



COMPONENT T2

ACTION T.2.3.4

Méthodologie de Côte Rocheuses

Unité Opérationnelle UniCA (Université de Cagliari)



INTRODUCTION	4
1 CADRE COGNITIF.....	5
1.1 Cadre Réglementaire	5
1.1.1 Cadre Réglementaire Italien	5
1.1.1.1 Cadre Réglementaire Régional	6
1.1.2 Cadre Réglementaire Française	6
1.1.2.1 Corse	6
1.2 DONNÉES DISPONIBLES	6
1.2.1 Glissements de Terrain	7
1.2.1.1 IFFI (Inventaire des Glissements de Terrain en Italie)	7
1.2.1.2 PAI (Plan de Structure Hydrogéologique).....	8
1.2.1.3 PAC (Programme d'Action Côtière en Sardaigne)	8
1.2.1.4 Quelques expériences d'application.....	9
1.2.2 Données sur les vagues marines.....	9
1.2.3 Données Climatiques	10
2 MÉTHODOLOGIE D'ENQUÊTE	12
2.1 OBJECTIFS	13
2.2 UNITÉ D'ÉTUDE	13
2.3 ENQUÊTES ET TRAITEMENT DE DONNÉES.....	14
2.3.1 Partie Émergée.....	14
2.3.1.1 Analyse Photographique multitemporelle	14
2.3.1.2 Caractéristiques morphologiques des surfaces.....	15
2.3.1.3 Caractéristiques Géologiques-Structurales	17
2.3.1.4 Caractéristiques Géomorphologiques.....	18
2.3.1.5 Caractéristiques Géomécaniques	23
2.3.1.6 Caractéristiques Géotechniques.....	24
2.3.1.7 Caractéristiques Hydrogéologiques.....	25
2.3.1.8 Caractéristiques climatiques	28
2.3.2 PARTIE SUBMERGÉ.....	29
2.3.2.1 Modèle numérique de la toile de fond: relevés bathymétriques	30
2.3.2.2 Reliefs bathymétriques <i>singlebeam</i>	30
2.3.2.3 Reliefs bathymétriques multibeam	31
2.3.2.4 Reliefs Side Scan Sonar	31
2.3.3 Mouvement de Vagues.....	34
3 GÉODATABASE.....	36
3.1 IDENTIFICATION DE LA PLATEFORME DE STOCKAGE ET DE PUBLICATION DE DONNÉES.....	36

3.2	LE SYSTÈME GEONETWORK.....	36
3.2.1	Métadonnées.....	37
3.2.2	Le Database PostgreSQL	38
3.2.3	Achèvement de la fonctionnalité <i>GeoNetwork</i>	39
3.2.4	Intégration d'environnements de stockage et publication de Databases dans un point d'accès unique.....	40
4	ÉVALUATION DE LA DYNAMIQUE ÉVOLUTIVE.....	41
4.1	ANALYSE DE L'ÉCHELLE LOCAL.....	42
4.1.1	Retraite Côtière.....	42
4.2	ANALYSE À L'ÉCHELLE RÉGIONAL (MODÈLES D'ÉVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITÉ À L'INSTABILITÉ)	45
4.2.1	Zonage de la susceptibilité, des dangers et des risques de glissements de terrain : généralité.....	46
4.2.2	Zonage de la susceptibilité aux glissements de terrain pour les hautes côtes rocheuses.....	47
4.2.2.1	Méthode semi-quantitative (Del Rio & Gracia, 2009)	48
4.2.2.2	Méthodologie probabiliste (Certainty factor)	49
4.2.2.3	Méthodologie RES (Rock Engineering System).....	51
4.2.2.4	Méthode basée sur des études géologiques-structurelles indirectes.....	53
5	PROPOSITION DU PROTOCOLE D'INVESTIGATION	55
5.1	PROPOSITION DE PROTOCOLE D'INVESTIGATION À L'ÉCHELLE LOCAL.....	55
6	BIBLIOGRAPHIE.....	58

INTRODUCTION

Ce document est composé de le produit final de la Component T2.3 "Méthodologie des côtes hautes rocheuses", l'état actuel des connaissances, compris les plus avancés, indiquent quels sont les éléments géologiques, hydrodynamiques et climatiques qui doivent être acquis pour avoir un cadre cognitif adéquat afin de caractériser les hautes côtes rocheuses en fonction de leur propension à l'instabilité. Dans la phase initiale sont décrits les aspects réglementaires de la gestion de ces zones dans les régions impliquées dans le projet MAREGOT, sont décrit aussi les données disponibles et les principales expériences concernant l'étude des côtes rocheuses dans la zone d'intervention du projet. Dans le chapitre 2 (Méthodologies d'enquêtes), sont donné un aperçu actualisé des principales méthodes d'enquêtes pouvant être prises en compte pour aborder ce sujet de recherche. Les méthodes d'acquisition des données de base, telles que les données topographiques, sont également brièvement illustrées, également avec des techniques d'analyse avancées, qui ne peuvent pas toujours être utilisées dans les enquêtes, mais qui sont considérées comme des références dans le protocole. Le chapitre 3 (Géodatabase) illustre le système de stockage dynamique et interactif des données acquises, à utiliser non seulement pendant la phase d'acquisition mais aussi pendant la phase de monitoring. Le chapitre 4 (Évaluation de la dynamique évolutive) décrit la méthodologie de traitement des données collectées, notamment en fonction de l'analyse de stabilité et de l'analyse climatique, surtout est décrit la procédure avec laquelle les différents éléments et les différentes méthodologies avec lesquels les phénomènes liés à la dynamique "émergé" ont été analysés et ceux liés à la dynamique "marine" sont intégrés également selon un protocole d'enquête. Les méthodes qui peuvent être appliquées pour une évaluation correcte de la susceptibilité à l'instabilité sont décrites et discutées en considérant à la fois les aspects à l'échelle de l'intervention et de planification (échelle régionale) et celles pour décrire avec précision l'utilisation des données collectées pour la conception des interventions ciblées sur les glissements de terrain (échelle local). Enfin, dans le chapitre 5 (Proposition du protocole d'investigation), le critère pour faire face à l'enquête est proposé à la fois pour la planification et pour les interventions individuelles, et constitue la synthèse de ce qui a été discuté précédemment, indiquant les choix que nous proposons pour les diverses possibilités illustrées. Il convient de rappeler que c'est seulement à la fin de la prochaine phase d'application directe sur le terrain (Component T3) qu'un protocole d'enquête peut être élaboré pour la définition spécifique des méthodes d'analyse appropriées pour les phénomènes d'instabilité. En particulier, une approche multi-échelles sera appliquée à l'analyse sur le site : 1) identification de toutes les situations d'instabilité détectables dans la zone pilote, en distinguant le type, le niveau d'activité et la génération ; 2) une analyse approfondie des détails morphostructuraux et hydrogéologiques, ainsi qu'une analyse géomécanique et géotechnique des types d'instabilité les plus représentatifs et/ou les plus actifs. Pour la sélection des méthodes devant permettre la reconnaissance des littoraux potentiellement instables et produire un zonage du péril hydrogéologique, il faudra attendre les premiers résultats de la phase d'application qui se développera entre mai 2018 et décembre 2019 et qui permettra d'identifier les protocoles plus efficace en même temps en termes de produits en termes d'économie et de faisabilité.

1 CADRE COGNITIF

1.1 Cadre Réglementaire

L'érosion côtière est un sujet très complexe qui doit être traité d'un point de vue technique et législatif. Une partie considérable de la population mondiale vit le long des côtes où se concentrent les principales activités économiques ; l'interaction de l'activité humaine avec la dynamique côtière met en évidence l'existence de nombreux conflits entre les intérêts publics et privés avec l'érosion et la défense côtière, qui n'est pas toujours gérée par un cadre réglementaire adéquat. La planification territoriale des zones côtières est caractérisée par un chevauchement des règles juridiques nationales, avec des compétences fragmentées et une pénurie d'orientation en raison de la poursuite d'objectifs contradictoires (Montebello, 2004). Le cadre réglementaire international n'a pas de discipline uniforme au sein des différents États de l'Union européenne. Cette situation est due en grande partie à l'absence de législation communautaire qui favorise l'intégration de disciplines différenciées, mais la situation générale est encore compliquée par la gouvernance des compétences administratives existant dans les différents États (Garzia, 2007). La plupart des conventions existantes traitent de questions générales, dans lesquelles l'érosion côtière joue souvent un rôle très marginal (Convention de Barcelone de 1976, Protocole de 1996 à la Convention de Londres de 1972). Certaines directives européennes visent à identifier les environnements marins côtiers à des fins de conservation (directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992, conservation des habitats naturels et semi-naturels et de la faune et de la flore sauvages). Le Protocole sur la Gestion Intégrée des Zones Côtières Méditerranéennes GIZC (en vigueur depuis le 24 mars 2011), a pour objectif de promouvoir un cadre commun pour la gestion intégrée des zones côtières méditerranéennes. Dans le droit communautaire, la question de l'érosion côtière émerge en correspondance avec les profils de protection de l'environnement qui impliquent certaines directives (Directive 85/337/CE, Directive 97/11/CE, Directives 2011/92/UE et 2014/52/UE). La politique communautaire, sur les zones côtières se développe de manière organique dans les cinquième et sixième programme d'action pour l'environnement (2002-2012), en réponse à une demande du Conseil européen de définir une stratégie mondiale pour la GIZC. Sur la base des expériences et des résultats du programme démonstrative de la GIZC, l'Union européenne a ensuite adopté deux documents qui constituent aujourd'hui les principales références de l'action communautaire dans ce domaine: Communication COM/2000/54/CE de la Commission de Conseil et au Parlement européen sur la gestion intégrée des zones côtières et la recommandation 2002/413/CE du Parlement européen et du Conseil relative à la mise en œuvre de la gestion intégrée des zones côtières en Europe. Suite à la recommandation 2002/413/CE, la Commission européenne a adopté certains actes pour la protection de l'environnement marin, à commencer par la communication de la Commission au Conseil et au Parlement européen du 24 octobre 2005 intitulée "Stratégie thématique pour la protection et l'environnement marin" (COM/2005/504) et la proposition de directive "Stratégie pour le milieu marin". En 2007, la Commission européenne a préparé "l'évaluation de la gestion intégrée des zones côtières en Europe" (COM/2007/308). L'évaluation commence à partir des rapports individuels et des contributions sur les stratégies nationales visant à promouvoir la gestion intégrée des zones côtières envoyées par les États membres côtiers. Le cadre réglementaire général actuel est complété par les directives régissant le problème de la prévention des risques d'érosion dans la zone côtière (COM/2006/2232, modification de la directive 2004/35/CE, directive 2007/60/CE et directive 2008/56/CE).

1.1.1 Cadre Réglementaire Italien

L'Italie transfère les fonctions administratives concernant la gestion de la bande côtière de l'État central aux diverses autonomies locales. La première loi sur la défense des plages est n. 542 du 14 juillet 1907 (Loi sur la défense des habitants contre l'érosion marine) qui, dans certaines régions, peut encore être considérée

comme appliquée. La loi n ° 431 du 8 août 1985 (loi Galasso) prévoit une identification générique de la bande côtière des 300 premiers mètres et est soumise à des restrictions paysagères. Au cours des dernières décennies, la défense côtière a fait l'objet d'un transfert de compétences de l'Etat aux Régions (Décret du Président de la République n ° 616 du 24 juillet 1977, article 69, paragraphe 6) ; Par la suite à la loi n. 183 du 18 mai 1989 à l'art. 10 paragraphe 7, confère l'entière responsabilité aux régions dans le domaine de la défense côtière. Par la suite, le décret législatif n° 112 du 31 mars 1998, art. 89, paragraphe 1, confère aux régions toutes les fonctions liées à la planification, à la planification et à la gestion intégrée des interventions de défense côtière et côtière. La pleine application du décret législatif n° 122 du 31 mars 1998 il permet de surmonter une situation opérationnelle complexe, même lorsque la compétence régionale a été établie, en tout état de cause, l'avis contraignant des structures étatiques pour l'exécution des travaux sur la propriété de l'Etat maritime est resté. Avec la loi n. 179 du 31 juillet 2002, art. 21 (Dispositions en matière d'environnement) la responsabilité des interventions de protection du littoral est définitivement confiée aux Régions. Décret législatif n. 152 du 3 avril 2006 (Réglementations environnementales) à l'art. 65, paragraphe 3, lettre stipule que parmi les contenus du Plan de Bassin, il faut inclure les travaux de protection et de consolidation des côtes marines qui sont à la base du district fluvial (District hydrographique). Article. 56 du même décret prévoit également les activités de planification, de planification et de mise en œuvre liées à la défense du sol, à la protection des côtes et des zones habitées, de l'invasion et de l'érosion des eaux marines, à l'alimentation des plages.

1.1.1.1 Cadre Réglementaire Régional

Le cadre réglementaire régional reflète en grande partie la situation nationale et internationale générale, en fait il y a une certaine hétérogénéité dictée par les caractéristiques réglementaires et spécifiques de chaque Région. Certaines régions ont des plans pour la gestion intégrée des zones côtières visant à planifier et à programmer différentes interventions ; d'autres régions ont adopté des directives techniques et des directives régissant les procédures relatives à l'approbation des interventions. Une grande partie de la législation est tirée de la Table Nationale sur l'érosion côtière.

1.1.2 Cadre Réglementaire Française

1.1.2.1 Corse

PACA "Provence-Alpes-Côte d'Azur" Leroi, E., Bonnard, Ch., Fell, R., McInnes, R., 2005. 'Risk assessment and management'. State of the Art Paper No.6. Int. Conf. on Landslide risk mgt. Vancouver. Balkema

1.2 DONNÉES DISPONIBLES

Le problème de la stabilité des côtes rocheuses, ainsi mis en évidence dans le rapport T1.1.1 qui montre les expériences existantes et antérieures dans le suivi de l'instabilité des côtes, même s'il est de plus en plus l'objet d'un intérêt de la part de la composante technique de l'administration publique, il semble qu'il ne soit traité de façon systématique que dans quelques régions, avec un manque de planification technique et des règlements d'intervention qui sont remplis d'actions spécifiques en présence d'urgences de protection civile, impactant superficiellement sur la chronicité d'un aléa hydrogéologique dû au risque de glissement de terrain. Ceci a principalement produit les catalogues de glissements de terrain (voir projets IFFI ou PAC de la région Sardaigne) qui ne sont pas complets et qui n'ont en tout cas pas pour but de décrire les phénomènes d'instabilité complexifiés par l'action de la composante marine. Le manque de précision, fondamentalement dû à un déficit de connaissances disponible que ce projet propose en partie de combler, implique deux situations extrêmes, les deux problèmes : i) la présence de plusieurs hautes côtes rocheuses potentiellement périlleuses, ignorées dans les outils de planification et ii) parfois un excès de limites à

l'utilisation des traits de côtes qui, si elles étaient étudiées avec plus d'attention, pourraient être soumises à moins de contraintes.

