage de Cann'e Sisa; pour une longueur totale d'environ 1-2 km. La zone est cartographiée dans la feuille 567, section IV de la carte topographique de l'Italie, à l'échelle 1:25.000 - Geremeas - et dans le document technique régional numérique de la région Sardaigne (CTR) 567050 et 567010 à l'échelle 1:10.000.



Illustration 2 - Cadre géographique du site pilote (promontoire Torre delle Stelle).

Description géographique

Géologie

L'ensemble du bassin, entendu comme l'enveloppe des quatre bassins principaux qui le constituent, est entièrement structuré à l'intérieur d'un substrat rocheux à Granitoïdes du complexe intrusif et filonien d'âge Carbonifère - Permien et de couvertures sédimentaires alluviales, éoliennes et de la pente, généralement Pléistocène supérieur et surtout holocène. Les seules plages de Murtaucci à nord-ouest et de Portu Pedrosu au sud-est sont en contact direct avec des portions de coteaux inclusifs de Conglomérats de la Formation de Ussana du Miocène (respectivement reg. Canaleddus et reg. Serra Cazzola) dont les débris des pentes, souvent "dans glissement de terrain", fournit la côte de volumes solides.

Pour cette raison, ces plages montrent une configuration tout à fait différente des contextes restants, en particulier en ce qui concerne la taille des particules (galets) sur les zones émergées et immergées; ce qui les rend évidemment plus résistantes aux problèmes d'érosion, saisonnière ou non (Illustration 3).

En se référant au seul substrat, en raison de sa prépondérance, on distingue les lithofaciès suivantes:

- Bassin de Riu Geremeas: **GEA_d**, **GEA_e**, **GEA_c** principalement avec une minorité **GGO_a** et **GGO_b**;
- Bassin Riu Solanas: **GEA_d** à droite hydrographique et **GEA_f** à gauche;
- Bassin de Riu Gavoi: **GEA_c** dans le cadre principal et **GEA_d** dans la partie supérieure gauche du bassin, **GEA_a** dans la partie côtière et décidément subordonné;
- Bassin de Riu Murtaucci: **GEA_c** en grande partie et **GEA_e** seulement dans la zone de montagne.

- GEA_f**: leucogranites biotitiques blanchâtres à moyen-fin, équigranulaire.
- GEA_d**: granodiorites monzogranitiques à grain moyen, hétérocellulaires à phénocristaux de Kfs pluricentimétriques.
- GEA_e**: leucogranites biotitiques rosés à grain moyen, porphyriques à répartition équigranulaire, pour Qtz globulaire et Kfs rosé centré-centré.
- GEA_c**: granodiorites biotitiques-amphiboliques, à grains larges, blanc-rose, inéqigranulaires, localement porphyriques pour les mégacristaux kfs. Ils constituent les litofacies dominantes.
- GGO_a**: monzogranites biotitiques équigranulaires gris, à grain moyen, localement micro porphyriques.
- GGO_b**: leucosienogranites biotitiques équigraneux blancs à grain moyen.

Aux intrusions, sont tardivement associés des porphyres de granit (**fp**) et certains types de brins et de grappes (**AP**, **mg**, **fb**), orientés en grande partie NNW-SSE et NNE-SSW. Le complexe filonien montre une variabilité prononcée et comprend deux faciès mélanocrate et leucocrate, les premiers disposés fréquemment aux salbandes des filons leucocrates, incorporant ceux-derniers parfois des portions à caractère mafique. Parmi les filons melanocrates sont inclus tous les produits de base, reconnaissables sur le terrain en raison de leur coloration foncée et de la présence d'abondantes espèces minérales mafiques telles que biotite, pyroxènes et olivine. Ces champs sont souvent plus ou moins altérés, jusqu'à argilisés. P

Parmi les filons leucocrates, diverses distinctions sont possibles en utilisant des critères structuraux et texturaux macroscopiques, ainsi que de composition. Dans son ensemble le système filonien présente une épaisseur variable et il est intrusif avec une orientation en fonction des fractures qui montrent une prédominance directionnelle, c'est-à-dire ceux qui ont une orientation NNW-SSE, direction commune à la plupart des systèmes filoniens du sud Sardaigne (Ghezzo & Orsini, 1982; Atzori & Traversa, 1986; Ronca & Traversa, 1996), (Illustration 4). Vraisemblablement, l'âge du système filonien est attribué au Permien.

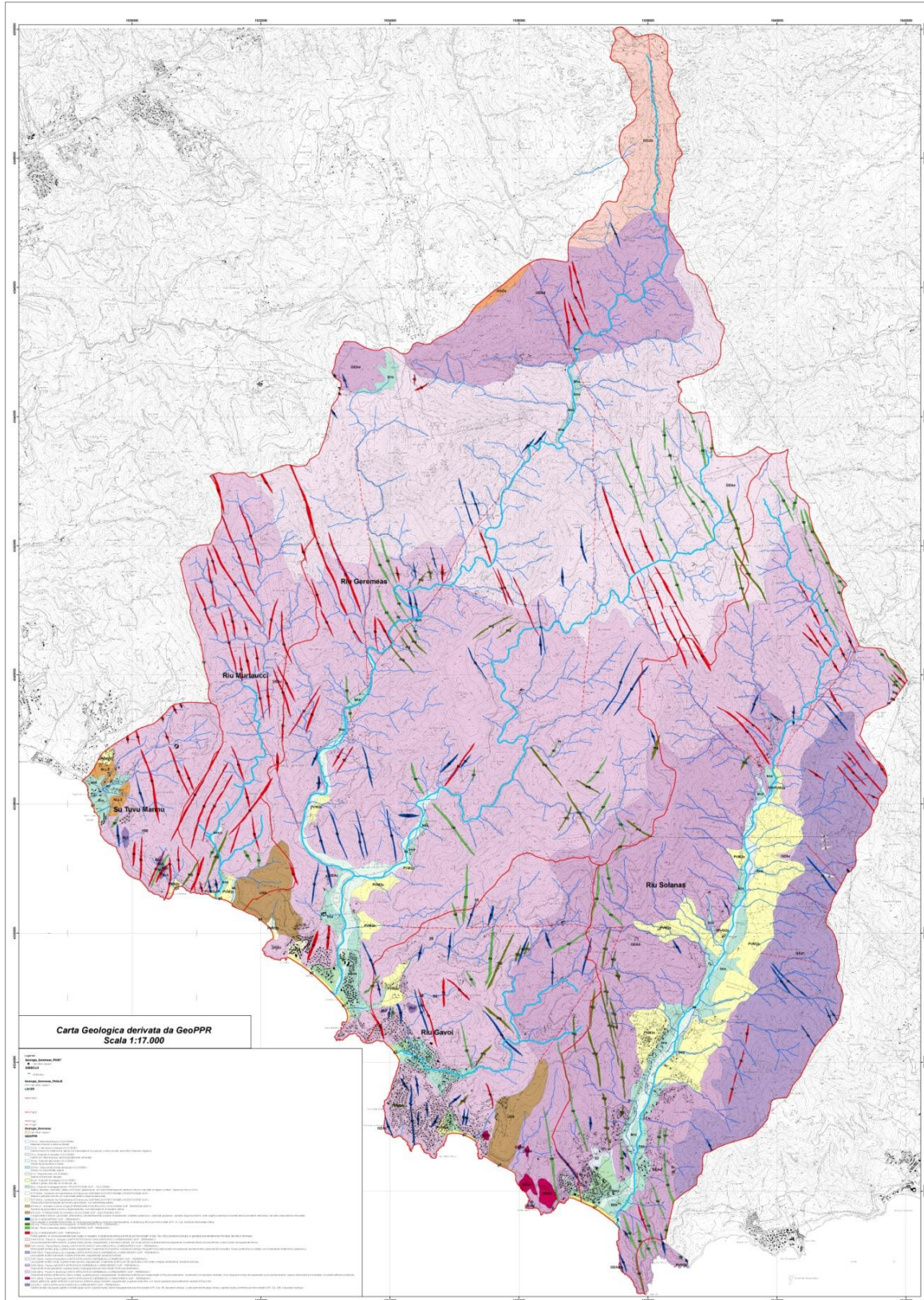


Illustration 3 - Cadre géologique général.

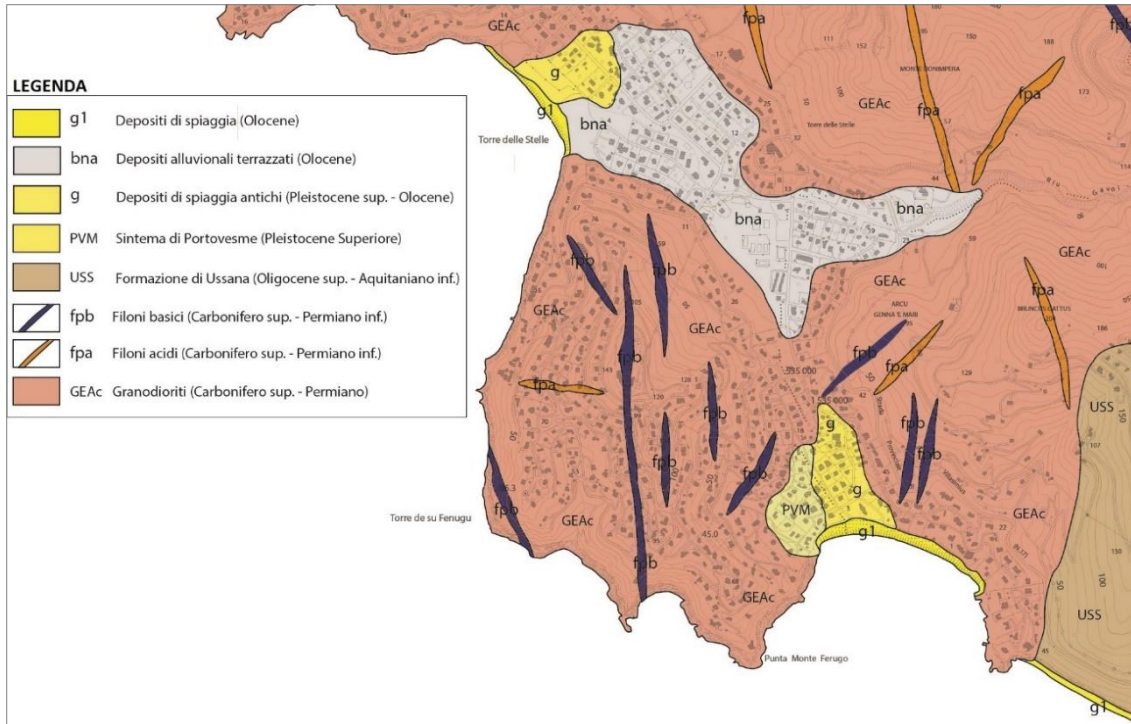


Illustration 4 - Cadre géologique - Le promontoire de Torre delle Stelle.