Nous notons ici une grande différence avec le cadre international, on pense principalement aux pays qui ont des côtes océaniques (Angleterre, États-Unis, Japon, Portugal, etc.) où il y a des études et des expériences de planification basées sur des éléments techniques scientifiques plus solides. Cette plus grande avancée des connaissances et des pratiques en matière de planification et de gestion est probablement aussi due à l'effet de régression exagéré qui affecte les tronçons de littoral, constitués principalement de cales fortement érodables avec des taux de retrait atteignant facilement 1,5 mètres/année (par exemple, voir Castedo et al., 2012). Vous trouverez ci-dessous les données disponibles sur les événements de glissement de terrain du partenariat MAREGOT, connues actuellement, y compris certaines expériences régionales décrites dans des publications techniques et scientifiques et des rapports techniques, des données sur les vagues et le climat.

1.2.1 Glissements de Terrain

1.2.1.1 IFFI (Inventaire des Glissements de Terrain en Italie)

L'Inventaire des Glissements de Terrain en Italie) (Projet IFFI) fournit un cadre sur la distribution des phénomènes de glissements de terrain à travers le pays et offre un outil de connaissance de base pour l'évaluation du risque de glissement de terrain, pour la planification des interventions de défense terrestre et pour l'aménagement du territoire. Les sujets institutionnels impliqués dans la mise en œuvre du projet IFFI sont l'ISPRA - Département de Défense des Sols/Service Géologique d'Italie et les Régions et Provinces Autonomes d'Italie. Le Département remplit une fonction d'adressage et de coordination des activités et de vérification de la conformité des données cartographiques et alphanumériques avec les spécifications du projet ; les régions et les provinces autonomes d'Italie procèdent à la collecte de données historiques et archivistiques, à la cartographie des glissements de terrain, à la validation et à l'informatisation des données. Le projet a été financé par le Comité des Ministres pour la Défense du Territoire en vertu de la Loi 183/89 avec 4,1 millions d'euros. Dans le cadre de ce projet, l'Université, le SINAnet (réseau national d'information sur l'environnement) et des entreprises spécialisées dans les bases de données sont également impliqués. La méthodologie utilisée pour réaliser l'inventaire est basée sur la collecte de données historiques et d'archives, sur la photointerprétation et sur les enquêtes sur le terrain. Afin d'obtenir une homogénéité au niveau national, la fiche de glissement de terrain de l'IFFI a été préparée sur la base des normes internationales de classification et de nomenclature.

La catalogue de glissement de terrain est divisée en trois niveaux d'analyse progressive :

- 1er niveau : contient des informations de base (localisation, type de mouvement, statut de l'activité) et est obligatoire pour chaque glissement de terrain ;
- 2ème niveau : recueille les paramètres morphométrie, géologie, lithologie, utilisation du sol, causes, date d'activation ;
- 3ème niveau : contient des informations sur les dommages, les interventions de l'hébergement.

La base de données est constituée d'une cartographie informatisée et de *database* de données alphanumérique et iconographique relative. L'échelle 1/10000 a été adoptée pour la détection et la cartographie des glissements de terrain sur la majeure partie du territoire national ; l'échelle de 1/25000 était utilisée dans les zones de haute montagne ou à faible densité de population.

Chaque phénomène de glissement de terrain est représenté par :

- un point géoréférencé placé, par convention à le point plus élevée du couronnement de glissement de terrain ;
- un polygone, lorsque le glissement de terrain peut être mappé à l'échelle de sondage utilisée ;
- une ligne, lorsque les corps de glissement de terrain sont très allongés et ont une largeur non mappable.

L'inventaire de l'IFFI a enregistré jusqu'à présent 528903 glissements de terrain qui affectent une superficie des 22176 km², soit 7,3% du territoire national. Les données sont mises à jour en 2014 pour les régions du Piémont, de la Vallée d'Aoste, du Frioul-Vénétie Julienne, de la Ligurie, de l'Émilie-Romagne, de la Basilicate, de la Sicile et de la Province autonome de Bolzano. Pour les autres régions, les données sont mises à jour en 2007. Les données relatives à la Calabre sont sous-estimées par rapport à la situation réelle d'instabilité puisque, jusqu'à présent, l'activité d'étude des glissements de terrain s'est principalement concentrée dans les zones où se trouvent les centres habités ou affectés par les principales infrastructures de communication. Les types de mouvements les plus fréquents dans l'inventaire sont les glissements rotationnels/translotionnels avec le 30,6%, glissement lentes avec le 15,3%, glissement rapides avec 13,8% et les mouvements complexes avec le 11, 4%.

L'inventaire de l'IFFI a été utilisé par diverses autorités de bassin d'importance nationale, interrégionale et régionale comme un outil de base de connaissances pour la mise à jour des plans hydrogéologiques (PAI). La cartographie en ligne du projet IFFI s'est également révélée très utile dans la gestion des urgences hydrogéologiques.

1.2.1.2 PAI (Plan de Structure Hydrogéologique)

Le Plan Hydrogéologique est un instrument de la politique d'aménagement du territoire définie par la Loi 183/89, initiée dans chaque Région par la planification du bassin. C'est le premier extrait thématique et fonctionnel. Le Plan de l'Extrait pour la Structure Hydrogéologique, ci-après dénommé Plan "*Stralcio*" ou P.A.I., établi conformément à l'art. 17, paragraphe 6 ter, de la loi 183/89, de l'art. 1, paragraphe 1, de la D.L. 180/98, converti avec des modifications de la loi 267/98, et l'art. 1 bis du D.L. 279/2000, converti avec des amendements de la loi 365/2000, à la valeur de Secteur Territorial Plan et est l'outil cognitif, il a la valeur du Plan Territorial Sectoriel et est l'instrument cognitif, réglementaire et technico-opérationnel à travers lequel sont planifiées et programmées les actions, les interventions et les règles d'utilisation concernant la défense contre le risque hydrogéologique du territoire. À la suite de l'entrée en vigueur du texte unique sur l'environnement (décret-loi 152/2006), le sujet est réglementé par des 67 et 68 du même. Les périmètres identifiés dans le cadre de la P.A.I. délimitent les zones caractérisées par des éléments de péril 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 niveaux d'informations spécifiques.

Le Plan "*Stralcio*" de les Bandes Fluvial, complète et approfondit le P.A.I. comme c'est l'outil de délimitation des régions fluviales fonctionnel pour permettre, à travers la programmation d'actions (travaux, contraintes, directives), la réalisation d'une structure physique du cours d'eau compatible avec la sécurité hydraulique, l'utilisation des ressources en eau, l'utilisation du sol (à des fins d'établissement, agricoles et industrielles) et la protection des composantes naturelles et environnementales.

1.2.1.3 PAC (Programme d'Action Côtière en Sardaigne)

C'est un instrument capable d'identifier des lignes programmatiques pour les zones côtières avec une plus grande criticité de l'instabilité et de l'érosion et des directives d'application de gestion intégrée des zones côtières. Face à un environnement stratégique pour la structure environnementale et économique, en particulier des pays méditerranéens, comme ceux côtiers, la Commission européenne a demandé à la région de Sardaigne d'établir un outil spécifique de planification et de programmation. L'élaboration du

Programme d'Action Côtière (PAC) a souligné dès le début la nécessité d'arriver à une approche méthodologique générale qui affronte dans ses différentes facettes une question complexe et délicate comme la protection et la défense du littoral. La PAC a réalisé la classification des zones côtières avec une plus grande criticité 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 intégrée de gestion côtière, à travers des interventions organiques non seulement structurel mais aussi avec intention de planification et de gestion. Le PAC décrit et classe les preuves phénoménologiques de la rétrogradation du littoral régional liées aux processus d'érosion des côtes sablonneuses et des glissements de terrain et des côtes rocheuses. Découlent de ces conditions sont nés implications critiques pour l'environnement, l'économie et la sécurité publique, avec la considération évidente que les phénomènes de rétrogradation côtier 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.

1.2.1.4 Quelques expériences d'application

Voici quelques expériences applicatives qui décrivent les méthodes d'approche adoptées pour étudier l'instabilité des côtes rocheuses dans le partenariat, sans que cela soit compris comme un cadre exhaustif, mais seulement largement représentatif :

- Analisi stratigrafico-morfologica e censimento dei processi franosi in atto sulle coste alte nel settore costiero compreso tra Capo San Marco e Capo Marrargiu - Sardegna centro-occidentale (Carboni S., Tilocca G., Lecca L., 2010).
- Caratteristiche Geologico-Tecniche dei terreni dell'area urbana di Cagliari (Barrocu G., Crespellani T., Loi A., 1979).
- Unstable slopes monitoring by means of topographic surveys at Castelsardo, Sardinia, Italy. Eighth International Congress International Association for Engineering Geology and the Environment, Proceedings (Barbieri et al., 1998).
- I fenomeni d'instabilità nell'evoluzione della costa alta delle Cinque Terre - Liguria Orientale (Cevasco, 2007).
- La falesia delle «Acque Dolci» di Monte Argentario modellazione cinematica di caduta massi e progettazione delle opere di difesa (Paronuzzi et al., 1996).

1.2.2 Données sur les vagues marines

En Sardaigne, les données instrumentales sur les vagues marines sont fournies par les bouées du Réseau national des ondes (RON) déjà gérées par le Service hydrographique et marégraphique de l'APAT. Dans son ensemble, le RON inclut le long des côtes de la Sardaigne les bouées directionnelles de Alghero avec des données disponibles du 1er juillet 1989 au 30 octobre 2014, Cagliari du 06 février 2007 au 31 décembre 2014 et Capo Comino du 21 mai 2002 au 12 septembre 2005 et du 01 février 2010 au 06 juillet 2011. Les reliefs présentent de longues périodes de données manquantes qui contribuent à limiter la qualité de la série. A partir des séries temporelles, les paramètres synthétiques de la hauteur spectrale significative H_s (m), période de pic T_p (s), période moyenne T_m (s) et direction de propagation moyenne D_m (° N) et paramètres spectraux par bande de fréquence de la densité énergétique, direction moyenne de propagation, dispersion directionnelle, asymétrie et aplatissement. Le climat des vagues au large d'Alghero peut être représenté sous la forme d'une table bivariée ou d'un diagramme en rose (Figure 1) pour une

hauteur significative (en classes de hauteur de 0,5 m) et direction d'origine (sur des secteurs circulaires d'amplitude égale à 15 °) du mouvement des vagues (Sulis & Annis, 2014).

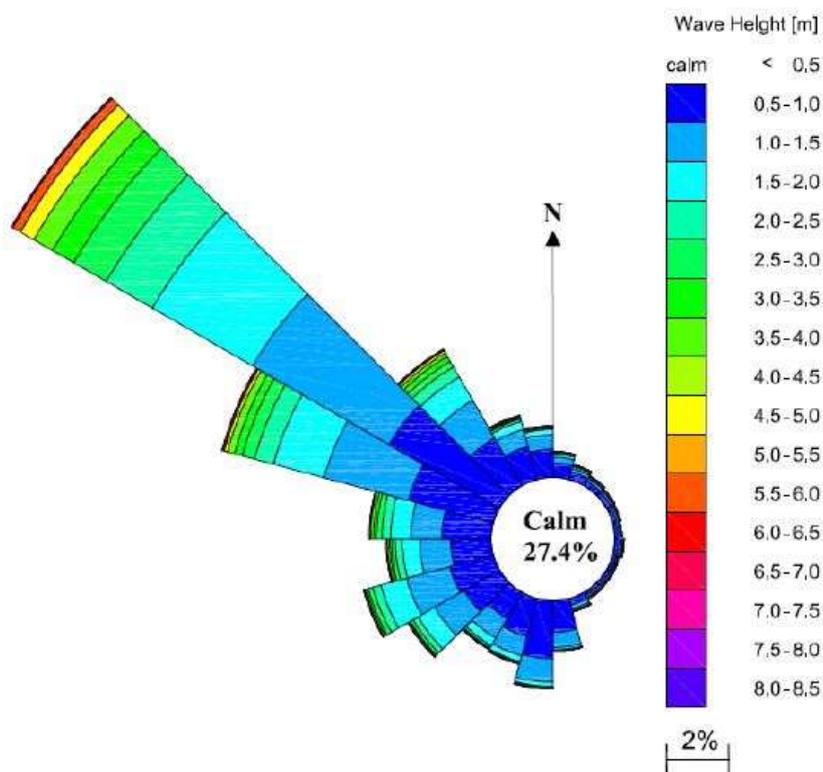


Figure 1 - Diagramme du climat des vagues de RON au large d'Alghero (Sulis & Annis, 2014).

A partir des données météorologiques (pression atmosphérique et vent), il est possible d'effectuer une reconstruction de vagues marine, en utilisant des modèles mathématiques qui, à différents niveaux de complexité, simulent les processus de génération de vagues. Parmi les database de données disponibles pour les sites de reconstruction au large de la Sardaigne, certaines applications peuvent être adoptées telles que Medatlas (Medatlas, 2004) qui utilise un modèle WAVE (WAM) (Group, TW, 1988) basé sur des estimations de modèles météorologiques du European Centre for Medium RangeWeatherForecasts (ECMWF) de Reading (UK).

1.2.3 Données Climatiques

La Sardaigne a entamé un suivi complet des données thermiques et pluviométriques à partir de 1922, par le District Idrographique, qui a installé une série de stations météorologiques pour la détection des principaux paramètres atmosphériques. Le réseau poursuit ses reliefs aux côtés des stations de l'Air Force jusqu'en 1995, lorsque le SAR (Service Agrométéorologique Régional) est devenu opérationnel, dont les fonctions sont similaires à celles du district hydrographique, qui restera opérationnel. Dernièrement les technologies utilisées plus moderne et permettent un suivi à distance du climat en temps réel, en plus de la première diffusion de données climatologiques sur le réseau depuis la fin des années 90. Depuis le début des années 2000, avec le développement des technologies et la réduction des prix, la diffusion des reliefs amateurs rendues publiques sur le web a commencé.

District Idrographique, est le plus ancien organisme de surveillance en Sardaigne et a une histoire assez longue, à partir de 1922. Les enquêtes ont été réalisées par des particuliers qui se sont vu confier un pluviographe et un thermomètre dans un petite cabane en bois. Cependant, les données collectées vieux

par ce corps n'ont pas une bonne fiabilité. En analysant l'enregistrement hydrographiques, remarquez souvent des séries de jours avec des données absentes ou incorrectes. Une analyse basée sur ce type de données devrait donc être effectuée en tenant compte de la tendance climatique observée dans les stations voisines, afin d'éviter autant que possible d'encourir des erreurs. Depuis 2005, le district hydrographique, qui a conservé de nombreuses stations historiques, s'est dotée d'un premier réseau de stations météorologiques avec transmission directe des données par radio au centre des opérations, mais celles-ci ne sont pas disponibles gratuitement sur le réseau.