En plus de la formation Ussana déjà mentionnée, les couvertures sont réduites à de seuls sédiments alluviaux Pléistocène et Holocène qui occupent plus ou moins diffusément le contour du réseau hydrographique principal et peuvent être reliés aux sédiments de pente placés dans les franges les plus élevées et/ou le substrat raide.

Les inondations Pléistocène (**PVM_{2a}**): (Portovesme, système Pléistocène supérieur) constituées par des sédiments continentaux de graviers alluviaux terrassés varient en taille de moyenne à grossière avec des sables subordonnés datant après la fin de l'avant-dernière phase froide Pléistocène (Vardabasso, 1956; Comaschi *et al.*, 1959; Ozer *et al.*, 1980; Ulzega *et al.*, 1982; Belluomini *et al.*, 1986; Hearnthy *et al.*, 1986; Ulzega & Hearnthy 1986; Kindler *et al.*, 1997) et celles holocènes (**b_{na}**: alluvions mitoyenne, Holocène) se produisent bien rangées mais surtout très abondantes, répandues et généralisées, en particulier dans la zone de captage du Riu Solanas où, pour des raisons liées à la mise en structure du réticule et de la tige principale, caractérisant le fond de la vallée sur plus de 7 km en amont de l'embouchure, ne génèrent cependant pas de véritable plaine élargie sur la côte.

Les inondations actuelles sont celles qui sont en contact direct avec les lits des rivières et elles influencent la tendance géométrique car les conditions locales de surinondation imposent des trajectoires différentes. Ces tendances sont particulièrement évidentes sur l'ensemble des contreforts du Riu Solanas alors qu'elles sont plus limitées dans le Riu Geremeas et dans ses deux affluents. Sur le côté Sx de Riu Solanas, au niveau des lithofaciés GEA_r et GEA_c et des têtes en amont du réseau de drainage, se trouvent les principaux organes de glissement de terrain courants (**a**) constitués par des pierres de cailloux et par des cours d'eau (Monte Arbu, 693 m, Monte Minni Minni, 725 m) qui sont généralement bien reliés au système de distribution des principaux lits des rivières. En marge de la zone côtière, (**d**) sont également disponibles des dépôts éoliens discontinus et remontant à l'Holocène.

Bassin hydrographique

L'enveloppe des bassins versants des sept principales plages étudiées, de forme approximativement triangulaire, allongée vers le nord, est délimitée par une surface d'environ 118 km² qui, au niveau avec la partie montagneuse du bassin du Riu Geremeas (Riu Sa Ceraxa), dépasse les 1000 m d'altitude à Punta Su Baccu Malu et Punta Sa Ceraxa (1016 m), dans le massif de Sette Fratelli sur le territoire de San Vito.

Le **Riu Geremeas**, le plus important pour l'amplitude du bassin de 62 km² de surface sous-tendue à un lit de 36 km, est généré à environ 2 km de l'embouchure (13 m), à partir de la confluence du Riu Su Suergiu Mannu à Dx et Riu Su Meriagu Mannu (les deux pas limitrophes dans les 2 derniers kilomètres en amont de la confluence) à Sx, en aval de laquelle le ruisseau, devenu de 5ème ordre (Horton-Strahler sensu), coule au sein d'un secteur de transfert alluviale avec des caractéristiques géomorphologiques explicites contreforts, passant dans peu d'espace aux côtiers. L'embouchure Quartu Sant'Elena n'est pas particulièrement instable, et a une légère tendance à migrer du sud, bande de plage sur laquelle passe la limite municipale entre Quartu Sant'Elena et Maracalagonis.

Le **Riu Solanas** a un motif rectiligne avec un seul tronç principal sur lequel plusieurs affluents mineurs se greffent avec des pentes accentuées, en particulier par la gauche. Bien que d'une superficie égale à un peu moins de km², il est sous-tendu à un lit de rivière de juste 13,4 km, sa caractéristique morphométrique la plus évidente consiste à prendre l'ordre numéro V dans un tronçon relativement plus montagneux par rapport au Riu Geremeas en raison d'une densité de drainage plus élevée. Sous le profil physiographique est indéniable la plus grande importance du secteur piedmont de la vallée, où le canal ne se limite pas, mais se développe dans une vaste zone alluviale d'environ 1 km d'ampleur dans la partie amont de Cungiaus Mannu (immédiatement en aval de la première section de 5ème ordre) et, plus en aval, à environ 1,5 km en aval de Costa sa Suergia. Le long de ce tronçon, la rivière manifeste ainsi des tendances de diversification claires avec une structure errante au sein de fortes alluvions holocènes également en terrasses. L'embouchure est plus ou moins dynamique avec une tendance à s'ouvrir sur la marge sud-est de la plage de Solanas (Sinnai).

Le **Riu Gavoi** est un bassin sous-dendritique du 4ème Ordre d'environ 13 km² sous-tendus à un lit de rivière de 6,5 km avec son embouchure sur la plage de Cann'e Sisa (Maracalagonis). Sa particularité réside dans le fait que la rivière principale est en grande partie confinée et dans la zone de montagne physiographique, à l'exception du dernier kilomètre correspondant au secteur de l'installation touristique, le seul à être affecté par les sols de débris.

Le **Riu Murtaucci** est un bassin du 4ème Ordre d'un peu plus de 9 km² et un lit d'environ 6 km, avec un motif sous-dendritique, en particulier dans la région physiographiquement plus montagneuse. Le lit de la rivière atteint la mer dans un état de contreforts physiographiques limité à un tronçon de seulement 0,5 km, le seul à être affecté par des couvertures importantes du sous-sol et aussi particulièrement chargé de sédiments sur le fond.

Les côtes basses sableuses

Le tronçon côtier de référence fait partie de l'Unité Physiologique n°8 du CAP (Programme d'Action Côtière) de la Région de la Sardaigne (2014). Les plages, émergée et submergée, sous-tendant l'enveloppe des bassins versants précités, sont au nombre de sept :

1. Murtaucci (Riu Murtaucci);
2. Mari Pintau (Riu Murtaucci);

3. Geremeas - Baccu Mandara (Riu Geremeas);
4. Cann'e Sisa (Riu Gavoi);
5. Genn'e Mari (Canale Genn'e mari);
6. Porto Perdosu (Canale di Portu Perdosu);
7. Solanas (Riu Solanas).

Ce sont des plages de poche toutes exposées au sud-ouest par rapport à la structure morphostructurale du profil côtier, dont les projections les plus importantes avec le fond peu profond immergé, favorisent l'isolement d'au moins 5 cellules sédimentaires confinées à la mer par la limite supérieure de la prairie de *Posidonia oceanica*, probablement structurée sur un fond marin rocheux altéré.

Une telle configuration géomorphologique suggère que le stock de sédiments piégé de temps en temps dans chaque cellule (en référence au niveau actuel de stationnement):

- ne comprend pas seulement des sédiments sableux;
- est volumétriquement plutôt modeste par rapport à d'autres situations sardes;
- est conditionné par ses caractéristiques hydrogéomorphologiques;
- il est en quelque sorte proportionnel à l'entité territoriale du bassin hydrographique sous-tendue à chaque plage, mais plus encore aux volumes des couvertures mobilisables (Solanas par exemple);
- et que les plages ont commencé à l'époque historique.

La présence dans la plage de volumes d'une composante plus ou moins importante de sédiments grossiers, à la fois caillouteux et graveleux, apparaît donc compatible avec la structure de toutes les plages, et pas seulement celles qui émergent de **Murtaucci** et de **Porto Perdosu**. Ceci est dû à la présence de foyers sous-jacents aux contextes alluviaux en terrasses et à la proximité latérale des secteurs de falaises dans un recul gravitaire évident dû à l'effondrement et/ou aux érosions canalisées (Punta Cabudi, Punta Fenugu, Torre delle Stelle, Bruncu de Su Monte Moru). La relative modestie des volumes rend ces contextes encore plus similaires aux compendiums de sable du nord-est de la Sardaigne (Coste Rias) qui sont d'ailleurs comme ceux-ci morphodynamiquement moins exposés mais sédimentairement plus vulnérables et dépendants de la gestion sédimentaire/hydrologique des bassins versants. Dans ce contexte général, la disparition ou la réduction de la dune non-naturelle détermine une autre défaillance grave du facteur morpho en ce qui concerne la stabilité de la ligne de la côte, car elle réduit la capacité d'autonomie du système, voire sa capacité de résistance.

Dans le contexte étudié, les plages (Illustration 5), les deux compendium de sable que, plus encore, les graveleux et caillouteux, déduction faite de l'influence évidente de hydrodynamisme dans divers scénarios climatiques anemologicaux et des vagues, sont, comme mentionné ci-dessus, en particulier soumises à une surveillance géologique. Il s'agit de plages microtidales correspondantes à des cellules sédimentaires isolées avec un faible stock de sédiments, généralement délimitées à la mer par des *Posidonia oceanica* et des élévations morphostructurales du substratum. La plupart d'entre elles sont connectées en amont avec des systèmes hydrographiques qui, selon la dynamique impulsive, leur fournissent des sédiments naturels; d'autres sont situées au pied des pentes dans des roches cristallines souvent altérées ou avec de rares toits pléistocènes. Leurs caractéristiques morphodynamiques ne sont pas les mêmes, soit à cause de l'exposition aux éléments du climat des vagues et de leur développement en longueur, soit à cause de l'influence géologique. Avec cette expression on entend à la fois les caractéristiques granulométriques des plages que celles clivométriques- morphologiques des éléments émergés et immergés des fonds rocheux, qui sont présents à des profondeurs inférieures à celles de la fermeture.

Les sables qui les constituent sont, dans un tel contexte, en particulier silicoclastiques, avec une composante bioclastique résultant généralement de la proximité et de l'activité biogénique de la prairie de posidonie qui, à son tour, peut se placer au niveau des franges modifiées du stand, c'est-à-dire d'importantes réserves de sédiments terrigènes.

Sur elles, dans une première approximation et sur la base des connaissances disponibles, on relève en particulier des conditions de rupture qui sur le plan morphodynamique peuvent être mises en relation aux profils de plages "intermédiaires", selon la typification de Masselink G. & Short AD (1993).



Illustration 5 - Identification et localisation des plages.

Murtaucci e Mari Pintau

Ces plages (Illustration 6), bien que discontinues sur la surface, font partie de la même cellule sédimentaire et leurs morphodynamiques sont certainement soumises à une surveillance géologique. L'alimentation sédimentaire souffre d'admission de flux de drainage dans la cellule et de l'action gravitaire sur le côté en contact direct, et pour cela, bien que planimétriquement non perçues, elles sont sensiblement stables par rapport à la dynamique d'érosion saisonnière/plurisaisonnière puisque elles sont "protégées" par la structure géologique et décidément favorisées par les caractéristiques sédimentologiques des sédiments. Sur la plage, il est apparu en fait sans aucun doute le caillou et le gravier lithofaciés qui, par contre, résultent enterrés par des sables dans le submergé.

L'effet actionné par le rebord rocheux Bruncu Su Monte de Moro favorise de ce côté le piégeage de plusieurs volumes copieux de sable en face de Mari Pintau par opposition à Murtaucci qui se caractérise par la nature même des lithofaciés tertiaires de la pente (USS, Formation d'Ussana).

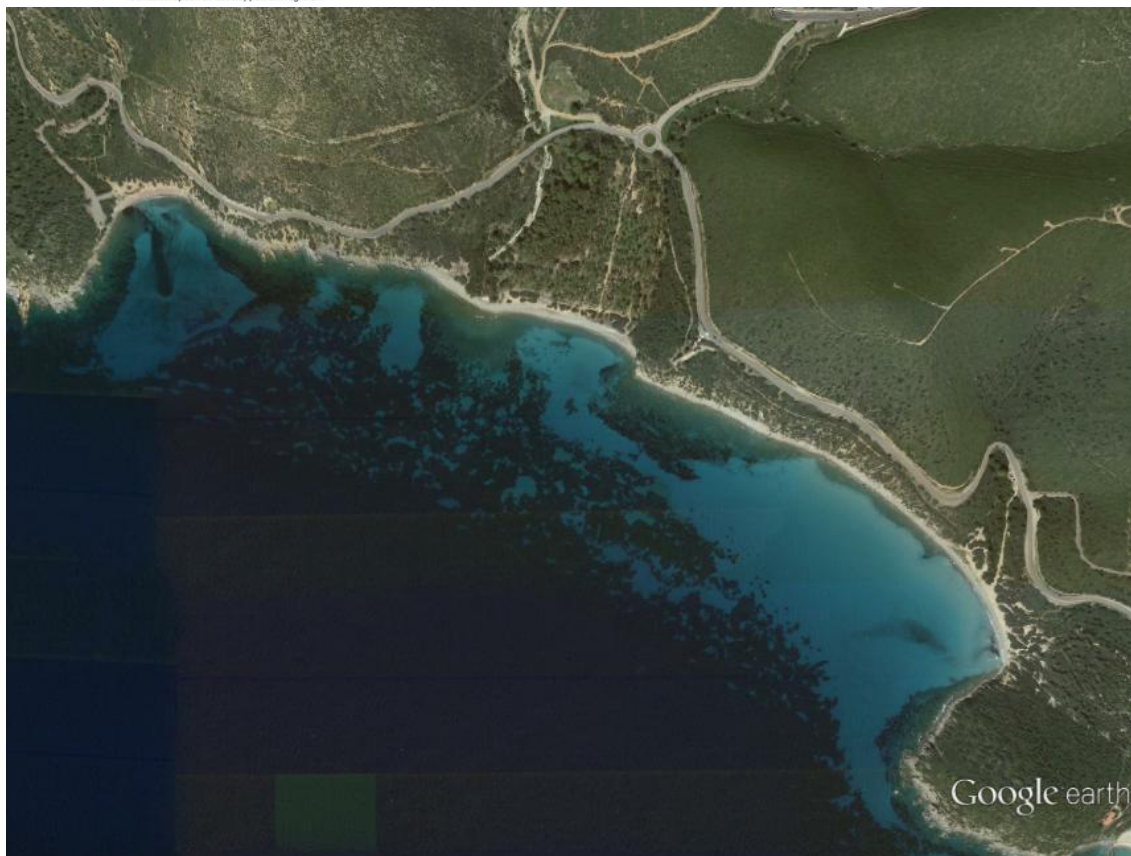


Illustration 6 - Plage et cellule sédimentaire de Murtaucci - Mari Pintau.

Geremeas e Baccu Mandara

Le recueil de Geremeas est situé dans une forme trapézoïdale avec des cellules sédimentaires longitudinale opposée en contact avec la limite supérieure de la Posidonia d'environ 1700 m (ligne jaune en pointillés sur L'illustration 7) définie par deux pattes rocheuses Monte Oru à nord-ouest et Baccu Mandara à sud-est et actuellement alimentée par le ruisseau Geremeas. Il est un développement de la plage égale à 1465 m de long sur la rive et de 1366 m dans une direction droite (en pointillé rouge) longitudinalement à partir d'une extrémité (ligne rouge en pointillé), avec un développement transversal de 580 m de profondeur (en pointillés blanc) dont 85 m du secteur ont émergé (du backwater au littoral). La cellule à l'intérieur comprend également la petite plage de Baccu Mandara, isolée de la cellule par son fond rocheux.

Comme on le voit sur la photo aérienne, la cellule sédimentaire est marquée par des affleurements de grandes zones rocheuses sur le fond, pour signifier sensiblement la rareté relative des volumes de sable détachées retenues à son intérieur (limite supérieure posidonie), dont l'épaisseur maximale peut être évaluée ne dépassant 1,5 m. La structure géologique est telle qu'elle crée des pièges sur la partie la plus nord-ouest de la foulée qui semble la plus stable même affleurée.

La plage est périodiquement affectée par des événements de dépôts alluvionnaires lors des crues rapide qui provoquent des perturbations éphémères du profil émergé.



Illustration 7 - Plage et cellule sédimentaire de la plage de Geremeas et Baccu Mandara à l'intérieur de la cellule sédimentaire.

Cann'e Sisa

La plage avec son développement d'environ 400 m est insérée dans une cellule sédimentaire sous-tendue à bassin torrentiel, avec une planimétrie trapèze-rectangle de taille maximale le long de la limite supérieure de P.O. d'environ 600 m et d'une largeur de plus de 400 m. Il s'agit évidemment d'une plage microtidale à poche à surveillance géologique soit par les surplombs rocheux qui la délimitent (Bacchu Mandara du nord-ouest et de la tour Fenugu au sud-est) soit par le fond peu profond proche de la rive.

Genn'e Mari e Portu Perdosu

Ce sont deux recueils géologiquement contrôlés qui sont aussi proches que différents d'un point de vue géomorphologique. La première est une plage de sable microtidal bien en retrait dans les deux saillies rocheuses granodiorites (GEA_c: Geremeas d'unité intrusive, faciès de Is Mortorius) délimitant une plage immergée étendue (environ 180.000 mq) par rapport à celle émergée (environ 10.000 mq). La seconde est un recueil plutôt exposé au pied d'une pente formée par les conglomérats de Ussana formation (USS) et naturellement sous-tendue à la zone de captage de Portu Perdosu. Pour cette raison, la plage, au pied de la pente se compose principalement de sédiments de pierre avec des sables grossiers limités à la marge du sud-est, ou dans des pièges submergés. Le secteur est donc particulièrement intéressé par la contribution des matériaux d'origine gravitaire provenant des pentes en contact direct avec l'Etat Maritime (Illustration 8). Parmi les sédiments et le substrat rocheux on relève des conglomérats en faciès de roches de plage à -1 m et 5 m qui sont liés à des niveaux de stationnement correspondant à 500 et 3000 ans BP (De Muro *et al.*, 2015).



Illustration 8 - Genn'e Mari a nord-ouest e Portu Perdosu a sud-est.

Solanas

La plage microtidale Solanas (Illustration 9), l'unité physiographique la plus orientale, est alimentée par le Riu Solanas, est limitée à l'est par le promontoire de Capo Boi et au nord-ouest par la Punta Cabudi, les deux à granodiorite avec des brins. La partie émergée, avec un développement d'environ 935 m entre les deux arêtes rocheuses qui la contiennent (en pointillés rouge) et la longueur variable des rives de 950 à 980 m en fonction des conditions climatiques, c'est une partie étroite d'un système à poche avec planimétrie trapézoïdale. La cellule sédimentaire qui est bien confinée a une largeur transversale de 600 m (lignes en pointillés blanc) et la face longitudinale en contact avec la limite supérieure de la Posidonia d'environ 1400 m (jaune en pointillés); elle contient des sédiments habituellement sablonneux mais avec des caractéristiques de composition et de texture différentes entre la plage émergée et la plage immergée. En particulier dans la plage émergée, il est mis en évidence la prévalence des sables siliciclastiques pour 90% à quartz et feldspath, de gros à très gros, alors que dans celle immergée prévalent les particules de taille moyenne et fine qui ont tendance à être enrichies en bioclastis vers la limite avec posidonieto. Dans ce domaine, entre les sédiments et le substrat rocheux on relève des conglomérats en faciès de roches de plage à -1 m et 5 m qui sont liés à des niveaux de stationnement correspondant à 500 et 3000 ans BP (De Muro *et al.*, 2015).

Les crues périodiques de la rivière provoquent des inondations et des dégradations non structurelles sur la plage.



Illustration 9 - Plage de Solanas.