Aéronautique Militaire (AM), avec ses stations météorologiques, il effectue une surveillance fiable de la température, du vent, des précipitations, de la pression, de l'humidité, par rapport à environ 10 stations. Les données sont présentes sur le réseau à l'adresse de l'AM. La qualité des données est très bonne, compte tenu de l'importance des observations pour le vol aérien et les prévisions météorologiques. Cependant, le manque de stations météorologiques et la concentration de celles-ci le long des côtes ne permettent pas une compréhension complète du climat de l'île.

Le SAR, qui a maintenant été incorporé dans l'Agence régionale pour l'environnement (ARPAS) a été créé en 1990 par la Région, mais n'est devenu opérationnel que depuis 1995. Il dispose actuellement de plus de quarante stations agrométéorologiques qui, en plus d'évaluer les données classiques de température et de précipitations, détectent : le vent, l'humidité du sol et l'humidité atmosphérique, la température du sol, l'irradiation et l'évapotranspiration. La qualité des données est très bonne, rarement certaines stations ont le symbole N.P. (non reçu) et l'établissement s'assure que ces données sont récupérées plus tard. Les stations diffusent par radio au bureau central, où elles sont traitées et stockées.

2 MÉTHODOLOGIE D'ENQUÊTE

La morphologie côtière est généralement liée à l'interaction des processus marins et gravitationnels qui agissent sur les lithologies affleurantes, mais il est impossible de définir avec certitude dans quelle mesure les facteurs affectent le système. Les effondrements qui se produisent le long de la falaise sont épisodiques, discontinus dans le temps et dans l'espace, et se produisent principalement dans des masses rocheuses très fracturées en correspondance de grandes tempêtes (Andriani & Walsh, 2007, Budetta, 2010, Martino & Nappi, 2011; & Mazzanti, 2014). La dynamique des pentes côtières comprend des phénomènes d'érosion intense avec des mouvements de masse liés aux glissements de terrain, effondrements, coulées de débris et divers processus d'instabilité. Les phénomènes d'érosion sont générés presque exclusivement par l'action mécanique des eaux de précipitation (fortes précipitations) et par l'interaction du mouvement des vagues avec la falaise ; ces processus sont également influencés par la dégradation physico-mécanique des roches, des dépôts d'effondrement à la base de la falaise, et des coulées éluviaux/colluviaux sur les pentes. Les mouvements de masse consistent en un déplacement différentiel de masses rocheuses ou de matériaux meubles sous l'action de la gravité et du mouvement des vagues. En raison de leur grande incidence morphologique, les glissements de terrain peuvent être considérés comme les principaux agents en formation des pentes côtières. Les causes principales liées aux processus d'instabilité peuvent être divisées en : prédisposant, ce qui rend le territoire plus ou moins sensible au déclenchement de certains phénomènes et déterminants, qui provoquent la rupture de l'état d'équilibre de la pente/falaise. Les causes déterminantes qui sont considérées sont liées aux précipitations intenses et/ou prolongées et à l'érosion provoquée par le mouvement des vagues le long de la côte, en particulier en cas de forte tempête. Le déclenchement de certains phénomènes d'instabilité hydrogéologique est lié, dans certains cas, au dépassement du seuil pluviométrique donné par des précipitations concentrées dans un laps de temps très limité. Récemment, les changements soudains de climat ont conduit à l'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes, qui déversent d'énormes quantités de pluie en quelques heures avec de très forts rapports Rain/Rate proches de 200 mm/horaires. Les effets sur le territoire sont particulièrement délétères et exaspérés surtout par une expansion démographique croissante et une planification territoriale insuffisante-voire complètement absente. Les méthodologies d'étude des processus d'instabilité appliquées à la zone côtière n'abordent souvent pas, ou seulement superficiellement, l'interaction entre l'environnement marin et l'environnement terrestre. La composante donnée par le mouvement des vagues représente une action prépondérante et non négligeable qui nécessite des analyses spécifiques et des investigations ciblées. Les phénomènes d'instabilité sont également étudiés dans cet environnement finalisant l'analyse des processus liés à la mécanique des roches (principalement dans la partie terrestre) et seulement dans quelques cas considèrent l'interaction de la côte avec le mouvement des vagues et surtout avec la dynamique de l'environnement submergé. Au lieu de cela, l'étude des processus d'instabilité et en général de l'érosion des côtes rocheuses doit être basée sur des recherches multidisciplinaires intégrées qui considèrent les environnements émergés et submergés dans un seul système de dynamique évolutive. L'analyse multi-disciplinaire devrait être basée sur des enquêtes, des systèmes d'acquisition, le traitement et l'interprétation des données les plus appropriées en fonction des conditions physiographiques locales. Donc ils devront prévoir des activités de : géologique (lithologique, stratigraphique, structurale, géomécanique, géomorphologique, hydrogéologique), traitement des données (énergie et interaction des vagues, analyse climatique-climatique, eustatisme, Remote Sensing, analyse de stabilité, photointerprétation, analyse géotechnique, modélisation, analyse de dynamique des fluides), restitution cartographique et création d'une base de données en environnement GIS. Ces dernières années, des techniques d'investigation ont été développées qui, grâce à la contribution des nouvelles techniques de télédétection, analysent en détail les glissements de terrain côtiers sur les côtes rocheuses. (Budetta et al., 2000; Fall et al., 2006; De Blasio & Mazzanti, 2010; De Vita et al., 2012; Budetta & De Luca, 2015; Ružić, et

al. 2015; Budetta et al., 2016). Des études récentes évaluent l'interaction de l'onde avec la susceptibilité au glissement de terrain, le taux d'érosion et la résistance de la masse rocheuse (Budetta et al. 2000; Trenhaile 2002; Kogure et al. 2006; Hall et al., 2008; Naylor & Stephenson, 2010; De Vita et al., 2012; Castedo et al., 2012; Castedo et al., 2013; Marques et al., 2013; Castedo et al., 2017). Ces études prennent en compte un certain nombre de facteurs prédisposants, tels que les caractéristiques des vagues, les taux d'érosion, la disposition lithologique et l'instabilité historique. Le risque relatif est évalué sur la base de méthodes qualitatives (cartographie géomorphologique, approches heuristiques, etc.) ou quantitatives (méthodes statistiques bivariées et multivariées, méthodes déterministes, etc.).

2.1 OBJECTIFS

L'approche méthodologique proposée dans ce document prévoit l'étude et l'analyse des processus d'instabilité hydrogéologique qui affectent et se développent dans les côtes hautes rocheuses. Actuellement, il n'y a pas de protocoles d'enquête bien définis, les études existantes ne suivent pas de méthodologies uniformes, principalement en raison du manque de connaissances et de la complexité de la collecte de données sur les processus qui génèrent l'érosion côtière (Sunamura, 1977, 1983, 1992). L'un des aspects les plus difficiles à évaluer est déterminé par la quantification du processus érosif qui a souvent des caractéristiques hétérogènes et variables dans le temps. Grâce à une approche multidisciplinaire et multi-échelle, la méthodologie contenue dans ce document propose une série d'enquêtes directes et indirectes qui identifient les processus qui génèrent les principaux phénomènes d'érosion dans les côtes rocheuses. L'analyse et le traitement des données recueillies visent à évaluer le statut d'instabilité des sites étudiés et à comprendre les processus en cours pour proposer un protocole applicable dans les zones côtières présentant des conditions physiographiques différentes. À plus grande échelle, les résultats des investigations peuvent être utilisés pour proposer un modèle de développement de la susceptibilité aux risques de glissements de terrain et de glissements de terrain à travers un zonage identifiant les zones les plus fragiles sur lesquelles planifier les mesures d'atténuation des risques.

2.2 UNITÉ D'ÉTUDE

En pensant à l'extension de la zone d'étude, pour la compréhension de l'évolution d'une côte rocheuse, nous référons une partie suffisamment étendue pour comprendre les processus qui contribuent à son instabilité. La définition de cette zone est liée à la nécessité d'étendre les observations locales à un champ permettant de comprendre les processus d'érosion de l'ensemble de l'unité physiographique. Par conséquent, une échelle locale doit être définie en se référant au détail du phénomène d'instabilité, et une échelle régionale comprenant un territoire beaucoup plus vaste auquel les résultats des études de phénomènes locaux peuvent être appliqués afin d'identifier des zones de susceptibilité différente. À l'échelle locale sont identifiées des zones basées sur des caractéristiques lithologiques, géomécaniques, géomorphologiques, sédimentologiques et hydrodynamiques spécifiques dont les limites peuvent être constituées d'éléments morphologiques naturels et de caractéristiques intrinsèques qui les distinguent des zones contiguës. Selon son ampleur, il peut être divisé en unités et sous-unités plus petites dans lesquelles effectuer des enquêtes avec une échelle de détail appropriée (de 1/1000 à 1/2000). L'identification de ces zones n'est pas facile à mettre en œuvre, les pentes côtières étant constituées de la fusion de différents milieux (marins et terrestres) caractérisés par des morphologies, des géométries et des lithologies hétérogènes. Les principaux aspects à évaluer pour l'identification des unités d'étude devraient inclure une multitude de caractéristiques et l'interaction entre celles-ci qui contribuent à influencer le système de référence et par conséquent l'instabilité potentielle ; les principaux sont résumés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 - Principales caractéristiques de la définition de l'unité d'étude.

Caractéristiques	Typologie
Lithologique	Lithotype, stratification, direction, immersion, inclinaison, etc.
Structural	Failles, plis, foliation, clivage, mensonge, etc.
Géomécanique	Fracturation, résistance à la compression, angle de frottement, cohésion, altération, etc.
Géomorphologique	Les processus et les morphologies d'érosion, d'altération et de dissolution, les processus d'effondrement, etc.
Morphologique	Inclinaison de la pente, hauteur de la falaise, exposition et orientation de la pente, etc.
Hydrogéologique	Zone de captage, présence de nappe phréatique, perméabilité, etc.
Hydrodynamique	Taux d'érosion, interactions d'ondes, etc.
Hydrologique et climatique	Précipitations, seuils de précipitations, exposition aux vents dominants, tempêtes de mer, etc.
Instabilité générale	Présence de processus actifs et quiescents, éléments instables (blocs)
D'autres caractéristiques	Présence de couvert végétal, présence d'ouvrages de confinement, etc.

2.3 ENQUÊTES ET TRAITEMENT DE DONNÉES

L'acquisition des données représente un aspect fondamental de la méthodologie, en principe elle peut être directe (sur le terrain : détection géologique-structurale et géomécanique, etc.) ou indirecte (à travers des technologies avancées telles que : photogrammétrie de drones, relevé Laser Scanner, interférométrie différentielle SAR, etc.). Par souci d'exhaustivité, il est bon d'expliquer que dans ce chapitre sont décrits, bien que brièvement, de nombreux éléments qui peuvent ou doivent être détectés lors de l'étude des hautes côtes rocheuses, mais avec une profondeur différente selon l'échelle choisie. Par exemple, en ce qui concerne la définition de zones présentant différents risques hydrogéologiques à grande échelle, seule une petite partie, définie dans les chapitres suivants, sera utile pour produire une zonation des risques et des risques sur les côtes analysées. Alors qu'un plus grand nombre d'observations, d'enquêtes et d'analyses seront nécessaires pour étudier les murs isolés avec des processus d'instabilité en place afin de définir la possibilité de planifier des interventions de sécurité et de stabilisation. Dans ce chapitre, nous distinguons les enquêtes et les analyses qui doivent être menées dans la partie émergée, dans la partie immergée et pour le mouvement des vagues.

2.3.1 Partie Émergée

2.3.1.1 Analyse Photographique multi-temporelle

L'analyse des photos aériennes ne vise pas seulement à identifier les principales caractéristiques de la zone d'étude ; en effet, l'analyse comparative des photos historiques est fondamentale pour révéler la présence et l'évolution dans le temps des phénomènes d'instabilité et de la variation possible du littoral. Les photographies aériennes historiques sont un outil fondamental pour l'étude du territoire : elles sont particulièrement efficaces pour évaluer les transformations survenues dans un contexte géomorphologique particulier et pour identifier les processus d'érosion et de rupture dans le territoire étudié (Figure 2). Une large couverture photographique et la relative facilité de recherche font de cette technique un outil utile et peu coûteux dans l'étude préalable du paysage. Il existe des méthodes de traitement d'images pour cartographier et surveiller l'activité des glissements de terrain en utilisant des images sur lesquelles effectuer une analyse multi-temporelle (Hervás et al., 2003). Le Système d'Information Territorial Régional de Sardaigne offre des données cartographiques par le biais de services standards et l'analyse multi-temporelle peut être réalisée à l'aide de données dans le Géoportail (Photos Historiques) et les services

WMS et TMS (orthophotos et images satellites). Le Système d'Information Territorial Régional de Sardaigne offre des données cartographiques à travers des services standards.