Les côtes “hautes”

En général, la zone côtière est caractérisée par des pentes et des falaises qui ont des hauteurs de quelques dizaines de mètres. Les pentes sont principalement recouvertes de dépôts quaternaires provenant de l'altération du complexe intrusif sous-jacent; ces dépôts ont des angles élevés talutage (35-40°), mais leurs comportements géotechniques dépendent sensiblement par la portée d'eau et par les conditions de saturation. Les falaises sont constituées principalement par des roches intrusives et filoniennes dont le degré d'altération est étroitement liée au comportement géomécanique. Celui des granodiorites Geac étudiées non-loin de la zone côtière (Coll *et al.*, 2011), on le fait tomber entre W3 et W4 du système de classification proposé par la Société géologique de Londres (1995), dans lequel W6 est la roche résiduelle. Derrière Murtaucci et Portu Perdosu on évide la présence de la formation conglomératique tertiaire de Ussana, avec des caractéristiques très différentes des précédentes qui rendent typiques les respectifs recueils de l'Etat maritime.

Il n'y a pas de grande différence de compétence dans les litologies présentes à cause de caractères lithologiques assez uniformes. L'hydrolyse est le processus de dégradation météorique par lequel les silicates, qui sont des composants essentiels de granitoïdes (feldspaths et minéraux ferromagnésiens) sont attaqués par les eaux météoriques légèrement acides et se décomposent, avec desquamation et exfoliation sphéroïdales des surfaces compactes. Ceci peut impliquer, par érosion sélective, l'approfondissement et l'élargissement de la discontinuité d'origine mécanique, produite à partir d'agents de dégradation physique (dilatation thermique différentielle de l'action de coin des racines) et des forces tectoniques. Le dégonflage du vent et

l'abrasion marine peuvent, au fil du temps, retirer les pièces rocheuses détachées, en provoquant dans le bloc encore inalteré la formation de cavités typiques, connues sous le nom tafoni. Souvent, les tafoni peuvent être encore plus étendus en raison de la corrosion, sous l'action des agents atmosphériques. La formation de tafoni procède essentiellement de bas en haut, jusqu'à provoquer le détachement et même l'effondrement de blocs intacts de roche, par un amincissement excessif de leurs parties d'appui et par l'interception des surfaces des lésions.

Caractéristiques physiographiques et écosystémiques

Du point de vue de l'écosystème la zone pilote se caractérise par la présence du site d'importance communautaire pour le réseau Natura 2000, appelé SIC ITB040051 - "Bruncu de su Monte Moru - Geremeas (Mari Pintau)".

La SCI "Bruncu de su Monte Moru - Geremeas (Mari Pintau)" se situe sur le territoire municipal de Quartu Sant'Elena, s'étendant sur environ 139 ha (dont 53 terrestres et 86 marins).

Il se localise à la limite sud de la région historique et géographique de Sarrabus (sud-est Sardaigne) et fait partie du secteur est du golfe de Cagliari, en se situant dans la bande côtière comprise entre les promontoires de Cala Regina et Bruncu de su Monte Moru.

On atteint le site le long de la route côtière de Villasimius, qui est à une quinzaine de kilomètres et est inclus dans un tronçon de côte très pittoresque d'une grande beauté situé entre la petite crique rocheuse appelée "Cala Regina" et la plage de sable de "Kal'e Moru".

Les 86% de la surface de SiC est constituée par la zone immergée en face de la plage de Mari Pintau, environ 5% est représenté par la même plage et la zone restante comprend l'implantation artificielle de pins sur les volets des résidus d'un système de dunes qui est localisé à proximité du promontoire de granit de "Bruncu de su Monte Moru".

Le site est caractérisé par la présence de 12 habitats d'intérêt communautaire, dont 4 sont prioritaires. Le réseau comprend tous les domaines identifiés et proposés, car ils contiennent des habitats et des espèces animales et végétales inscrites dans la directive Habitats 92/43 / CEE et des espèces d'oiseaux inscrites dans la directive Oiseaux 79/409 / CEE appelées Sites d'importance communautaire (SIC) et Zones de protection spéciale (ZPS).

En particulier, en ce qui concerne la partie marine, son importance est due à la présence de l'habitat prioritaire "*Posidonia oceanicae*" (code 1120 *), d'un intérêt considérable pour la conservation. Pour la partie terrestre, l'habitat le plus représentatif est celui des "dunes côtières avec *Juniperus spp.*" (Cod. 2250 *), suivi de l'habitat "des dunes boisées avec *Pinus pinea* et/ou *Pinus pinaster*" (morue. 2270 *) et "Les voies de substrat des graminées et des plantes annuelles de la Thero-Brachypodietea"(code 6220 *).

Connaissances disponibles

La zone côtière de “Geremeas - Torre delle Stelle - Solanas” a été particulièrement affectée depuis quelque temps par des perturbations hydrogéologiques érosives sur certains récifs sableux qui la caractérisent et qui, pour leur intérêt, ont fait l’objet de recherches scientifiques approfondies et de plusieurs études, projets et suivi, répertoriés brièvement dans la bibliographie en marge.

Parmi les plages incluses dans le site pilote, Solanas a surtout fait l’objet d’études scientifiques récentes, notamment sédimentologiques (Kalb, 2008, Demuro *et al.*, (2015) et risques hydrogéologiques (Serreli, 2007).

Le système hydrographique, plus précisément le Riu Geremeas et le Rio Solanas, a fait l’objet d’études et d’études approfondies dans le domaine du PSFF (Plan des bandes fluviales).

Etat des connaissances

Aléas côtiers

Evolution du trait de côte

Les côtes basses

A ce stade, nous nous contentons de mettre en évidence les résultats de l’analyse préliminaire basée sur la comparaison diachronique du littoral, qui mettent en lumière la façon dont certaines plages manifestent d’importants retraits de la ligne de rive tous les soixante ans.

Le Programme Action Côtes de la RAS (2013), par rapport à l’évolution du littoral considère les plages étudiées “Dans un état d’équilibre ou en cours”, par rapport à l’état de conservation du système de dunes “avec des signes de détérioration et de démantèlement”, par rapport à l’interférence de la fréquentation anthropique sur les composants de la plage “Elévée”, alors que dans le secteur immergé, l’état de conservation et le développement de la limite supérieure de la Posidonie océanique, est défini comme “en équilibre et en conservation”.

En réalité, il existe aujourd’hui des preuves suffisantes d’un état sédimentaire déficient et d’un retrait relativement sérieux de la côte, résultant d’un conditionnement et des utilisations humaines, plutôt que d’une évolution naturelle.

A titre d’exemple on montre la comparaison de deux images datées 1954/2016 d’où émergent des modifications anthropiques du réseau hydrographique, la disparition d’une bonne partie d’un recueil étendue de dunes derrière les plages de Genn’e Mari et Cann’e Sisa auquel est lié le recul net de la ligne de rivage. Étant donné le contexte du bassin versant et l’effacement du Riu Gavoi, cette conjonction de conditions semble de grave préjugé pour la garniture de la plage Cann’e Sisa.

La côte et la surface des bassins fluviaux à elle sous-jacents sont affectées par la dangerosité géomorphologique délimitée par le Plan d’amélioration de l’eau (PAI) de la région Sardaigne et sont donc régies conformément aux articles. 31, 32, 33 et 34 des règles techniques de mise en œuvre du PAI. En particulier, Murtaucci et Mari Pintau ont un degré de risque différent: Hg4 (très élevé) et Hg2 (moyen).

Ci-dessous sont résumées quelques analyses diachroniques qui mettent en évidence les relations entre les modifications de la ligne de rivage et l’altération du système hydrographique (Illustration 11, 12, 13, 14, 15).

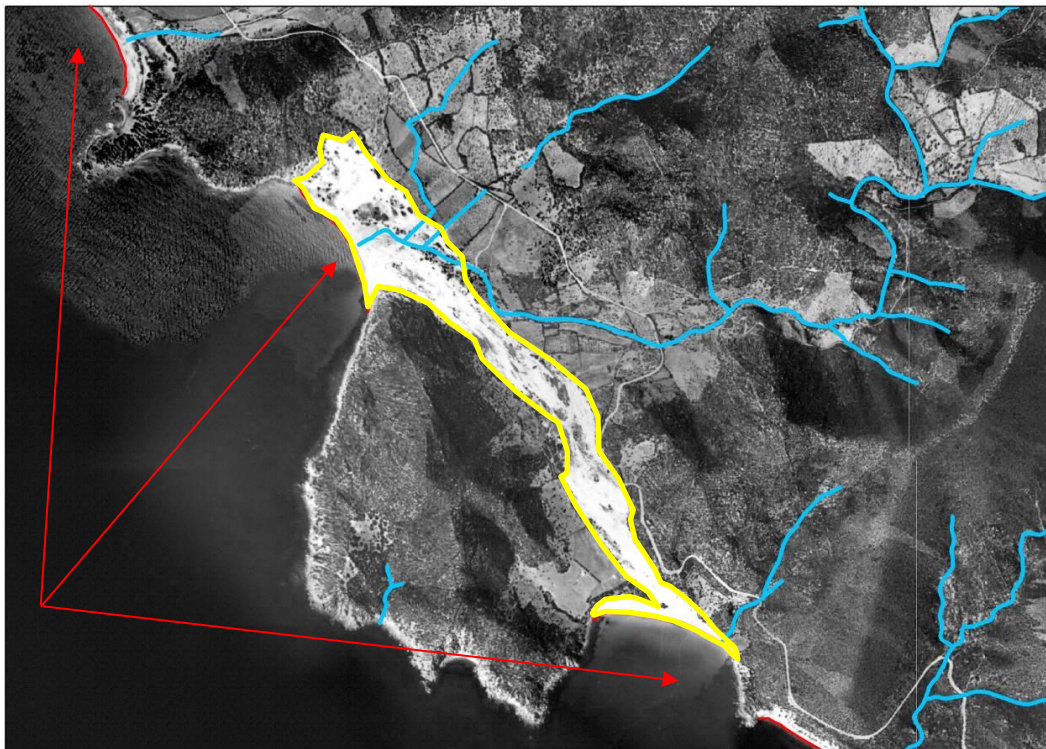


Illustration 10 - Dans les deux images 1954/2016 les modifications anthropologiques du réseau hydrographique, la disparition du compendium dunate derrière les plages de Genn'e Mari (au sud) et de Cann'e Sisa (au nord) et le recul évident de la ligne.

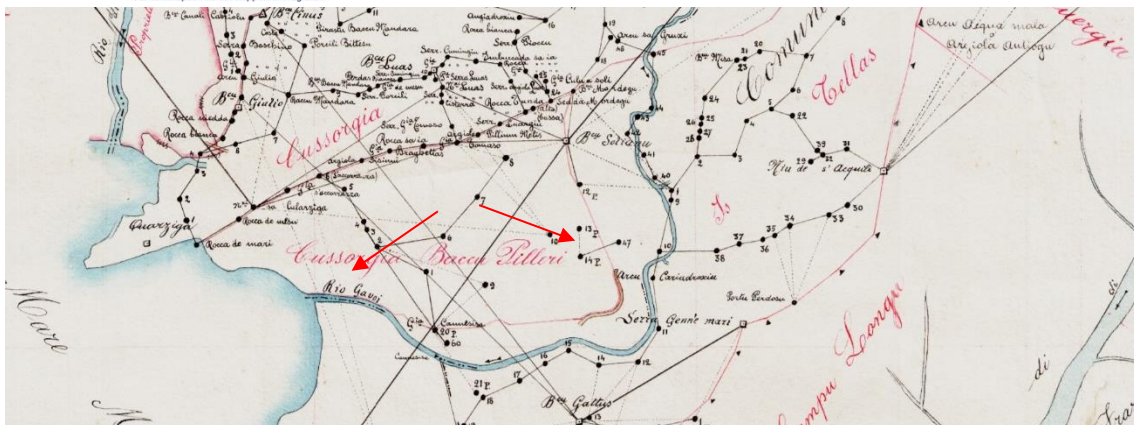


Illustration 11 - La route du Rio Gavoi à la fin du 800 (Catasto De Candia - Archives d'État) la continuité morphologique et le naturel évident jusqu'à l'embouchure garantissent l'apport sédimentaire de la plage de Cann'e Sisa.



Illustration 12 - La route du Rio Gavoi en 2016; complètement effacé par l'expansion du tourisme résidentiel et des infrastructures urbaines.

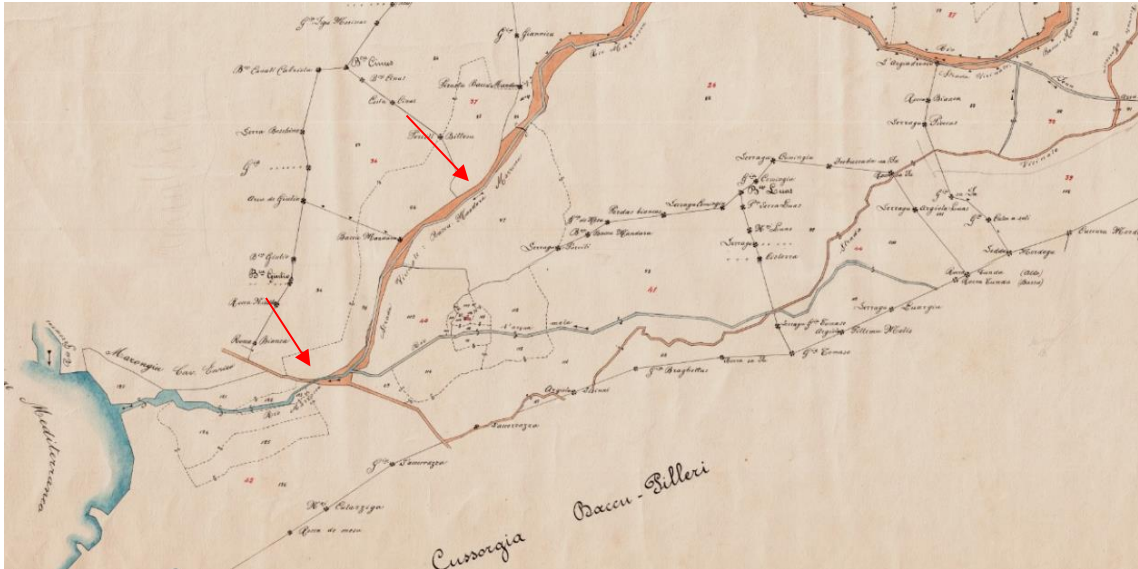


Illustration 13 - La route du Rio Marroccu et du Rio S'acqua Mala à la fin du XIXe siècle (Catasto de Candia - Archivio di Stato); la continuité morphologique jusqu'à l'embouchure des deux garantit, avec le Rio Geremeas, l'apport sédimentaire de la plage.



Illustration 14 - L'itinéraire du Rio Marroccu et du Rio S'acqua Mala en 2016; tous deux complètement oblitérés par la chaussée.



Illustration 15 - Une autre situation d'intérêt, en relation avec l'évolution de la bande côtière, est mise en évidence à la plage de Solanas. L'analyse diachronique 1954/2016 montre un recul net de la côte.

Les côtes à falaises rocheuses

La zone se compose d'une série de pentes raides avec des falaises surplombant la mer, en dessous desquelles il y a des dépôts d'effondrement. Le tronçon de littoral le plus important, aux fins de l'étude, est certainement celui situé sous la Torre de su Fenugu.

Les falaises avec des pentes, face au quartier résidentiel de Torre delle Stelle, sont affectées par une certaine instabilité et par les processus gravitaires, localisés principalement dans les zones plus raides. Les litologies moins compétentes, principalement représentées par le complexe filonien, sont plus fracturées et altérées que les granodiorites. Les dépôts quaternaires et tertiaires sont certainement les plus affectés par l'instabilité géostatique; ils ont souvent des angles de repos élevés (40-45°) et reposent directement sur le substrat rocheux qui, dans certaines conditions, peut servir de surface de glissement. En concomitance avec des périodes de pluies intenses ou prolongées, ces dépôts peuvent être affectés par des processus gravitaires tels que le glissement et le ruissellement. La présence de végétation représente un bon facteur de confinement des processus d'érosion donnée par l'action combinée entre un appareil radical et la couronne (les racines stabilisent les dépôts de pente avec des couvertures de-colluvial, tandis que la couronne intercepte les précipitations en atténuant leur action érosive).

La dynamique morphologique principale est due à l'action du mouvement des vagues et des processus d'évolution de la pente arrière.

La mesure de l'onde de bouée Cagliari RON présente une situation particulièrement favorable (Lat 39° 6' 52" N, long de 9° 24' 20") pour une caractérisation du mouvement des vagues ordinaire qui influe sur le site en question, même si le court laps de l'enquête (2007-2008, 2009-2014) ne semble pas suffisante pour une analyse robuste des événements extrêmes (Sulis, sous presse). La houle provient principalement du quadrant II (35%) et du Quadrant III (53%) avec une fréquence d'occurrence d'environ 1% des vagues de hauteur significative supérieure à 3,5 m et direction moyenne de 140 ° provenance N.

Les falaises, désignent des conditions d'instabilité potentielle en particulier celles liées à la fracturation de la masse de roche (Illustration 16), en particulier le long de la digue complexe comme facteur prédisposant. Cependant, les dépôts de pente, les literies eluvio-colluvial et en particulier la formation tertiaire Ussana apparaissent les plus vulnérables aux processus gravitaire de la pente, parce que même avec un grand angle de repos, au fil du temps, mais surtout en cas de fortes pluies, sont affectés par l'effondrement gravitaire récurrent.

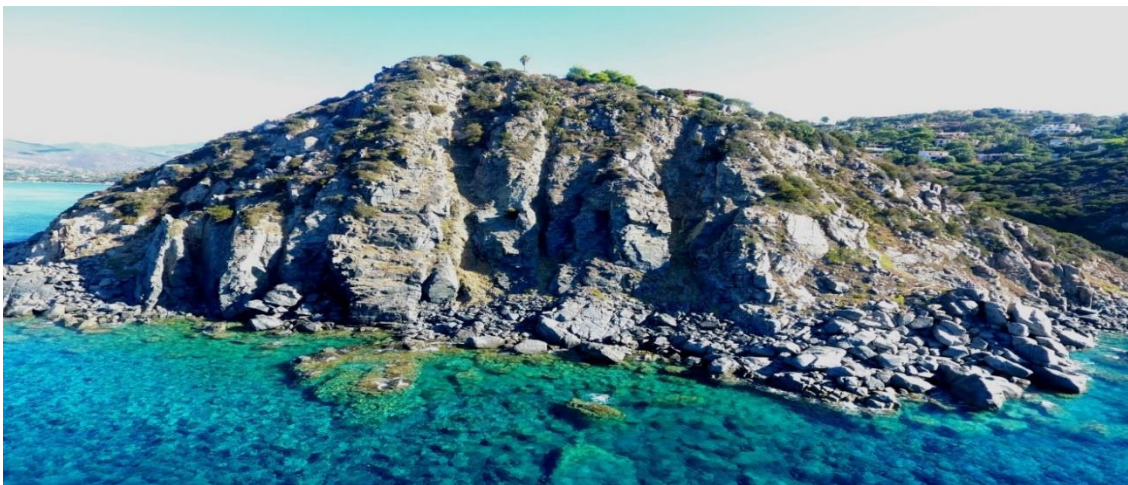


Illustration 16 - Côte haute et rocheuse près de Torre de Su Fenugu à Torre delle Stelle.

Sûrement la fragilité géostatique de la zone n'est pas particulièrement élevée; ceci grâce aux lithologies présentes qui comptent certainement parmi les plus résistantes (granodiorites). Sur

les falaises et sur les pentes rocheuses, l'érosion agit très lentement, à court terme on n'observe aucune variation significative de la ligne de rivage, contrairement aux plages.

Submersion marine

Nous avons vu comme toute la côte est affectée par les perturbations hydrogéologiques côtières qui affectent à la fois les étés sablonneux, les falaises ou plus souvent les rochers. Au-delà de la vulnérabilité naturelle de l'environnement côtier et de la morphodynamique associée, à la base de l'état général de déséquilibre géomorphologique il semble exister une certaine stratification des causes, souvent en même temps, liées à la fois au domaine maritime que à celui continental hydrographique, presque toujours lié aux activités humaines. Le risque d'inondation côtière est moins bien documenté. Il n'existe actuellement aucune étude sur le danger des tempêtes (inondations côtières). Cependant, pour la symétrie avec des similaires autour des conditions d'exposition et morpho-bathymétrique, il est fort probable que les plages de Solanas, Geremeas, Cann'e Sisa, Genn'e Mari, compte tenu de la structure topographique sont vulnérables aux effets des tempêtes avec d' élevés taux de retour. En particulier, la condition focale des torrents respectifs expose Solanas, Geremeas et Cann'e Sisa à la pénétration du niveau de la mer le long des traits terminaux de ceux-ci. Le tronçon le plus déprimé de Genn'e Mari, même s'il est restreint, est cependant le seul à ne pas être affecté par la diffraction du Scirocco.