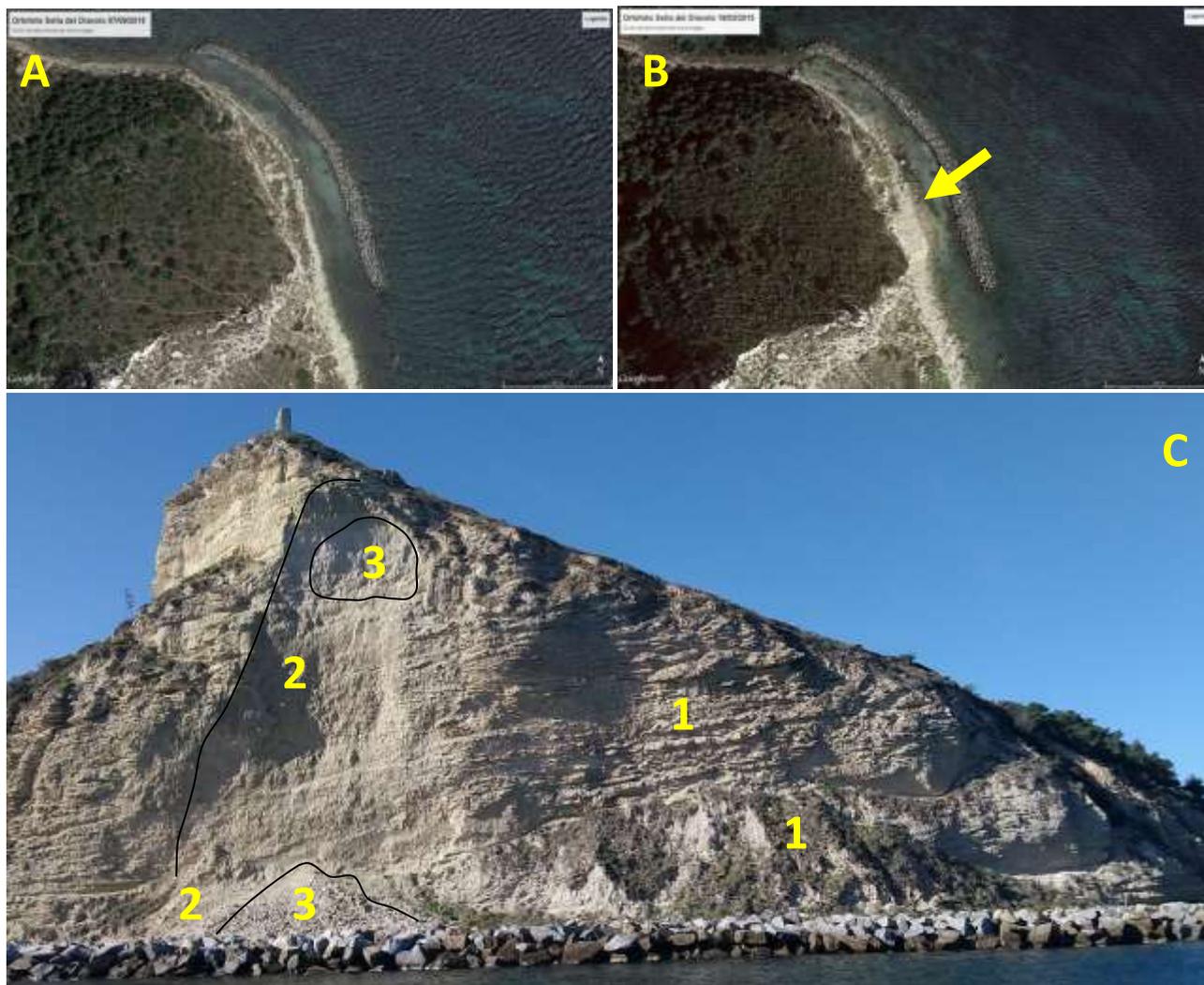


Figure 2 - Analyse multi-temporelle sur une base ortho-photographique des processus gravitationnels du promontoire de Sella del Diavolo où les glissements de terrain glissants se sont développés le long des surfaces sous-planaires de fracturation et d'effondrement et ont une durée de récurrence de trente ans. A) Orthophotos 2015 : les processus gravitationnels sont quiescents ; le dépôt de glissement peut être corrélé avec l'événement du 30 juillet 1987. B) Orthophotos 2017 : nouveaux dépôts de glissements de terrain pour la réactivation des processus gravitationnels (février 2017). C) Effondrement des dépôts de glissements de terrain à Marina Piccola : 1) les niches de détachement altérées et le dépôt colonisé de 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 pierre mise en place après l'événement de 1987.

2.3.1.2 Caractéristiques morphologiques des surfaces

La cartographie topographique permet d'analyser les formes du territoire dans ses caractéristiques morphologiques et d'utilisation par l'homme et constitue la base de référence pour la cartographie des caractéristiques géologiques au sens large. Les surfaces verticales, inclinées ou très inclinées, ne sont pas visibles sur les cartes renvoyées par les données zénithal et doivent donc être détectées avec des systèmes de mesure spécifiques. De plus, ces zones ne sont souvent pas complètement accessibles avec des relevés directs et nécessitent donc des systèmes de télédétection. Les technologies de détection actuelles, en particulier l'augmentation de la performance des systèmes de traitement d'images, rendent disponibles des données permettant la reconstruction tridimensionnelle d'objets avec un très haut niveau de détail. L'aspect plus important, dans ce domaine de détection (parois presque verticales sur la mer), est le choix de

la plateforme à partir de laquelle recueillir les données et sur lequel monter le capteur pour l'acquisition. Comme cela sera décrit et testé pendant le projet, l'utilisation de drones dans ce contexte environnemental semble être la proposition la plus appropriée. Au lieu de cela, il sera possible de proposer un système de détection à partir d'une position fixe et d'un bateau. Les méthodes de télédétection les plus appropriées pour la reconstruction des parois des falaises sont décrites ci-dessous, qui, comme mentionné ci-dessus, soutiennent et intègrent les activités de détection directe et de reconstruction des caractéristiques géologiques nécessaires pour comprendre les processus d'évolution des pentes. Il convient de noter que plusieurs autres techniques sont utilisées pour la surveillance des corps en mouvement, telles que les méthodes basées sur les données GNSS (Global Navigation Satellite Systems) ou les méthodes d'interférence au sol GBSAR Interferometry (Ground-Based Synthetic Aperture Radar). Ces dernières méthodologies, qui supposent des enquêtes non zénithales, peuvent être utilisées lorsque des systèmes d'instabilité sont trouvés (à la fois sous la forme de glissements de terrain et d'expansions conjointes) et ont donc une applicabilité locale notamment en fonction des activités de surveillance. Le *Remote Sensing* peut être définie comme l'ensemble des techniques, outils et moyens d'interprétation permettant d'étendre et d'améliorer les capacités perceptives de l'œil humain, fournissant à l'observateur des informations qualitatives et quantitatives sur les objets placés à distance et dans l'environnement qui l'entoure (Dessena et Melis, 2006). Les outils utilisés pour l'acquisition (Figure 3) peuvent fournir des mesures uniques de radiance, telles que des radiomètres ou des radiomètres à spectre, ou des ensembles de mesures de radiance (images numériques) telles que caméras, caméras thermiques ou dispositifs de balayage. Ces capteurs peuvent être transportés par des satellites, des avions et des drones. Les données acquises sont renvoyées sous forme d'images, c'est-à-dire de matrices numériques présentant une ou plusieurs valeurs numériques pour chaque pixel, qui ne représente donc pas un objet mais l'espace où une grandeur prend une certaine valeur. La résolution spatiale du capteur permet d'obtenir des images avec des détails différents, et plus le système de télédétection est sophistiqué, plus le détail sera élevé.

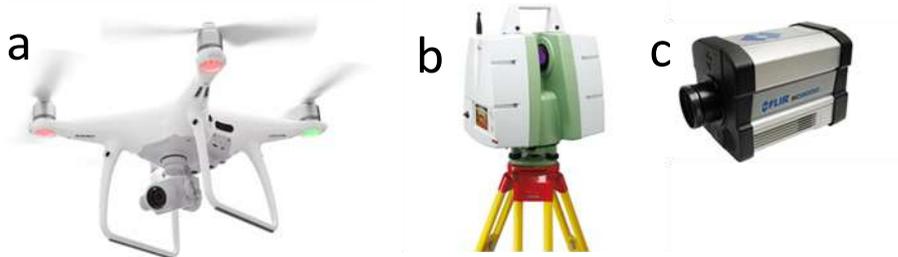


Figure 3 - Outils de Remote Sensing: a) Caméra sur drone; b) Laser Scanner; c) Caméra thermique.

En fonction des grandeurs à mesurer, des capteurs capables de détecter les longueurs d'onde caractéristiques pour la reconnaissance d'objet spécifique peuvent être utilisés. En particulier, dans ce contexte les données spectrales qui permettent de caractériser morphologiquement et géologiquement les parois rocheuses sont celles du visible en mode passif (photogrammétrie) et celles qui permettent aux capteurs actifs d'utiliser la réponse des surfaces comme une caractéristique à mesurer la taille et la position.

La Photogrammétrie numérique permet la restitution d'images ortho-rectifiées capables de fournir une reconstruction numérique de l'élévation et des valeurs visuelles des surfaces étudiées. Cette technique est largement utilisée pour les levés topographiques, principalement sous forme de photogrammétrie aérienne. De nombreuses expériences ont également été testées pour la détection de fronts rocheux à la

fois à l'aide de capteurs montés sur des stations fixes et des drones. En ce qui concerne les données de scanner laser, décrites ci-dessous, également dans le domaine de la photogrammétrie numérique, la puissance de calcul et l'utilisation de logiciels dédiés permettent d'utiliser une grande quantité d'informations, ou des images prises de différents points de vue, garantir une couverture complète de la zone en détection.

La technique Laser Scanner il peut offrir un détail très précis, avec une certaine vitesse d'exécution et parfois une puissance de calcul plus faible par rapport à la restitution photogrammétrique. Les capteurs du Laser Scanner permettent la construction des modèles tridimensionnels des surfaces, vous permettant de reconnaître la réponse de toute couverture végétale et donc de pouvoir la séparer des valeurs d'élévation de terrain. La précision et la résolution du pixel, comme pour tous les capteurs, dépendent des caractéristiques techniques de l'instrument et des conditions d'acquisition. Les produits sont extrêmement précis et caractérisés par un haut degré de richesse et de complétude descriptive, de manière à constituer un outil très utilisé dans le domaine des études géologiques et du surveillance des glissements de terrain.

La Thermographie à infrarouge dans le domaine géologique, il est utilisé pour étudier le comportement thermique des masses rocheuses dans le but d'identifier et d'analyser d'éventuelles relations de cause à effet entre anomalies thermiques superficielles et phénomènes liés à des variations spécifiques d'inertie thermique dues à la variabilité minéralogique ou de la teneur en eau. En particulier, la thermographie trouve des applications pour l'analyse des fronts rocheux et des falaises. Des études de cas récentes ont montré que, en combinaison avec d'autres techniques de télédétection (interférométrie SAR terrestre, scanner laser terrestre et photogrammétrie), est capable de fournir des informations utiles pour la cartographie des zones les plus sujettes aux phénomènes d'effondrement et, par conséquent, pour le zonage des priorités d'intervention pour l'atténuation des risques. Les principaux résultats des techniques de *Remote Sensing* sont donnés par la modélisation 3D de la paroi rocheuse et des modèles numériques de terrain (DTM) (Mazzanti P. et al., 2015).

2.3.1.3 Caractéristiques Géologiques-Structurales

Les caractéristiques géologiques structurales influencent directement et indirectement les conditions de stabilité d'une pente côtière et son évolution dans le temps. Les caractéristiques compositionnelles et génétiques des roches sont un aspect fondamental dans le développement des processus de rupture d'une zone donnée, comme une grande partie de leur comportement mécanique (en particulier la résistance à l'érosion, la perte possible de cohésion, la résistance plus ou moins grande aux phénomènes d'altération, etc.) varie selon les litho-types. L'autre composante géologique, qui permet de définir le comportement mécanique d'une pente rocheuse, est donnée par la présence de discontinuités (surfaces de stratification, fractures, schistosité, etc.) et leurs caractéristiques (Figure 4). Une étude détaillée est donc nécessaire pour une définition complète des caractéristiques géo-structurales de la zone étudiée. La reconnaissance de l'arrangement stratigraphique-structurel permet de distinguer au sein d'une même masse rocheuse les zones les plus instables ou potentiellement les plus exposées à l'instabilité. L'enquête peut être réalisée avec les techniques classiques de travail au sol mais, compte tenu de la faible accessibilité des falaises côtières, elle doit certainement être intégrée à d'autres formes de détection à distance, telles que celles décrites dans les paragraphes précédents. Évidemment, l'interprétation géologique des données qui peuvent être plus facilement acquises avec des systèmes semi-automatiques de levés photogrammétriques reste fondamental. Dans les travaux cartographiques, il est important de faire la distinction entre les différents litho-types à l'intérieur des formations affleurantes, afin de favoriser la caractérisation géotechnique de la zone. Tout aussi importante est la distinction des éléments structuraux tels que la stratification, les failles et les fractures, la schistosité utile pour la définition d'un modèle géologique pour toute analyse détaillée (par exemple études, hydrogéologiques, géomécaniques, géotechniques, etc.).

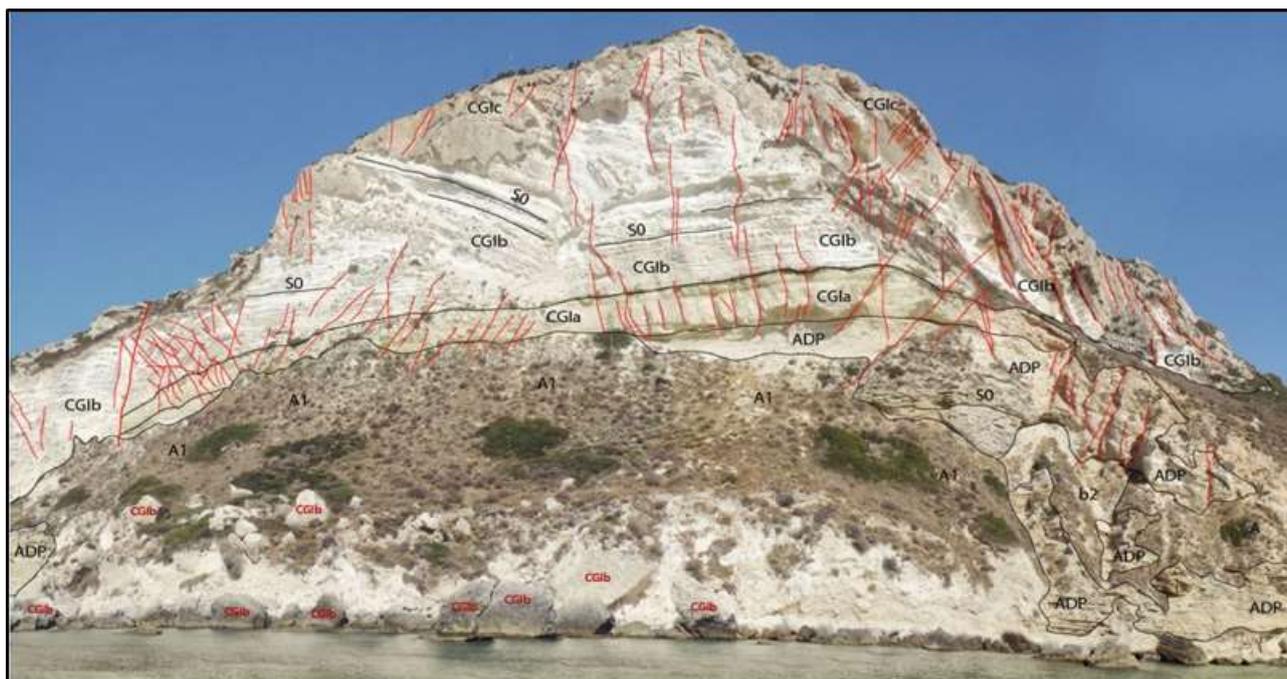


Figure 4 - Analyse stratigraphique, géologique et structurale de falaise de la "Sella del Diavolo" (Cagliari). AD P: "Arenarie di Pirri"; CGla: Lithofacies de la "Pietra de Cantone"; CGlb: Lithofacies de "Tramezzario"; CGlc: Lithofacies de la "Pietra Forte"; A1: dépôts de glissements de terrain stabilisés; S0: stratification. Les principaux contacts stratigraphiques sont noirs; en rouge: fractures principales.

2.3.1.4 Caractéristiques Géomorphologiques

Il existe plusieurs processus et agents qui régissent la morphogenèse dans la zone côtière et qui jouent un rôle important en influençant la propension à l'instabilité d'une falaise (Tableau 2.2). Les processus à court terme liés à l'exposition à des événements météorologiques marins extrêmes et aux processus à long terme liés aux variations climatiques eustatiques peuvent être distingués (Colantoni et al., 2004).

Tableau 2.2 - Synthèse des processus d'altération, des agents et de la morphogenèse des pentes.