Plans de prevention

En Sardaigne, il n'y a pas de plan de prévention des risques côtiers (érosion et / ou submersion marine) Cependant, dans l'ensemble de circumnavigation de la côte sarde, a été créé, dans le cadre du plan de gestion des risques d'inondation, une étude dont le but est la cartographie des dangers des événements maritimes météoriques des risques d'inondation, ce qui constitue la base pour la préparation de la cartographie des risques d'inondation requis par le plan de gestion des risques en vertu de la directive 2007/60/CE et du décret législatif 23 Février 2010, n.49. En dépit d'une marquée tendance évolutive à l'érosion de l'évolution et d'une exposition significative au mouvement des vagues (fetch relativement étendue et Hs des hauteurs de vagues allant jusqu'à 5-6 m), pour le secteur côtier en question, actuellement, il n'y a pas de plans de prévention des dangers côtiers.

En ce qui concerne les côtes élevées, à l'heure actuelle, le seul outil de planification disponible pour la région de la Sardaigne est le PAI qui définit en fonction des différents niveaux de risques géomorphologiques certaines régions côtières de l'île.

Comme déjà mentionné, le Programme d'action côtière (PAC) de la région Sardaigne a également créé la classification des zones côtières à grande vulnérabilité géomorphologique-environnementale, mais il ne constitue pas une défense à l'application des règles de sauvegarde. Dans l'avenir, il serait opportun de programmer des mesures non structurelles qui visent à la délimitation temporaire des zones à vulnérabilité géomorphologique élevée, dans l'attente de la réalisation des travaux visant à atténuer le danger dans les quartiers les plus animés (plages et criques). Dans les cas les plus extrêmes, il serait souhaitable d'interdire les zones les plus à risque. Une planification à moyen et long terme devrait garantir l'atteinte de niveaux de sécurité adaptés aux circonstances. L'aspect préventif des processus de défaillance peut entraîner une augmentation du niveau de sécurité et une réduction des risques.

A l'intérieur du capuchon, entre les côtes élevées, il a été étudié en tant que bande côtière "à haute vulnérabilité" celle de Torre delle Stelle entre Genn'e Mari et Cann'e Sisa, pour une longueur d'environ 2218 m (Illustration 17).

Comune	Sviluppo costiero comun. [m]	n° tratti franosi	Sviluppo tratti franosi [m]	% costa franosa	n° tratti ad alta criticità	Toponimi tratti alta criticità	Sviluppo tratti alta criticità [m]
MARACALAGONIS	5.317	3	3.041	57%	1	Torre delle Stelle;	2.218

Illustration 17 - Données issues du programme d'action côtier (PAC) (2013).

Le même PAC, par rapport aux basses côtes, a classé avec différents niveaux et différentes "évaluations critiques préliminaires" toutes les plages de la zone pilote, classant les plages de Genn'e Mari et Cann' e Sisa en "haute vulnérabilité".

Enjeux présents

Toute la zone côtière de référence est exposée à la dynamique saisonnière du temps marin. Il a également été noté que les événements alluviaux liés à la dynamique torrentielle côtière la plus intense sont concomitants aux événements maritimes.

Les principaux éléments à risque sont actuellement représentés par les bâtiments résidentiels saisonniers (parcs Geremeas, Torre delle Stelle et Solanas) et par l'infrastructure primaire et secondaire qui occupent les plaines côtières, mais aussi par les habitations situées face aux couronnes des falaises et escarpements. La présence d'ouvrages artificiel tels que les routes et les sentiers d'accès au logement, aux plages et aux criques, ont des pentes abruptes qui favorisent les processus de ruissellement à la fois surfaciques et linéaires, puisque le plus souvent non équipés d'un adéquat système d'élimination des déchets pour l'eau blanche. En conjonction avec les événements alluviaux, des phénomènes similaires aux coulées de débris peuvent également se produire, qui peuvent, eux aussi, transporter de grandes quantités de débris en aval.

Conclusion

Rappel des problématiques du site

Dans ce site pilote, au-delà de la vulnérabilité naturelle de la côte et de la morphodynamique associée, selon l'état de déséquilibre géomorphologique plus ou moins manifeste doit être considérée aussi la stratification des questions, parfois concomitantes, directement liées à la dynamique des zones côtières maritimes et à la dynamique fluviale et du contexte hydrographique général.

En résumé:

- Réduction des stocks de sable émergés, en particulier ceux des dunes, à cause aussi d'extractions délibérées pendant ces derniers temps;
- Evénements d'inondations périodiques qui chargent les systèmes torrentiels drainants;
- Oblitération des troncs d'eau des vallées;
- concentration de bâtiments et l'augmentation de la capacité érosive pour la réduction des espaces de laminage et de concentration des motifs de drainage;
- L'état d'entretien des principaux lits des rivières et réduction des contributions torrentielles au canal de remplissage des sections du tronc principal.

En ce qui concerne la côte "haute", les problèmes les plus importants, liés essentiellement au danger géomorphologique, se trouvent le long du périmètre côtier, avec une référence particulière

aux falaises et aux versants du promontoire Torre delle Stelle, qui sont extrêmement urbanisés (Illustration 18).

Cependant, la structure morphostructurale de la section côtière ne détermine pas un niveau de danger “élevé” dû aux glissements de terrain, en raison de lithologies particulièrement compétentes et résistantes à l’altération. Une réduction significative des risques pourrait être obtenue en vérifiant les conditions géostatiques locales des pentes et des falaises face aux ouvrages anthropiques existants et en émettant l’hypothèse de travaux de consolidation qui ne pourraient être réalisés qu’après avoir considéré les caractéristiques de contour des zones à risque.



Illustration 18 - Comparaison du taux d’urbanisation du promontoire de Torre delle Stelle entre 2015 et les années 1960.

Représentativité transfrontalière

Le site, pour ses caractéristiques physiographiques, écosystémiques et environnementales, représente un domaine où la nécessité d’adopter une approche de planification intégrée par l’analyse des principaux aspects environnementaux (équilibre sédimentaire, mouvement des vagues, habitats et écosystèmes, etc.) est évidente.

De plus, en raison de ses caractéristiques territoriales et urbaines particulières et de la présence généralisée d’éléments à risque, il est important pour la gestion du risque côtier à des fins de stratégie transfrontalière et pour son application dans des zones présentant des caractéristiques physiographiques comparables.

En plus des aspects spécifiques liés au “risque d’érosion côtière”, les éléments qui rendent la zone importante pour les aspects transfrontaliers, sont ses caractéristiques géologiques, géomorphologiques et écosystémiques communes aux autres régions frontalières.

Le site pilote a été considéré comme représentatif d’une zone côtière de la Sardaigne caractérisée par une variété de plages de poche légèrement en retrait, certaines parmi des surplombs rocheux ou au pied des pentes soit en roche cristalline que sur des débris lithofaciés anciens, ou d’autres encore directement et régulièrement nourris par les torrents des bassins. Ce sont des structures géomorphologiques tellement résilientes qui ne devraient pas être particulièrement vulnérables à l’érosion côtière. Cependant, ils sont exposés, à toute une série de perturbations dues à l’urbanisation de la frange littorale et à la croissance du peuplement touristique qui ont induit des instabilités hydrogéologiques : étanchéité des surfaces installées, effacement de lits de rivières, réduction et concentration spatio-temporelle dans l’approvisionnement en eau, le surpeuplement des plages, les inondations associées à des événements intenses, l’enlèvement délibéré d’énormes volumes de dunes de sable. Ces

perturbations ont généré des effets secondaires aussi indésirables que non-règlementaires, à la fois sur les plages et dans les zones voisines.

Ajoutez à cela le fait que les principaux cours d'eau qui se terminent dans la mer (Rio Solanas et surtout Riu Geremeas), ne bénéficiant pas de l'entretien courant des sédiments déposés dans le lit de la rivière, ils ne peuvent pas garantir la réalimentation naturelle de la plage en conditions de déficit. De même, la zone de Torre delle Stelle a certainement une grande valeur environnementale et paysagère et c'est l'une des zones les plus populaires de la côte sud de la Sardaigne. Elle est particulièrement populaire pendant l'été quand la population peut dépasser les 10 000 visiteurs. Dans la région, il y a beaucoup de maisons (quelques centaines), parfois construites sur des pentes particulièrement raides ou face aux falaises.

Un aspect de la représentativité transfrontalière du site est dû au fait que l'on est en présence d'un certain nombre de caractéristiques qui permettent d'approfondir les connaissances en ce qui concerne les processus gravitaires qui affectent les zones de falaise sur de roches granitoïdes largement répartis dans le bassin méditerranéen (Corse, Provence).

L'interaction du substrat rocheux avec l'érosion marine pourrait être utile pour évaluer sa vulnérabilité par rapport à l'augmentation de l'énergie des vagues. La présence de nombreux processus de perturbation active avec leurs temps de retour particulièrement courts pourrait ainsi fournir des données statistiques utiles sur la dynamique morphologique côtière.

Bibliographie

Atzori P. & Traversa G. (1986) - Post-granitic permo-triassic dyke magmatism in eastern Sardinia (Sarrabus p.p., Barbagia, Mandrolisai, Goceano, Baronie and Gallura). *Per. Mineral.* 55: 203- 231, Roma.

Belluomini G., Branca A., Delitala L., Pecorini G. & Spano C. (1986) - Isoleucine Epimerization Dating of Quaternary Marine deposits in Sardinia, Italy. *Zeit. Geomorph., N.F., Suppl. Bd.*, 62: 109-117, Stuttgart.

Barca S., Melis E., Annino E., Cincotti F., Ulzega A., Orrù P. & Pintus C. (2005) - Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 557 "Cagliari". *Serv. Geol. d'It., Reg. Auton. Sardegna, S.EL.CA.*, 240 pp., Firenze.

Brotzu P., Callegari E. & Secchi A. (1993). The search for the parental magma of the high-K calc-alkaline igneous rock series in the southernmost Sardinian Batholith. *Per. Mineral*, 62, 253-280.