Processus	Agents	Dynamique du processus	Morphogenèse
Altération (weathering)	Précipitation Température Vent Spray Marin	Hydratation Thermoclastism Corrasion Haloclastism	Renflements, morphoscultures Fracturation, détachement des écailles, morphosculptures, formes d'érosion
Dissolution	Eaux de Précipitations, Eaux de Résurgence Stylos. Eaux de Résurgence Sous-Marine	Sous-marin karst, sélective karst, littoral karst (Plage des marées)	Formes de dissolution Morphoscultures dans la falaise Sillon de marée Sillon pariétale
Bio-démolition	Organismes sessiles	Bio-dissolution Érosion biomécanique.	Alvéoles supratidales Sillon de marée Plateforme côtière
Érosion	Eau de précipitation Vagues	L'érosion aréal Érosion linéaire Érosion linéaire accélérée Renforcement de mur Incision intertidale Erosion au pied de la falaise	Zones dénudées avec une érosion généralisée, Canaux, ravin Ravines, niches rétrogrades Murs rétrogrades Sillon de marée Sillon pariétale basale

Parmi ces processus et phénomènes complexes, une image concise est donnée ci-dessous qui rappelle les plus pertinents.

2.3.1.4.1 *Weathering dans un environnement de falaise*

La dégradation des agents atmosphériques est le processus de désintégration des roches in situ sans la contribution du mouvement, tandis que l'érosion est liée à la dynamique de l'eau (courants et vagues), du vent ou de la glace, etc. La dégradation implique une modification des propriétés chimiques, minéralogiques et physiques de la roche en réponse aux conditions environnementales dans lesquelles elle se trouve ; contrairement aux processus métamorphiques, cependant, il se produit dans la gamme de température typique de la surface de la terre. La dégradation peut être divisée en dégradation chimique (altération chimique) et en dégradation physique (altération physique), bien que dans la nature elles se produisent souvent simultanément (Fairbridge, 1968). Les processus de dégradation chimique affectant la surface des falaises sont principalement représentés par la dissolution (dissolution - par exemple les roches carbonatées), par l'hydratation (hydratation - par exemple les lithotypes à matrice argileuse) et par hydrolyse (hydrolyse - to exemple de granite et de roches volcaniques). L'étendue du matériau enlevé, même modeste, peut être surveillée à l'aide de trois clous en acier inoxydable fixés dans la surface, en acier spécial ou en titane, sur lesquels sont placés les micromètres de comparaison millésimaux pour la détection (Furlani et al., 2010; Furlani et al., 2011). Les processus de consommation des roches carbonatées sont en partie liés à la corrosion karstique, mais la contribution de la bioérosion est remarquable, à la fois de micro-organismes, d'algues et de bactéries et de macro-organismes, principalement éponges et lamellibranches (Rovere et al., 2015).

2.3.1.4.2 *Processus de retrait des falaises*

Un rôle important, du point de vue morphologique, est couvert par la présence et les caractéristiques de la plate-forme d'abrasion et par les phénomènes d'enlèvement à la base pour la formation de différents sillons formés par l'érosion mécanique et l'activité biologique.

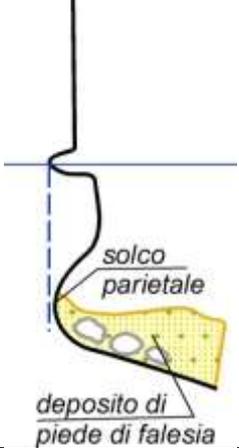
2.3.1.4.2.1 *Plateformes d'abrasion*

L'évolution des plateformes d'abrasion marine est principalement due aux processus d'érosion mécanique associés à l'activité du mouvement de l'onde incidente, où une partie de l'énergie cinétique des vagues est transférée aux dépôts clastiques présents au pied de la falaise. Il existe une forte corrélation entre l'évolution des plates-formes peri-litorales (définies en fonction de l'élévation, de la pente, de la continuité, de l'intégrité, de la hauteur et du taux de rétraction) et l'exposition aux événements extrêmes (Chelli et al. 2010, Pappalardo et al., 2011). Les morphologies caractéristiques des plates-formes d'abrasion sont les formes d'érosion, les canaux et les douches d'érosion, morphologies toujours liées au mouvement des dépôts de pieds de falaise ; tandis que les processus de bio-modélisation et de bio-démolition interagissent sur les surfaces subhorizontales ou légèrement inclinées et les couches supralittorales (Pappalardo et al., 2017). L'approfondissement du fond et le démantèlement des sillons d'érosion sont dus à des processus karstiques accélérés, liés aux variations sensibles du pH jour/nuit déclenchées par l'activité des communautés bactériennes et algales qui peuvent proliférer dans les eaux stagnantes, aussi bien en hypo hyperhaline.

2.3.1.4.2.2 *Sillon de marée et d'enlèvement à la base*

Un rôle fondamental dans le retrait des falaises est celui dû à l'érosion à leur base, due à la formation d'un sillon de marée et d'enlèvement à la base (Tableau 2.3). La genèse de la rainure de marée a été considérée comme étant principalement liée à des processus d'érosion mécanique commis avec l'impact des vagues, d'où le nom de sillon. En particulier, la morphogenèse a été attribuée aux processus de cavitation, dus à l'air emprisonné dans la masse d'eau en mouvement rapide caractéristique d'un point de rupture, ou aux processus d'abrasion opérés par les sédiments en suspension (Carobene 1972, Pirazzoli 1986). Par la suite, la morphogenèse du sillon a été attribuée à l'activité bio-érosive dominante des communautés lithophages (Kelletat, 1997, Laborel et al., 1999, Pirazzoli et EVELPIDOU, 2013).

Tableau 2.3 - Rôle du sillon de marée et des sillons du enlèvement à la base dans l'instabilité côtière.

Tidal notch	Sillon pariétal	Plate-forme d'abrasion	Sillons du enlèvement à la base
			
Environnement d'évolution			
intertidal	subtidal	Supratidal	Supratidal
Facteur			
vagues organismes eau douce	Dynamique sédimentaire	vagues, vagues briseur	vagues briseur (wave runup)
Processus morphogénétique			
karstism, Bio-érosion	Abrasion, Érosion mécanique	Abrasion Bio- modélisation	Érosion mécanique Abrasion
Processus gravitationnels induits			
Effondrements Glissements	Effondrements	Effondrements Glissements	Renversements Effondrements
● <i>Processus de recul bloqués par l'effondrement des dépôts ou l'effondrement-renversement en place (falaises mortes)</i>			

Des études plus récentes ont confirmé que la formation de sillon de marée (*tidal notch*) il est polygénique et les différents processus n'affectent pas toujours la même proportion. Souvent le long des côtes calcaires, en particulier celles proches de la mer, est fortement lié à la présence d'eau douce flottant dans la mer. Dans ce cas, le déclenchement de l'incision et l'analyse approfondie sont dus aux processus karstiques et côtiers. Les processus de bio-modélisation sont souvent très actifs mais il faut prendre en compte l'équilibre entre bio-érosion et bio construction comme les terrasses bio construites avec les *vermetidae*, les gastéropodes sessiles (*Dendropoma petraeum*) ou les trottoirs avec les algues rouges calcaires (*Lithophyllum byssoides L.*, *Lithophyllum incrustans*). Dans certaines parties de la haute côte, en particulier dans les régions particulièrement exposées aux phénomènes météorologiques extrêmes, la démolition résultant de l'eau et de l'air projetées à grande vitesse dans la diaclase en forme de haricot est particulièrement efficace. Les processus karstiques sont actifs sur les parois du pied de la falaise, en présence d'une résurgence sous-marine d'eau douce; dominer les processus d'abrasion des sédiments remobilisés par la dynamique du mouvement des vagues qui conduit à l'évolution d'un sillon pariétal différencié par les caractères morphométriques de sillon de marée, pour une amplitude considérablement plus grande et une profondeur plus faible, alors que sur les surfaces des plates-formes basales, l'action des courants de fond sous-jacents est ajoutée. La détection morphométrique confirme que les sillons ont une amplitude proportionnelle à l'amplitude de l'oscillation de la marée. L'énergie des processus érosifs dans une zone à haute falaise ou falaise est également conditionnée par les tendances de la mobilité tectonique que présente la région ; l'énergie diminue et les processus tendent à ralentir si la zone présente un abaissement tectonique actif (affaissement), tandis que les processus d'érosion accélérée caractérisent les zones de soulèvement tectonique (*Uplift*). Les taux de mobilité tectonique récente (Quaternaire) des zones côtières sont obtenus par l'étude des indicateurs paléo-marins dont les plus utilisés sont les indicateurs

d'érosion et de sédimentation du dernier interglaciaire (MIS 5, Tyrrhénienne Autc.), et l'étude des paléo-sillon de marée joue un rôle clé (Ferranti et al., 2016).

2.3.1.4.3 Processus d'érosion accélérée dans la zone côtière

L'évolution des processus d'érosion accélérée avec des modalités de calanques à la fois aréales et canalisées peut impliquer des lithotypes faiblement cimentés avec une perméabilité moyenne et faible; initialement, des systèmes de canaux de forme irrégulière (*qullies*) ont évolué, ce qui a donné naissance à la morphologie des Calanques.

2.3.1.4.4 DGPV (dépôts gravitaires profonds de pentes) et antiques glissements de terrain dans la zone côtière

Le long des hautes côtes peut évoluer à la fois des méga-glissements de terrain et des déformations gravitationnelles profondes, généralement contrôlées par des failles ; Si la structure stratigraphique est favorable le long des lignées tectoniques principales, des mouvements d'expansion latéraux peuvent se produire avec des surfaces de glissement planes et rotationnelles. Des formes similaires peuvent également être trouvées dans des zones plus stables, comme la Sardaigne, où le long de la côte dans le secteur d'Acqua Sa Canna - Porto Paglia à Gonnosa (Carbonia) constitué d'une série de coulées pyroclastiques rhyolitiques plus ou moins soudées qui repose sur les conglomérats de la matrice marneuse, un grand DGPV à rotation, ont évolué le long de lignes de faille en forme de NNE / SSW qui déplacent les dépôts quaternaires (Buttau et al., 2011) (figure 5). Comme dans de nombreux cas similaires, le mouvement gravitationnel semble s'être développé dans des conditions de niveau de la mer inférieur au niveau actuel (*low stand*), l'évolution s'est donc produite dans des conditions climatiques et eustatiques différentes des conditions actuelles. Autres manifestations de DGPV côtières détectables seulement le long de la côte de Capo San Marco (Oristano), le long de la côte d'Alghero-Bosa et sur la côte de Castelsardo (Sassari). En plus des déformations gravitationnelles profondes, des formes et des dépôts paléo de glissements de terrain ont été préservés le long des côtes de la Sardaigne (Figure 6) malgré un contexte avec une mobilité tectonique relativement modeste. Les cas de mouvements gravitationnels glissants ou planaires peuvent être distingués. Dans d'autres cas, on trouve souvent de grands corps de dépôt de glissements de terrain, souvent cimentés ou faiblement cimentés, dont la surface supérieure est coupée par les processus de rétraction de la banque d'érosion actuelle ; la base du corps du glissement de terrain était donc éloignée de la ligne de rivage actuelle, sur le plateau continental interne actuel. Ce sont des corps de dépôt de remplacement liés au recul accéléré du paléo glissements de terrain (souvent avec contrôle tectonique) dans des conditions climatiques qui augmentent significativement les processus de désintégration physique (climat aride froid, climat aride chaud), qui reprennent des schémas évolutifs similaires à ceux des lignes de faille. L'évolution des conditions climatiques et eustatiques, différente de l'actuelle, identifie le paléo glissements de terrain, ce que nous pouvons observer aujourd'hui est le lambeau résiduel d'un corps sédimentaire beaucoup plus étendu que le niveau de la mer a largement démoli et placé dans des conditions d'instabilité à la fois par rapport à la gravité et l'érosion.

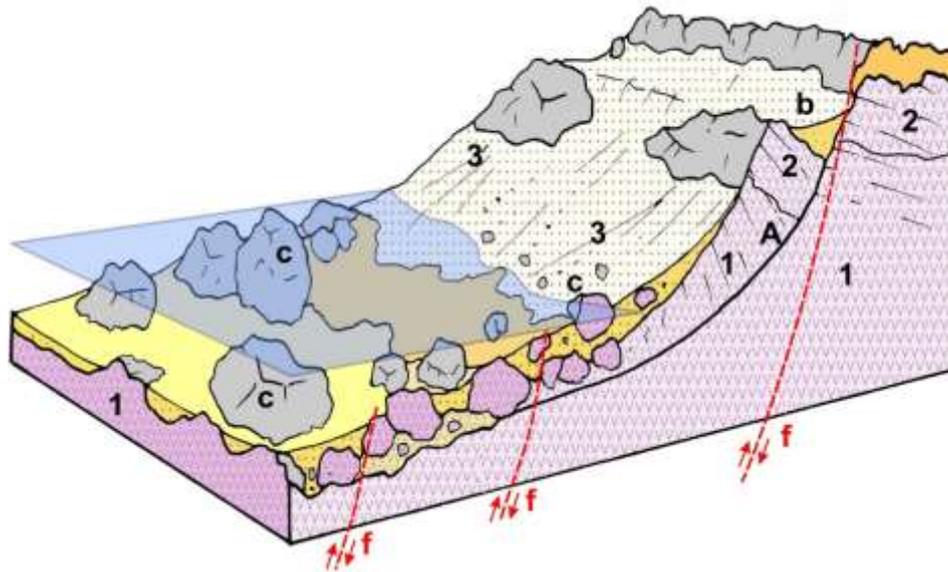


Figure 5 - Schéma fonctionnel du débit de rotation DGPV d'Acqua sa Canna - Capo Altano: 1) Gravier dans la matrice marneuse (Forme Del Cixerri); 2) vulcanites acides, tuf et lave; 3) les Éolianites et les Colloïdes Éoliens; A) surface de glissement rotative; b) une tranchée de détachement; c) des dépôts d'effondrement (Orrù & Ulzega, 1986).

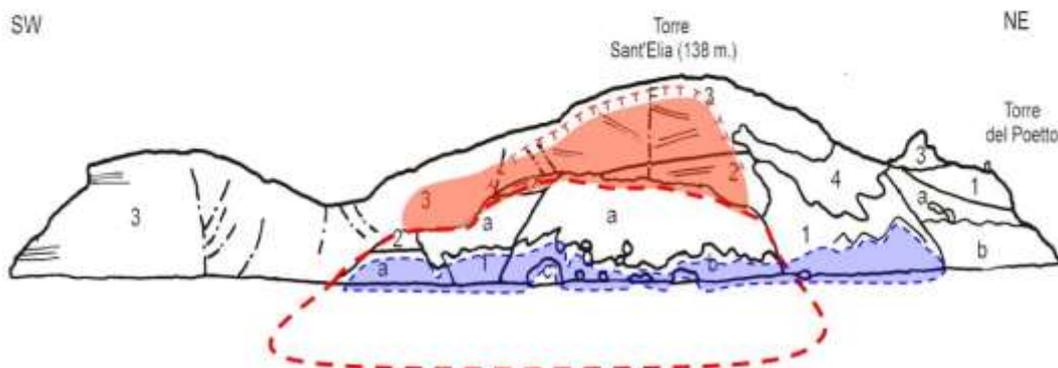


Figure 6 – Paléo glissement de terrain long de la côte du promontoire de Sella del Diavolo (Cagliari); on distingue le paléo-falaise tectonique (a); le corps de glissement de terrain, côté de dépôt de remplacement (b); la banque d'érosion en retrait accéléré incisée par la ligne côtière actuelle.

Les processus d'érosion côtière des dépôts de paléo-glissements peuvent présenter des caractéristiques de retrait accéléré (dynamique d'effondrement ou effondrement par effondrement) ou de plomb, le cas échéant, à la réactivation de surfaces de glissement préexistantes (dynamique de glissement rotationnelle ou planaire).

2.3.1.4.5 Cartographie Géomorphologique

Les outils les plus efficaces pour illustrer et comprendre la réalité physique du territoire étudié sont représentés par des cartes géomorphologiques, des documents produits à partir d'enquêtes directes et systématiques réalisées sur le terrain et des images obtenues par télédétection (photographies aériennes et images satellites). Les données, mesurées à différentes échelles par rapport aux objectifs des enquêtes, sont reportées sur des images topographiques ou agrandies (orthophotos, photomosaïque, etc.) afin de mettre clairement en évidence leur distribution spatiale et leurs relations réciproques. L'analyse synoptique et intégrée des données susmentionnées permet d'esquisser le cadre morpho-évolutif de la zone étudiée et de formuler des prévisions raisonnables sur ses tendances évolutives futures. Pour cette dernière raison, en plus de leur valeur scientifique indiscutable, les cartes géomorphologiques jouent un rôle important dans le domaine d'application, notamment en ce qui concerne la planification du territoire, l'atténuation des risques naturels et la prévention des catastrophes. L'analyse géomorphologique appliquée à l'étude des processus gravitationnels dans la zone côtière a pour but de restituer des cartes géomorphologiques élaborées avec suffisamment de détails pour permettre une représentation fidèle des morphologies reconnaissables (sur les pentes, le long de la côte, etc.) et leur définition sous morphographique, morphométrique, morphologique, morpho-chronologique et morpho-dynamique. (Dramis & Bisci, 1998). La représentation des processus suit des procédures morphométriques codifiées (IAEG Commission on Landslides 1990-2006) pour les représentations planaires et en section. Il est proposé une légende géomorphologique qui s'inspire des principes et symboles proposés dans le livret du Service géologique national, Série III, Volume 4 "Carte géomorphologique de l'Italie – 1/50000 Guide de l'étude" et en particulier le schéma de la légende du papier géomorphologie de la région de Toscane. La légende proposée (voir l'annexe C) maintient une approche basée sur les subdivisions traditionnelles en :

1. hydrographie et éléments météorologiques-marins
2. formes, processus et dépôts de pente dus à la gravité
3. Formes et dépôts d'origine karstique
4. Formes et dépôts d'origine marine
5. les produits de l'altération météorologique in situ
6. formes épaves, surfaces de lissage et formes associées parfois de genèse complexe.

Pour les glissements de terrain, une symbologie spéciale a été adoptée qui est représentative du type de mouvement (4 classes) et de l'état d'activité (4 classes) suivant un schéma qui descend de la classification traditionnelle de Varnes (1978).

2.3.1.5 Caractéristiques Géomécaniques

Les caractéristiques géomécaniques influent fortement sur la stabilité des hautes côtes; les masses rocheuses sont pour la plupart fracturées et donc largement conditionnées dans leur comportement mécanique par les discontinuités qui isolent la masse rocheuse dans des volumes de roche unitaire. Pour prédire et prévenir les phénomènes gravitationnels, il est donc essentiel que la structure de la masse rocheuse et la nature de ses discontinuités soient soigneusement analysées. Les complexités géomorphologiques et l'accessibilité difficile des talus rocheux rendent difficile, dans de nombreux cas, l'acquisition systématique des paramètres géomécaniques (recommandations de I.S.R.M.) et par conséquent la caractérisation de la masse rocheuse. Ces dernières années, l'avènement des techniques de télédétection, telles que la photogrammétrie et le Laser Scanner, a ouvert de nouveaux scénarios en analyse géostructurale grâce à leur capacité à reconstruire des modèles tridimensionnels de la pente (Salvini et al., 2013; al., 2014). Le tableau 2.4 présente les éléments et paramètres essentiels de la définition des caractéristiques géomécaniques des masses rocheuses.

Tableau 2.4 - Méthodes et outils pour l'étude géomécanique de la masse rocheuse.

Objet	Méthodes	Instruments
Nature de les discontinuité (stratification, failles, fractures, diaclase, foliation, clivage, joints de refroidissement)	Détection géomécanique directe et indirecte (Photogrammétrie, Laser Scanner, photoanalyse, thermographie infrarouge)	Mesures directes sur le terrain (Scléromètre, etc.) et indirectes par Remote Sensing (UAV, Laser Scanner, caméras numériques et caméras thermiques), Software pour modélisation 3D, etc.
Géométrie des discontinuités (direction, inclinaison d'immersion)		
Caractéristiques de discontinuité : espacement, JRC, persistance, ouverture, amplitude, remplissage, altération, conditions hydrauliques, résistance à la compression des parois, altération, index Ib & Jv.		
Propriétés physiques : masse volumique, porosité, coefficient d'imbibition, degré de compacité	Analyse de laboratoire	Balance hydrostatique, porosimètre, etc.
Propriétés mécaniques : résistance à la compression uniaxiale, résistance à la traction, résistance à la flexion, modules d'élasticité.		Point Load Test, compression uniaxiale, essais de coupe directe et triaxiale, Berinois, Slake Durability Test, Tilt test, etc.)

Parmi ceux-ci, les propriétés physiques (masse volumique, porosité, coefficient d'imbibition, degré de compacité, etc.) sont importantes pour l'évaluation des caractéristiques mécaniques (résistance à la compression uniaxiale, résistance à la traction, modules d'élasticité, résistance à l'abrasion) et leur variation dans le temps causée par les processus d'altération qui, dans les zones côtières, sont particulièrement accélérés par de l'action de la spray de la mer. Les propriétés mécaniques de la masse rocheuse varient systématiquement dans les zones d'altération. Dans le granite, la perte de résistance des roches modérément altérées par rapport aux roches fraîches est de 80% et dans les argiles de 75%, en raison de l'augmentation des micro-fractures. Les microfractures, les pores et les vides sont donc les facteurs dominants qui contrôlent la résistance des roches plus que la minéralogie elle-même (Gupta & Rao, 2000). Des études sur les basaltes ont montré que la résistance à la compression des roches mesurée au scléromètre (marteau de Schmidt), la vitesse des ondes de compression et le poids du volume diminuent avec le degré d'altération de la roche, tandis que la porosité et l'absorption augmentation de l'eau (Gurocak et Kilic, 2005). Certains auteurs ont proposé des indices pour évaluer la susceptibilité des roches à l'altération du sel, en particulier dans les milieux côtiers, dont la synthèse est présentée dans le tableau 2.5.

Tabella 2.1 - Indici per la valutazione della suscettibilità delle rocce all'alterazione

Altération	index	Référence bibliographique
Susceptibilité des roches à l'altération du saline	n/St (MPa^{-1}), où: n = porosité, St = résistance à la traction	Sunamura et al 2007
Index de susceptibilité à l'altération	$WSI=P/St$ (MPa^{-1}), où: P = pression de cristallisation totale, St = résistance à la traction	Matsukura & Matsuoka 1996
Sels lixiviables dans l'eau	Concentration en mg/l de sels lessivés dans l'eau	Cabria, 2015
Degré d'altération	$Rw=Dw/Te$ (mm/a), où: Dw = profondeur de la cavité, Te = temps en années d'exposition	Cabria, 2015

2.3.1.6 Caractéristiques Géotechniques

Les côtes rocheuses sont constituées non seulement par des falaises mais aussi par des pentes raides qui atteignent souvent la mer, couvertes par de nombreux types de dépôts récents (coutres

éluviaux-colluviaux, dépôts de glissements de terrain, dépôts anthropiques). Ces dépôts, en grande partie meubles, possèdent des caractéristiques géotechniques plus proches de la terre que des masses rocheuses (dépôts cohérents) et méritent par conséquent un traitement distinct par rapport à la masse rocheuse. Les dépôts de la pentes et les dépôts éluviaux-colluviaux sont souvent affectés par les mouvements de masse provoqués par le déplacement différentiel des matériaux en vrac sous l'action de la gravité. Le déclenchement des processus de pente est principalement lié à :

- facteurs qui surchargent les pentes (augmentation de la teneur en eau, poids de la neige, dépôts d'effondrement, remise en état des terres);
- facteurs qui réduisent le support (minent la base par le mouvement des vagues, l'activité karstique, la dissolution, l'érosion);
- facteurs qui provoquent des pressions latérales (gonflement des argiles, déformation, séchage, gel de l'eau dans les fissures, etc.);
- les facteurs qui exercent des efforts de coupe transitoires (activité sismique, effondrements, etc.);
- facteurs intrinsèques initiaux (nature des matériaux, stratification des couches, orientation de la pente, etc.);
- facteurs externes ultérieurs (altération physique et chimique des matériaux, variations de la teneur en eau, etc.).

Grâce à une série d'analyses géognostiques in situ et de tests de laboratoire (tableau 2.6), il est possible d'obtenir les paramètres fondamentaux définissant les caractéristiques géotechniques des dépôts, notamment la taille des particules, les limites d'Atterberg, le poids volumique, la teneur en eau, angle de frottement, cohésion, etc.).

Tableau 2.6 - Méthodes et outils de caractérisation géotechnique des dépôts incohérents.

Objet	Méthodes	Instruments
Caractéristiques Géotechniques: granulométrie, Atterberg limites, Propriétés de l'index (poids spécifique, index vide, etc.) Teneur en eau, Activité argileuse, Angle de friction interne, cohésion, Coefficient de perméabilité	Échantillonnage Analyse géotechnique in situ et en laboratoire	Tests pénétrométriques in situ, analyses granulométriques, Test le bleu de méthylène, Test de coupe directe, résiduelle, Test triaxiaux, Tests édométriques, etc.

Sur la base des tensions locales attendues sur les pentes et les conditions de drainage, les paramètres de cohésion et de résistance au frottement peuvent être déterminés par des essais de coupe directe et résiduelle, des pentes affectées par l'instabilité des socs de surface ou par des essais triaxiaux pour la vérification de la trajectoire de contrainte et de la perméabilité du sol, lorsqu'une surface de glissement plus profonde est prévue.

2.3.1.7 Caractéristiques Hydrogéologiques

Les caractéristiques hydrogéologiques conditionnent la stabilité d'une zone à la fois directement et indirectement. Comme on le sait dans la littérature, l'interaction de l'aquifère avec le substrat peut influencer l'altération des roches et des pentes, affectant leur stabilité et leurs caractéristiques géotechniques (résistance au cisaillement, angle de friction interne, altération, karst, etc.). Les principales caractéristiques hydrogéologiques sont: les relations entre le bassin hydrographique et hydrologique, la perméabilité, l'infiltration, la géométrie de l'aquifère, la direction de l'écoulement, le coefficient de perméabilité (tableau 2.7). Souvent spatialement le bassin hydrogéologique avec le bassin hydrographique

ne coïncident pas, l'écoulement des eaux de surface avec infiltration dépend de la stratigraphie et des caractéristiques géologiques du sous-sol ainsi que des conditions morphologiques; Pour cette raison, il est essentiel d'établir ses limites physiques. La perméabilité est certainement l'une des caractéristiques les plus importantes à quantifier car elle identifie le comportement hydrodynamique d'un complexe hydrogéologique. La perméabilité dépend directement des caractéristiques génétiques des roches et d'une série de facteurs découlant de leur histoire géologique. Deux types principaux de perméabilité peuvent être distingués: une perméabilité pour la porosité primaire et une perméabilité pour fracturation.

Tableau 2.2 - Principales caractéristiques hydrogéologiques.

Objet	Méthodes	Instruments
Identification du bassin versant et du bassin hydrogéologique	Etudes géologiques sur le terrain, études hydrogéologiques	
Perméabilité	Essais de pompage et analyses de laboratoire (coefficient de perméabilité, granulométrie)	Pompes, débitmètres, piézomètres, compteurs de flux, perméamètre à charge variable et constante
Infiltration	Méthodes analytiques (Horton, Philip, Kostiakov, Dvorak)	Mesures directes avec des infiltromètres,
Géométrie de l'aquifère	Reliefs piézométriques, reliefs géophysiques	Piézomètres, frétimètres, prospection géoélectrique
Direction de flux de l'aquifère	Modélisation (Modflow), analyse isopiézométriques	Software, traceurs, piézomètres
identification des sources d'eau	Reliefs, thermographie, analyse physique et physico-chimique	Caméras thermique, sondes multi-paramètres, etc.

La porosité primaire est déterminée en grande partie par la composition minéralogique de la roche; la porosité secondaire est donnée par les facteurs liés à l'histoire géologique (fissuration, fracturation, stratification, schistosité, altération, tableau 2.8). La perméabilité primaire peut être évaluée consécutivement in situ à travers une série d'observations directes en considérant par exemple les relations stratigraphiques, la stratification, la présence de percolations d'eau ou de sources et resurfaces possibles corrélées avec des variations granulométriques. Les caractéristiques granulométriques peuvent être déterminées par des analyses granulométriques de laboratoire). Dans les masses rocheuses, les méthodes d'infiltration et de circulation de l'eau sont étroitement liées à la présence de fractures, d'articulations, de microfissures et de diaclases (tableau 2.9). En général, la plupart des affleurements présentent un certain degré de fracturation; ils peuvent être considérés comme un ensemble de blocs de roche intacts et délimités.

Tableau 2.8 - Facteurs de caractérisation de la perméabilité pour porosité (Civita, 2005).

Facteurs de caractérisation	Observations, reliefs, mesures, analyses	
	Terrain	Laboratoire
Lithologie et caractéristiques pétrographiques	Conductivité hydraulique	Analyse minéralogique
Caractéristiques granulométriques	Collection d'échantillons	Analyse de la taille des particules
Diamètre des granules	Test du conteneur	Analyse de la taille des particules
Degré d'assortiment	Test du conteneur	Coefficient de calcul de l'uniformité
Porosité totale	Détermination volumétrique	Picnomètre et porosimètre
Porosité efficace	Tests d'émission	Calcul de la porosité effective
Conductivité hydraulique	Tests d'infiltration (Slug Test)	Coefficient de perméabilité K

Tableau 2.9 - Facteurs de caractérisation de la perméabilité pour fracturation (Civita, 2005).