Coli M., Castorina T. & Livi E. (2011) - Geostructural prospecting for the geomechanics characterization of a granitic rock-mass: the case history of the Terra Mala area (Sardinia, Italy). *Rendiconti online Soc. Geol. It.*, Vol. 15 (2011), pp. 43-47.

Comaschi Caria I. (1959a) - Il Miocene in Sardegna. *Boll. Soc. Geol. It.*, 77: 183-198, Roma.

Dean R.G. (1973) - Heuristic models of sand transport in the surf zone. *Proc. Conf. On Engineering Dynamics in the Surf Zone*, Sydney, N.S.W., pp. 208-214.

De Muro S., Ibba A. & Kalb C. (2015) - Morpho-sedimentology of a Mediterranean microtidal embayed wave dominated beach system and related inner shelf with *Posidonia* oceanic meadows: the SE Sardinian coast. *Journal of Maps*, pp. 15.

Di Gregorio F., Federici P.R., Fierro G. & Ginesu S. (1998) - Atlante delle spiagge della Sardegna, Fogli (167, 168, 179, 180, 192, 199, 205, 208, 219, 216, 224, 227, 232, 234, 235, 239) R.A.S, Cagliari.

Di Gregorio F., Atzeni A., De Muro S. & Piras G. (2004) - Carta del Rischio Geoambientale nelle coste della Sardegna - 2004 pubblicato unitamente a: Di Gregorio F., Federici P.R., Fierro G., Ginesu S. - Atlante delle spiagge della Sardegna.

Geological Society of London (1995) - The description and classification of weathered rocks for engineering purposes - Group Working Party Report, *Quarterly Journal of Engineering Geology* n° 28.

- Ghezzi C. & Orsini J.B. (1982) - Lineamenti strutturali e composizionali del Batolite ercinico sardo- corso in Sardegna. In: L. Carmignani, T. Cocozza, C. Ghezzi, P.C. Pertusati & C.A. Ricci (Eds.): «Guida alla Geologia del Paleozoico Sardo». Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. It., 165-181, Roma.
- Hearthy P.J., Bonfiglio L., Violanti D. & Sazo B.J. (1986) - "Age of late Quaternary marine deposits of Southern Italy determined by aminostratigraphy, faunal correlation and uranium-series dating". Riv. It. Paleont. Strat., 92: 149-164, Milano.
- Kalb C. (2008) - I sedimenti superficiali della piattaforma interna del Golfo di Cagliari. Relazioni tra moto ondoso, correnti indotte e processi di sedimentazione su sistemi di spiagge campione - Dottorato di ricerca in Scienze della Terra - XX ciclo - Università di Cagliari.
- Kindler P., Davaud E. & Strasser A. (1997) - Tyrrhenian coastal deposits from Sardinia (Italy): a petrographic record of high sea level and shifting climate belts during the last Interglacial (isotopic substage 5e). *Paleo3*, 133: 1-25, Amsterdam.
- Komar P.D. (1998) - Beach Processes and Sedimentation, Chp. 04 - The Changing Level of the Sea, Prentice Hall.
- Masselink G. & Hughes M.G. (1996) - Application of an energetics- based model to sediment transport in the swash zone. A field study. *Continental Shelf Res.*, submitted.
- Masselink G., Hughes M.G. & Knight J. (2011) - Introduction to Coastal Processes & Geomorphology, 2nd edition ed., Hodder Education, London.
- Wright L.D. & Short A.D. (1984) - Morphodynamic variability of surf zone and beaches. *Marine Geology* 56: 93-118.
- Masselink G. & Short A.D. (1993) - The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model, *J. Coastal Res.*, 9: 785-800.
- Nicoletti M., Ardanese L.R. & Colasanti S. (1982). La granodiorite di Capo Carbonara (Sardegna-Italia). Età K/Ar di fasi minerali in paragenesi. *Rend. Soc. It. Mineral. Petrol.*, 38 : 765-769.
- Ozer A., Paskoff P. & Ulzega A. (1980) - Essai de corrélation du Pleistocène supérieur de la Sardaigne et de la Tunisie. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 291: 801-804, Paris.
- Pirinu N., Brotzu P., Callegari E. & Secchi F. (1996). Age and field relationship of albite-rich monzosyenite intruded into the Sarrabus granitoids (SE Sardinia, Italy). *Per Mineral.*, 65: 289-304.
- Ronca S. & Traversa G. (1996) - Late Hercynian dyke magmatism of Sarrabus. *Per. Mineral.*, 65: 35-70, Roma.
- Serrelli A. (2007) - Database geografico e applicazioni GIS orientate allo studio geomorfologico quantitativo e alla mappatura della pericolosità idrogeologica del bacino idrografico del rio Solanas (Sardegna SE). Tesi di Dottorato di Ricerca in Difesa del Suolo (Università di Cagliari).
- Sole F.M. (2015) - Valutazione della vulnerabilità delle coste della Sardegna a fenomeni di erosione ed inondazione dovuti all'impatto degli eventi estremi meteo- marini. Dottorato di Ricerca in Difesa e conservazione del suolo, vulnerabilità ambientale e protezione idrogeologica - Ciclo XXVIII, p.154. Università di Cagliari.
- Sulis A. in press - Minor structures for the improvement of wave disturbance in a small harbor. *Advances in Civil Engineering*.
- Ulzega A. & Ozer A. (1982) - Comptes-Rendus de l'Excursion-Table rond sur le Tyrrhénien de Sardaigne orientale. *INQUA*, pp. 110, Cagliari.
- Ulzega A. & Hearty J.P. (1986) - Geomorphology, Stratigraphy and Geochronology of late Quaternary marine deposits in Sardinia. *Z. Geomorph.*, N.F., Suppl. Bd., 62: 119-129, Stuttgart.
- Vardabasso S. (1956) - Il Quaternario della Sardegna. *Atti IV Congr. Intern. Quat. Rome-Pisa, 1953*, 2: 995-1018.

Représentativité des sites et intérêts transfrontaliers

L'examen des monographies des sites pilotes retenus par les partenaires du projet MAREGOT montre que ceux-ci sont extrêmement divers en termes de caractéristiques géologiques et géomorphologiques (lido, plages de poche, plages urbaines, falaises côtières), mais également en termes de degré de naturalité entre des environnements naturels, en cours d'aménagement ou de re-aménagement, et des environnements très artificialisés.

La synthèse proposée ici s'attache à illustrer cette variabilité tout en démontrant l'intérêt majeur de ces sites pour comprendre leur comportement qui résulte à la fois des processus physiques naturels et également des effets des aménagements. Ce large panel de cas et des thématiques rencontrés permettra de mettre en évidence des pistes de solution de gestion communes à l'échelle transfrontalière.

Synthèse

Le tableau suivant (Illustration B) rassemble ainsi les principales caractéristiques des différents sites, ainsi que leur intérêt méthodologique et leur intérêt dans une perspective de gestion transfrontalière.



Site	Géomorphologie	Aménagement	Intérêt méthodologique	Intérêt transfrontalier
Vieux-Salins d'Hyères (FR)	Côte basse sableuse Cordon littoral	Naturel	Désenrochement d'une portion littorale adjacente	Expérimentation pilote de renaturation d'un littoral sableux Intérêt écologique (herbier frangeant de <i>Posidonia oceanica</i>)
Vieux-Moulin Grimaud (FR)	Plage de poche	Rechargement Ouvrages de défense	Plan de gestion de l'érosion	Méthodologie de gestion innovante Dimensionnement d'ouvrages
Veillat Saint-Raphael (FR)	Plage de poche urbaine	Rechargement	Plan de gestion de l'érosion	Mise en œuvre de méthodologie de gestion innovante
Riviera Ligure di Levante (IT)	Littoral mixte Plages de poche et falaises côtières	Ouvrages de défense sur les zones de plage	Approche intégrée régionale Stratégie globale de gestion de l'érosion sur les plages et les falaises	Linéaire côtier mixte plages /falaises Superposition des usages (aménagement portuaire, zones touristiques, Parcs Naturels) Continuité territoriale Région PACA - Ligurie - Toscane
Bocca di Magra et Marina di Massa (IT)	Côte basse sableuse Cordon littoral	Ouvrages de défense sur les zones de plage	Impact des ouvrages sur un littoral naturel Modélisation opérationnelle des risques côtiers	Usages multiples du littoral (activités balnéaires, ports,) Plages aménagées avec ouvrages de défense du littoral Développement technologique en modélisation
Senzuno (IT)	Plages de poche	Rechargement et ouvrages de défense	Travaux de redimensionnement des ouvrages	Développement méthodologique sur les ouvrages existants
Pratoranieri (IT)	Plages de poche	Rechargement et ouvrages de défense	Rechargement avec granulométrie supérieure	Développement méthodologique sur la technique de rechargement
San Vincenzo (IT)	Côte basse sableuse Cordon littoral	Infrastructures portuaires et ouvrages de défense	Impact des ouvrages sur un littoral naturel Approche intégrée sur le littoral	Expérimentation pilote Développements méthodologiques sur la connaissance des stocks et de la dynamique sédimentaire)
Parc régional de la Maremma	Côte basse sableuse Cordon littoral à proximité d'une embouchure fluviale	Rechargement Reprofilage de plage	Gestion dynamique des stocks sédimentaires Projet de ré-équilibre du littoral au nord de l'embouchure Embouchure fluviale dynamique	Expérimentation pilote de ré-équilibre de la dynamique sédimentaire Impacts dans une zone naturelle et protégée
Calvi (FR)	Plage de poche	Brisés-lames	Suivi morphologique long-terme	Développement méthodologique de monitoring Suivi des impacts des tempêtes
Moriani (FR)	Côte basse sableuse Cordon littoral	Rechargement	Suivi morphologique long-terme	Développement méthodologique de monitoring Suivi des impacts des tempête Suivi des effets des rechargement
Bastia (FR)	Côte basse sableuse Cordon littoral	Projet d'infrastructures portuaires lourdes	Suivi morphologique long-terme	Développement méthodologique de Monitoring Suivi des impacts des tempête Suivi expérimental d'une plage naturelle avant-projet portuaire