Facteurs de caractérisation	Observations, reliefs, mesures, analyses	
	Remote Sensing, Thermographie	Champ

Lithologie et caractères pétrographiques	Localisation et géoréférencement	Principales caractéristiques
Type de discontinuité		Articulations, diaclases, stratification, schistosité, microfissuration
Enquête des discontinuités	Tendance, position et géoréférencement des linéaments; Thermographie (humidité)	Orientation, immersion, extension, ouverture, remplissage, recouvrement des sols
Systèmes et familles de discontinuité	Persistence, fréquence (levés photogrammétriques et Laser Scanner)	Fréquence de l'interconnexion entre les familles, persistence, indice de fracture
Modèle hydrographique	Type d'enquête et zonage	Points manquants
Conductivité hydraulique	-	Tests d'infiltration (Slug Test), tests de traçage
Fonction hydrogéologique des discontinuités	Distinction des discontinuités humides de celles sans eau	Tendance selon la topographie et la profondeur

Pour l'évaluation des méthodes d'infiltration et de circulation de l'eau, il est nécessaire d'élaborer un modèle conceptuel qui identifie la géométrie du réservoir et des discontinuités qui influencent son drainage. La géométrie des discontinuités en fonction de la morphologie et de la pente des pentes influence l'infiltration et l'écoulement des eaux souterraines. L'un des aspects fondamentaux pour comprendre le comportement hydrodynamique du système hydrogéologique est lié à la géométrie des discontinuités en fonction de la topographie. La position spatiale des discontinuités en fonction de la morphologie et de la pente des pentes influence grandement l'infiltration et l'écoulement des eaux souterraines (Schoeller, 1974).

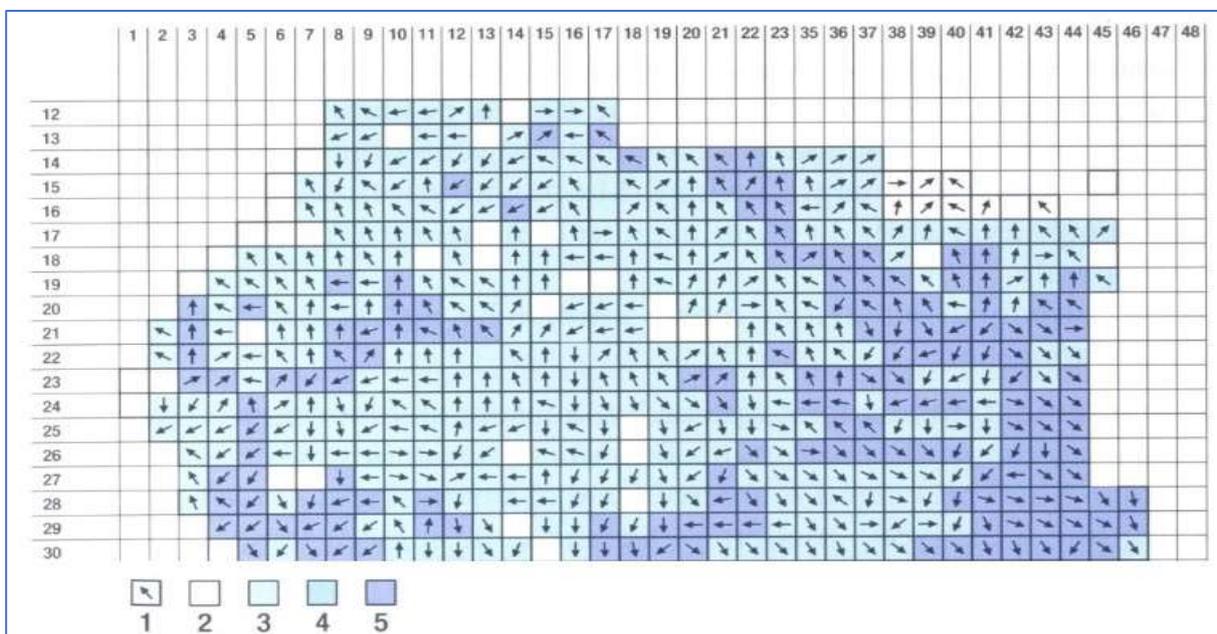


Figure 7 - Principaux systèmes de fractures croisées avec pente de pente (Civita, 2005). 1) Direction préférentielle de la fracture principale; 2) index de fracture zéro; 3) faible; 4) moyen; 5) haut.

Selon Schoeller (1974), les familles de discontinuité placées transversalement par rapport à la pente ont une fonction d'interception et d'infiltration sur la sortie superficielle; à la place, les familles coaxiales par

rapport à la pente recouvrent principalement un rôle de transport. Grâce à l'utilisation d'une grille à mailles carrées, il est possible de chevaucher le champ de fracturation (en distinguant pour chaque cellule la fracture dominante), rapporté sur un support topographique approprié (DTM). Le croisement de la morphologie obtenue par le DTM avec le champ de fractures permet de discriminer la fracturation selon ses principales fonctions hydrogéologiques, en obtenant le tracé des directions potentielles du flux souterrain (Figure 7). Cette méthode est surtout utile dans la phase d'étude préliminaire car elle met en évidence les relations entre la fracture principale et l'écoulement souterrain potentiel. La présence de sources d'eau avec leur régime, sont déterminées par les conditions géologiques et morphologiques de l'aquifère. Les relations entre les caractéristiques géologiques et la présence des sources d'eau peuvent renseigner sur les caractéristiques des aquifères proches des falaises et des pentes côtières. L'écoulement des sources subit des variations dans le temps qui sont en relation directe avec les précipitations survenant dans le bassin qui les alimente et par conséquent aussi avec le niveau piézométrique de l'aquifère.

2.3.1.8 Caractéristiques climatiques

Les analyses climatiques sont nécessaires pour la prévision des perturbations côtières déclenchées par les tempêtes et les fortes pluies. De plus, les caractéristiques hydrologiques peuvent fournir des éléments utiles pour prévoir les scénarios de risque possibles au fil du temps, dérivés d'événements de précipitations supérieurs à la moyenne. L'écoulement superficiel est régulé par l'inclinaison de les pentes et par les paramètres intrinsèques et extrinsèques qui caractérisent le complexe eau-roche-sol (précipitation, perméabilité, infiltration, bassin versant, couverture végétale, etc.). Comme largement reconnu dans la littérature, la précipitation est considérée comme l'un des facteurs déclenchants dominants dans les processus hydrogéologiques, en particulier pour les coulées de débris. En correspondance de précipitations particulièrement intenses, la quantité d'écoulement de surface élevée génère des phénomènes de ruissellement avec un transport de charge solide qui peut dégénérer en écoulement de débris (*debris flow*), avec des concentrations élevées en matériaux solides et qui, en raison de la vitesse de propagation et de la résistance aux chocs qui les caractérisent, possèdent généralement une capacité de destruction élevée et jouent un rôle important dans l'évolution morphologique des pentes. Depuis les années 1980, plusieurs auteurs (dont Cannon & Ellen, 1985) ont tenté de déterminer les seuils de déclenchement pluviométrique de validité locale à mettre en œuvre dans les systèmes d'alerte. Dans ce contexte, un "seuil pluviométrique" est défini comme la valeur minimale ou maximale d'un certain paramètre (par exemple l'intensité ou la durée de la précipitation) capable de déclencher un changement dans les conditions de stabilité d'une pente (White et al. 1996). La plupart des seuils pluviométriques sont déduits empiriquement, c'est-à-dire basés sur les données historiques disponibles, et sont reportés sur le plan de l'intensité-durée proposé initialement par Caine (Caine, 1980, Moser & Hohensinn 1983, Cancelli & Nova, 1985, Wieczorek, 1987) constituant la limite inférieure des précipitations liées à l'occurrence des glissements de terrain, en particulier les écoulements de surface et de *debris flow*. Certains types de seuils pluviométriques envisagent d'influencer l'effet des précipitations précédentes (Crozier, 1999, Glade et al., 2000, Rahardjo, 2008) en ce qui concerne la précipitation critique de l'événement (comprise comme la quantité de pluie tombée le jour du glissement). L'influence des précipitations antérieures sur la stabilité des pentes, en particulier sur les pentes constituées de dépôts meubles (coutres éluvio-colluviaux, dépôts de glissements de terrain, dépôts de talus, sols) est toujours une source de débat (Martelloni et al., 2012). La détermination des seuils pluviométriques par une approche probabiliste basée sur les statistiques bayésiennes semble avoir donné des marges de prévision plus fiables que d'autres approches. L'approche statistique bayésienne, comparée à la plupart de la littérature existante concernant les seuils pluviométriques (Guzzetti et al., 2007), prend en compte à la fois les précipitations qui déclenchent les processus de défaillance (donc la probabilité d'avoir un certain événement générant un glissement de

terrain) que les précipitations ne «déclenchent» pas (donc la probabilité a priori qu'un glissement de terrain soit généré sans précipitations). Les seuils de précipitations peuvent représenter un outil important pour soutenir la prédiction des glissements de terrain, bien qu'ils n'intéressent pas les processus physiques qui sous-tendent la relation amorçage des précipitations; en effet, en tant que données d'entrée, les variables de contrôle sont considérées comme des caractéristiques de l'événement météorologique (en particulier, la durée et l'intensité). La plupart des modèles existants prennent en considération les aspects hydrologiques, hydrogéologiques, morphologiques et géotechniques de la pente, tentant de reproduire les phénomènes physiques qui se produisent dans la pente et qui déterminent l'instabilité (Montgomery et Dietrich, 1994; Wilson et Wieczorek, 1995; 1998, Crosta et Frattini, 2003, Crosta et Agliardi, 2003). Ces modèles sont généralement composés du couplage de deux modules: l'un hydrologique et l'autre d'analyse de stabilité. Alors que le calcul de la variation du facteur de sécurité est effectué dans la plupart des cas par la méthode de l'équilibre limite dans l'hypothèse de la pente infinie, les modules hydrologiques montrent des différences substantielles entre eux.

2.3.2 PARTIE SUBMERGÉ

La définition des surfaces immergées et des caractéristiques géologiques des zones faisant face aux falaises côtières joue un rôle important dans la définition des processus qui déclenchent leur instabilité. Ces types d'enquêtes ne sont certes pas simples d'un point de vue logistique, mais compte tenu de l'importance qu'elles revêtent, il faut considérer l'opportunité d'utiliser, ou de mettre en œuvre, la bathymétrie ex-novo construite avec la méthode *multibeam*. La combinaison d'un système *multibeam* et d'un *Laser Scanner* sur la même plate-forme permet d'effectuer des enquêtes plano-altimétriques des secteurs côtiers, en acquérant à la fois les secteurs émergé et submergé (Figure 8) (Mitchell et al., 2010). Jusqu'à présent, ce type de configuration a été utilisé pour l'analyse d'ouvrages de génie maritime tels que les quais, les brise-lames ou pour réaliser des études visant à l'alimentation des plages, etc. Cette application a l'avantage de permettre la détection de zones périlleuses et inaccessibles telles que les falaises; le *dataset* résultant permet, en fonction de l'instrumentation utilisée, le retour de modèles de terrain numériques extrêmement détaillés et précis.

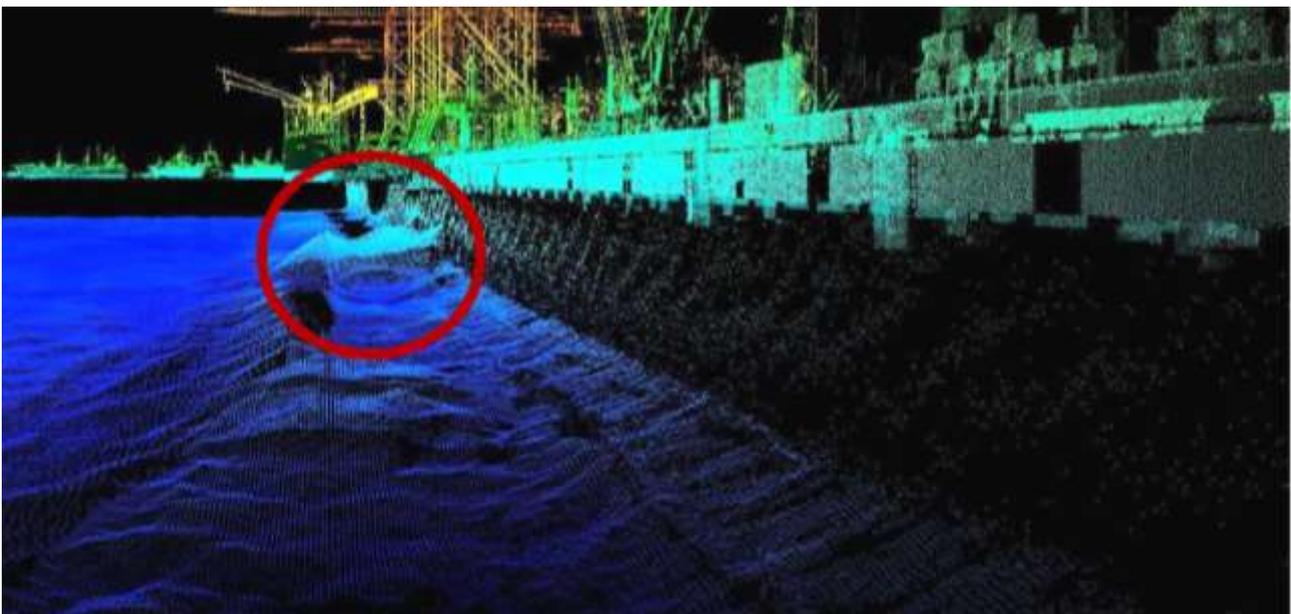


Figure 8 - Exemple de retour tridimensionnel des données acquises avec le système Laser Scanner/Multibeam intégré.

En 2000, les systèmes de balayage laser aéroporté (ALS) ont été introduits pour effectuer des études archéologiques (Doneus et Briese, 2011); aujourd'hui, ils sont devenus une méthode valable pour

l'acquisition de données pour le retour de modèles numériques de terrain détaillés (DTM) dans le domaine terrestre. Des systèmes similaires, mais utilisés dans le domaine marin (ALB - bathymétrie laser aéroportée), nécessitent un laser qui permet à la pénétration de la colonne d'eau d'acquérir la morphologie submergée; pour cette raison, une impulsion verte à 532 nm est utilisée dans la plupart des systèmes ALB (Pope & Fry, 1997, Bukata et al., 1995). L'un des principaux avantages de l'ALB par rapport aux autres méthodes hydrographiques (sonar multifaisceaux) est le peu de temps requis pour l'acquisition. L'ALB peut donc être utilisé sur de vastes zones pour renvoyer des caractéristiques topographiques et éventuellement planifier d'autres campagnes d'acquisition en utilisant d'autres technologies d'arpentage bathymétriques dans des zones d'intérêt particulier.