Sites	Géomorphologie	Aménagement	Intérêt méthodologique	Intérêt transfrontalier
Aléria – Ghisonnaccia (FR)	Côte basse sableuse Cordon littoral avec embouchure fluviale	Naturel	Modélisation des risques de submersion marine	Développement méthodologique de caractérisation des risques côtiers Gestion de crise
Capo Altano (IT)	Falaises côtières	Naturel	Gestion des risques gravitaires (éboulements / glissement)	Site représentatif des falaises de roches volcaniques (Massif des Maures)
Capo Mannu (IT)	Falaises côtières	Naturel	Gestion des risques gravitaires (éboulements / glissement)	Site représentatif des falaises de roches silico-clastiques (Corse, Var, Ligurie)
Sella del Diavolo (IT)	Falaises côtières	Naturel	Stratégie intégrée de prévention des risques gravitaires	Site représentatif des falaises calcaires (ex : Bonifacio en Corse, Calanques en Provence)
Villagio Nurra (IT)	Falaises côtières	Naturel	Gestion des risques gravitaires (éboulements / glissement)	Site représentatif des falaises avec des roches litées à fort potentiel de glissement (ex : Ligurie)
Santa-Margherita (IT)	Plages de poche et falaises côtières	Ouvrages de défense sur les zones de plage	Approche intégrée locale Stratégie globale de gestion de l'érosion sur les plages et les falaises Rôle du réseau hydrographique sur l'alimentation sédimentaire Impact des ouvrages de protection	Linéaire côtier mixte plages/falaises
Torre delle Stelle (IT)	Plages de poche et falaises côtières	Ouvrages de défense sur les zones de plage	Approche intégrée et stratégie globale de gestion de l'érosion sur les plages et les falaises	Linéaire côtier mixte plages/falaises Site représentatif des falaises de roches granitiques (Corse, Provence)

Illustration B : Caractéristiques principales des sites pilotes du projet MAREGOT

Spécificités des sites MAREGOT

Plages de poche, cordon littoral bas, falaises côtières, littoral mixte : les sites-pilotes du projet MAREGOT sont très divers. Cette diversité est un gage de ré-applicabilité des apports du projet MAREGOT au bénéfice de la zone MARITIMO, et par extension, aux zones côtières méditerranéennes.

Il demeure cependant que des spécificités particulières peuvent être mises en avant au regard de l'inventaire des monographies.

Echelle spatiale des sites et apports associés

L'analyse des différents sites montre que ceux-ci couvrent un large spectre spatial depuis des plages simple (ex : Plage du Veillat à Saint-Raphel), à des cordons littoraux mixtes et complexes d'ampleur locale (Santa-Magherita) ou régionale (Riviera di Levante). Les différentes actions et méthodologies mises en œuvre dans MAREGOT vont donc couvrir ce spectre et ainsi apporté des améliorations des connaissances bénéficiant à des modes de gestions à ces différentes échelles, d'un plan de gestion local (aménagement, rechargement) à des stratégies régionales.

Développements méthodologiques

Les développements méthodologiques réalisés dans le projet MAREGOT, testés et mise en œuvre sur les différents sites, vont bénéficier à l'ensemble de la communauté scientifique, technique et aux gestionnaires de la zone transfrontalière.

Ces développements sont de plusieurs ordres :

- Surveillance et monitoring de l'évolution du littoral, avec par exemple, la mise en œuvre de systèmes vidéos nouveaux en Corse, et de systèmes bathymétriques en Toscane sur San Vincenzo pour la connaissance des stocks et des dynamiques sédimentaires.
- Modélisation des risques de submersion marine avec un site-pilote dédié sur la côte basse d'Aléria, avec une forte composante relative à la gestion crise, piloté par le SDIS de Haute-Corse.
- Expérimentation d'optimisations de méthodes de gestion de l'érosion en Toscane, avec des suivis spécifiques sur les redimensionnements des ouvrages de Senzuno et sur le rechargement en graviers à Pratoranieri.

Approche de l'érosion des falaises côtières (côte haute)

Les sites-pilotes retenus par les partenaires italiens Région Ligure et Région Autonome de Sardaigne sont des sites de falaises côtières et des sites mixtes plages de poche / falaises littorales.

Le spectre géologique couvert par les différents sites est très large en termes de lithologie et couvre la quasi-totalité des roches typiques des côtes sardes : calcaires, grès, granites, roches volcaniques. Ces caractéristiques géologiques se retrouvent le long des littoraux de la zone MARITIMO, comme en Corse (granites, calcaires), ou en Provence-Alpes-Côtes d'Azur (calcaires) ou région Ligurie (schistes, gneiss), mais également à l'échelle des pays européens de la façade méditerranéenne (Croatie, Grèce, Espagne, ...).

Une attention particulière est également portée sur la connaissance des processus d'érosion des falaises liées à l'action des vagues, dans ces contextes lithologiques différents. Ce domaine de travail est très innovant car la détermination des forçages majeurs responsables de de déstabilisation des falaises littorales (ruissellement, tectonique, agents marins) reste très complexe.

L'interaction des falaises et des plages est également mise en avant à travers une prise en compte des volumes de roches éboulés en termes de source sédimentaire pour la plage après remodelage par l'action des vagues.

L'ensemble du travail réalisé pourra bénéficier indirectement aux littoraux roches comme les falaises littorales de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur en France, des départements du Var et des Alpes-Maritimes en particulier (Côte d'Azur).

Impacts des ouvrages de défense contre la mer

La plupart des sites-pilotes de plages, cordon littoral ou plages de poches, ont fait l'objet de travaux d'aménagement, qui ont eu des impacts forts sur la stabilité du littoral local et/ou des

littoraux adjacents. La grande diversité des sites-pilotes permet ainsi de définir un catalogue quasi-exhaustif des solutions d'aménagement sur les plages microtidales et l'ensemble de la zone transfrontalière bénéficie de ce retour d'expérience (dimensionnement d'ouvrages, reconfiguration, ...).

Cette expérience profitera certainement également aux sites-pilotes qui vont faire l'objet de plans d'intervention locaux avec la construction d'ouvrage (Vieux Moulin à Grimaud ; ou Arinella à Bastia).

Enfin, les expérimentations qui vont être faites sur les ouvrages (redimensionnement des digues à Senzuno, enlèvement des enrochements à Hyères), vont très certainement apporter également beaucoup de savoir-faire profitables à d'autres secteurs littoraux.

Gestion des risques côtiers

Sur l'ensemble des sites-pilotes, les méthodes de gestion des risques d'érosion sont très différentes en fonction des phénomènes étudiés. Ainsi, pour les éboulements et glissement de terrain sur les côtes rocheuses, les monographies mettent en évidence que des mesures de réduction du risque contraignantes, en limitant l'accès par exemple, sont privilégiés par rapport à des travaux de confortement. Sur les plages, c'est plutôt le contraire qui est favorisé avec la mise en oeuvre de mitigation par construction d'ouvrages ou de rechargement artificiel. Il n'en demeure pas moins que, sur la plupart des sites, il est précisé que les différentes méthodes de mitigation doivent s'appuyer sur des études les plus exhaustives possibles, et qui prennent en compte les processus physiques naturels et leur évolution sur des pas de temps longs.

Concernant le risque de submersion marine, il est pris principalement en compte dans une démarche opérationnelle de gestion de crise sur le site d'Aléria, mais les techniques de surveillance vidéo peuvent également apporter des informations pertinentes sur les processus en jeu, et conforter ainsi des développement méthodologiques reproductibles à l'échelle transfrontalière.

Conclusion

Le présent rapport correspond au livrable de l'activité T2-6. Il contient les différentes monographies de chacun des sites pilotes, sous un format de compilation d'articles, produits par l'ensemble du partenariat MAREGOT. Chaque monographie présente les caractéristiques principales des sites pilotes :

- Contexte physiographique, géologique et géomorphologique ;
- Particularités écosystémiques ;
- Données et connaissances disponibles sur les processus et les risques côtiers et es caractéristiques géologiques ;
- Inventaire succinct des enjeux présents sur la zone littorale ;
- Tendances évolutives à moyen et/ou long terme du trait de côte sur les plages sableuses (ie côte basse) ou les falaises rocheuses (ie côte haute) ;
- Inventaire des risques côtiers et des plans de prévention et de gestion éventuellement mis en œuvre ;

L'examen des monographies des sites pilotes retenus par les partenaires du projet MAREGOT montre que ceux-ci sont extrêmement divers en termes de caractéristiques géologiques et géomorphologiques (lido, plages de poche, plages urbaines, falaises côtières), mais également en termes de degré de naturalité entre des environnements naturels, en cours d'aménagement ou de re-aménagement, et des environnements très artificialisés. Cette diversité est un gage de ré-appliquabilité des apports du projet MAREGOT au bénéfice de la zone MARITIMO, en particulier

- Au niveau des échelles spatiales des sites qui couvrent un large spectre des plages simples aux cordons littoraux complexes (plages/falaises régionaux). Les différentes actions et méthodologies mises en œuvre dans MAREGOT vont donc couvrir ce spectre et ainsi apporté des améliorations des connaissances bénéficiant à des modes de gestions à ces différentes échelles, d'un plan de gestion local (aménagement, rechargement) à des stratégies régionales.
- Au niveau des développements méthodologiques mis en œuvre sur les différents sites (surveillance et monitoring de l'évolution du littoral, modélisation des risques de submersion marine, optimisations de méthodes de gestion de l'érosion
- Au niveau d'une approche spécifique sur l'érosion des falaises côtières, en insistant sur la diversité lithologique roches typiques des côtes sardes qui se retrouvent le long des littoraux de la zone MARITIMO (Corse, Provence-Alpes-Côtes d'Azur, région Ligurie) mais aussi dans les pays européens de la façade méditerranéenne (Croatie, Grèce, Espagne, ...) ; sur la connaissance des processus d'érosion des falaises liées à l'action des vagues ; et sur l'interaction des falaises et des plages :
- Au niveau des impacts des ouvrages de défense contre la mer avec un catalogue quasi-exhaustif des solutions d'aménagement et de leurs effets sur les plages microtidales ; et des expérimentations qui vont être faites sur les ouvrages (redimensionnement des digues à Senzuno, enlèvement des enrochements à Hyères) ;
- Au niveau des méthodes de gestion des risques côtiers, mitigation par réduction du risque par réduction de l'exposition sur les falaises et de l'aléa sur les plages.

L'ensemble des actions qui vont être menées sur les sites pilotes vont ainsi permettre l'élaboration concertée de stratégies transfrontalières de gestion des risques d'érosion côtière et de submersion marine en prenant en compte les spécificités réglementaires locales.