2.3.2.1 Modèle numérique de la toile de fond: relevés bathymétriques

L'un des problèmes fondamentaux à résoudre lorsqu'on aborde les problèmes inhérents à l'étude des hautes côtes rocheuses est celui d'avoir un support cartographique de base valable pour rapporter les thèmes de synthèse des études et des enquêtes réalisées. Les progrès technologiques ont répondu à ce besoin et plusieurs technologies ont été utilisées pour la reconstitution tridimensionnelle du fond marin pendant plusieurs années (Figure 9). La cartographie bathymétrique *multibeam* a considérablement amélioré la connaissance des caractéristiques morphologiques présentes sur les fonds marins et des processus géologiques qui agissent dans de tels environnements, impliquant différents secteurs disciplinaires tels que la géologie marine, la géophysique, l'ingénierie maritime, l'archéologie, la géodésie, etc. La possibilité d'obtenir des DEM à haute résolution et précision, ainsi que des mesures de réflectivité des fonds marins, représente aujourd'hui un moyen irremplaçable pour l'étude et la surveillance de l'environnement et l'identification des géo-risques marins. En plus de cette technologie, le système *singlebeam* est utilisé; c'est un outil qui mesure le temps d'aller-retour d'un signal acoustique entre son émetteur/récepteur, le soi-disant transducteur qui remplit la fonction d'émetteur et de récepteur à différents moments, et une cible qui est presque toujours le fond marin. Le choix de l'une ou l'autre technique dépend, outre des ressources économiques, également des limites environnementales présentes dans les deux technologies.

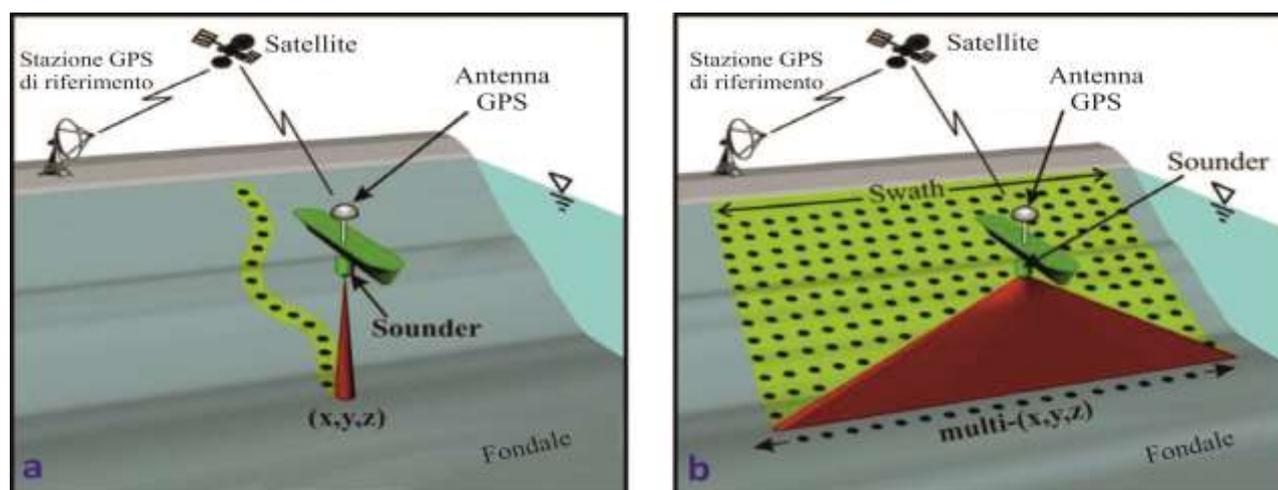


Figure 9 - Techniques d'arpentage bathymétriques des fonds marins: a) singlebeam; et (b) multibeam. De Muste et al. (2010) mod.

2.3.2.2 Reliefs bathymétriques *singlebeam*

Les reliefs bathymétrique à *singlebeam* (SBES) doit être réalisé à l'aide d'un sondeur hydrographique de précision d'une résolution de 1 cm, d'un cône d'émission inférieur à 10° et capable de fonctionner à une fréquence d'au moins 200 kHz. L'instrument sera interfacé de manière appropriée avec un système d'acquisition pour l'enregistrement numérique de données bathymétriques et leur géoréférencement. Le

système doit également être interfacé avec une plate-forme inertielle (compensateur d'ondes) pour la correction des données bathymétriques de l'effet des vagues.

2.3.2.3 Reliefs bathymétriques multibeam

L'instrument utilisé est un échosondeur Multibeam à très haute résolution qui fonctionne avec des signaux acoustiques à une fréquence de fonctionnement d'au moins 455 kHz; la largeur du balayage ne doit pas être inférieure à 130° de manière à acquérir, avec le transducteur monté en position horizontale, un couloir large d'au moins 3 fois la profondeur de l'eau jusqu'à une profondeur maximale d'au moins 60 mètres.

Pour fonctionner correctement, le système sera supporté par l'instrumentation externe suivante:

- Système de positionnement / attitude / direction intégré composé de:
- Plate-forme inertielle pour la compensation des mouvements de navires;
- Girobussol pour la correction de l'orientation du bateau;
- Sonde pour mesurer la vitesse du son dans l'eau continue et le profileur;
- Système de positionnement avec correction différentielle RTK (Real Time Kinematik) et précision centimétrique pour le géoréférencement correct des points échantillonnés.

Le *software* de gestion du système enregistrera les données provenant du Multibeam et des différents instruments et les enregistrera en format numérique pour la prochaine phase de *post-processing*.

Les résultats détaillés des ultrasons, à faisceau unique (*Singlebeam*) et multi-faisceaux (*Multibeam*) suivent des procédures standard dans les différentes phases:

- 1) Planification des enquêtes;
- 2) Les étalonnages;
- 3) Traitement;
- 4) Retour des données.

2.3.2.4 Reliefs Side Scan Sonar

C'est une technique de relief acoustique pour l'étude indirecte de la morphologie des fonds marins et des faciès géologiques qui caractérisent les fonds marins. Le *Side Scan Sonar* (SSS) est un instrument acoustique capable de détecter les anomalies morphologiques et texturales du fond marin, comme des roches isolées, des variations latérales de sédiments de granulométrie et de composition différentes, des dépressions et des structures anthropiques submergées. Le plot d'intensité de réflexion (*backscatter* ou réflectance) produit une image numérique (figure 10) où chaque pixel individuel représente une cellule inférieure. La *backscattering* est la rétrodiffusion ou la réflexion d'ondes acoustiques par un terrain, c'est-à-dire l'effet de réflexion des ondes ou du signal émis par le transducteur dans la direction de la source. Le tow-fish est soigneusement connecté au système d'ordinateur portable, en utilisant le câble "*Towcable*" qui sert également de câble de remorquage.

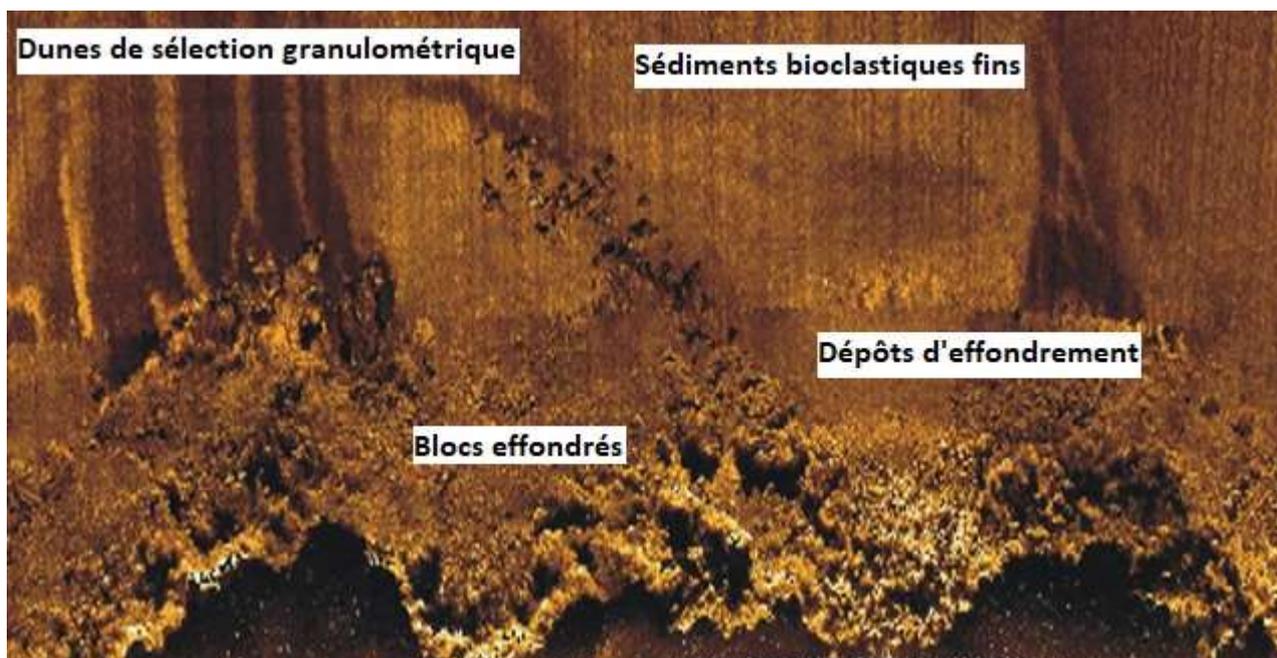


Figure 10 - Image SSS du pied de la falaise ouest de l'île Tavolara, discrimination des principaux motifs du sonogramme, à la fois sur la base des caractères structuraux de l'image et de la backscatter.

2.3.2.4.1 Reliefs directe en plongée sous-marines

L'étude géologique et géomorphologique en immersion est toujours soutenue par une première base de connaissances, généralement acquise avec des méthodes géophysiques. L'enquête directe vise à élaborer des clés interprétatives utiles à la restitution objective des bases géophysiques; la première phase est donc représentée par l'identification et la sélection des points clés situés dans les zones où sont concentrés les principaux problèmes d'interprétation ou les éléments particulièrement significatifs par rapport au sujet étudié.

2.3.2.4.2 Interprétation et retour des données et analyse stratigraphique

La procédure précédente, associée aux observations directes recueillies en immersion, permet:

- suivre en mer les limites géologiques déjà cartographiées sur le terrain;
- déterminer la lithologie des affleurements rocheux submergés;
- développer les limites entre différents lithotypes;
- lire l'évidence des caractéristiques tectoniques;
- déterminer l'état d'évolution des formes côtières et sous-marines;
- révéler les principaux faciès sédimentaires;
- reconnaître des signes de morphologie érosive sur les falaises submergées.

La caractérisation géologique et géomorphologique des fonds marins permet donc la caractérisation et la distribution de sédiments incohérents, de substrats rocheux et la présence d'écosystèmes sensibles tels que les herbiers de Posidonie océanique. Cette analyse est principalement effectuée sur la base des données aérofotogrammétriques pour les secteurs perpendiculaires à faible profondeur (<8 m) et sur la base de données géophysiques et bathymétriques pour de plus grandes profondeurs. Dans les sonogrammes *side scan sonar*, les tons les plus légers et les moins saturés diminuent avec la diminution des dimensions granulométriques, mais une forte influence des caractères litho-compositionnels du sédiment est démontrée; à une dominance de la fraction litoclastique correspondent des tons plus clairs et une texture nuancée; la composition bioclastique conduit à des réponses plus saturées (Figure 11).

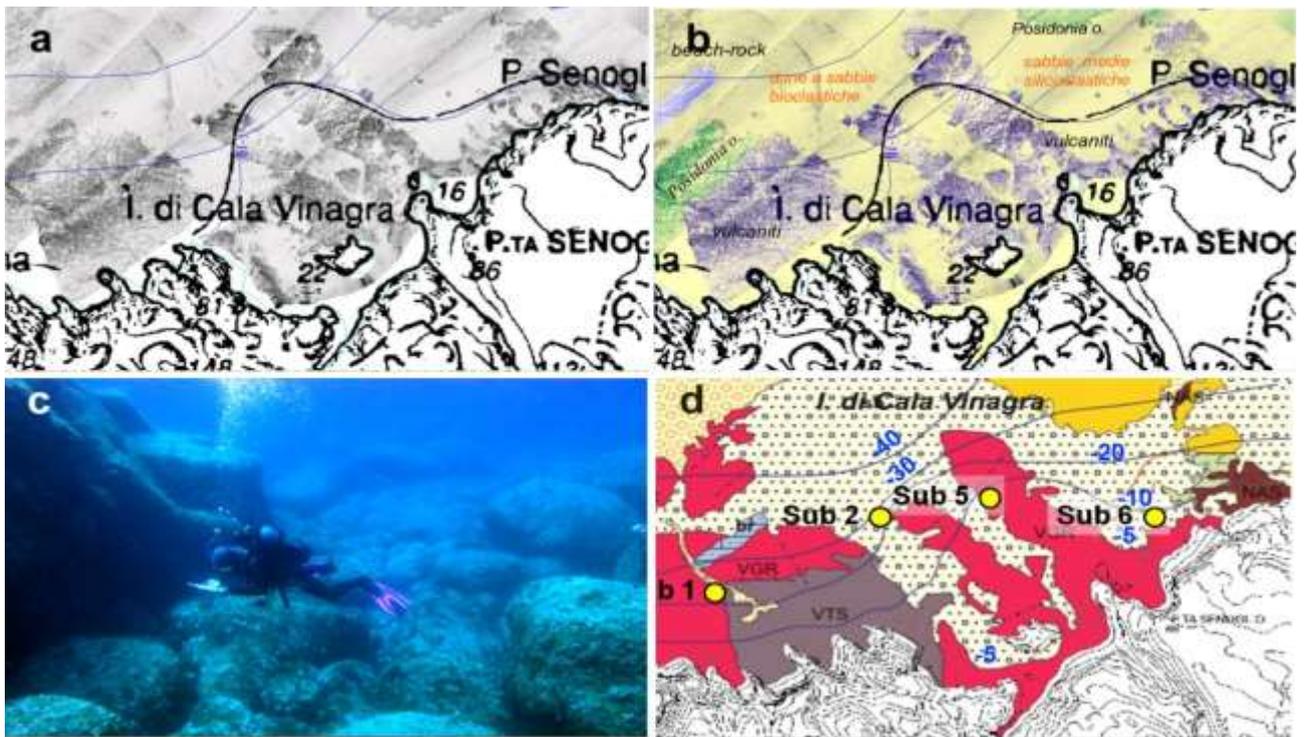


Figure 11 - Étapes de l'arpentage géologique dans les zones péri-côtières de la haute côte rocheuse: a) sonar latéral à balayage latéral acoustique, photo mosaïque; b) photomosaïque des sonogrammes interprétés, cartographie et hypothèses interprétatives; c) levé direct, levé géologique sous-marin et échantillonnage, validation et calibrage d'hypothèses interprétatives; d) cartographie finale avec positionnement des stations de détection d'immersion directe.

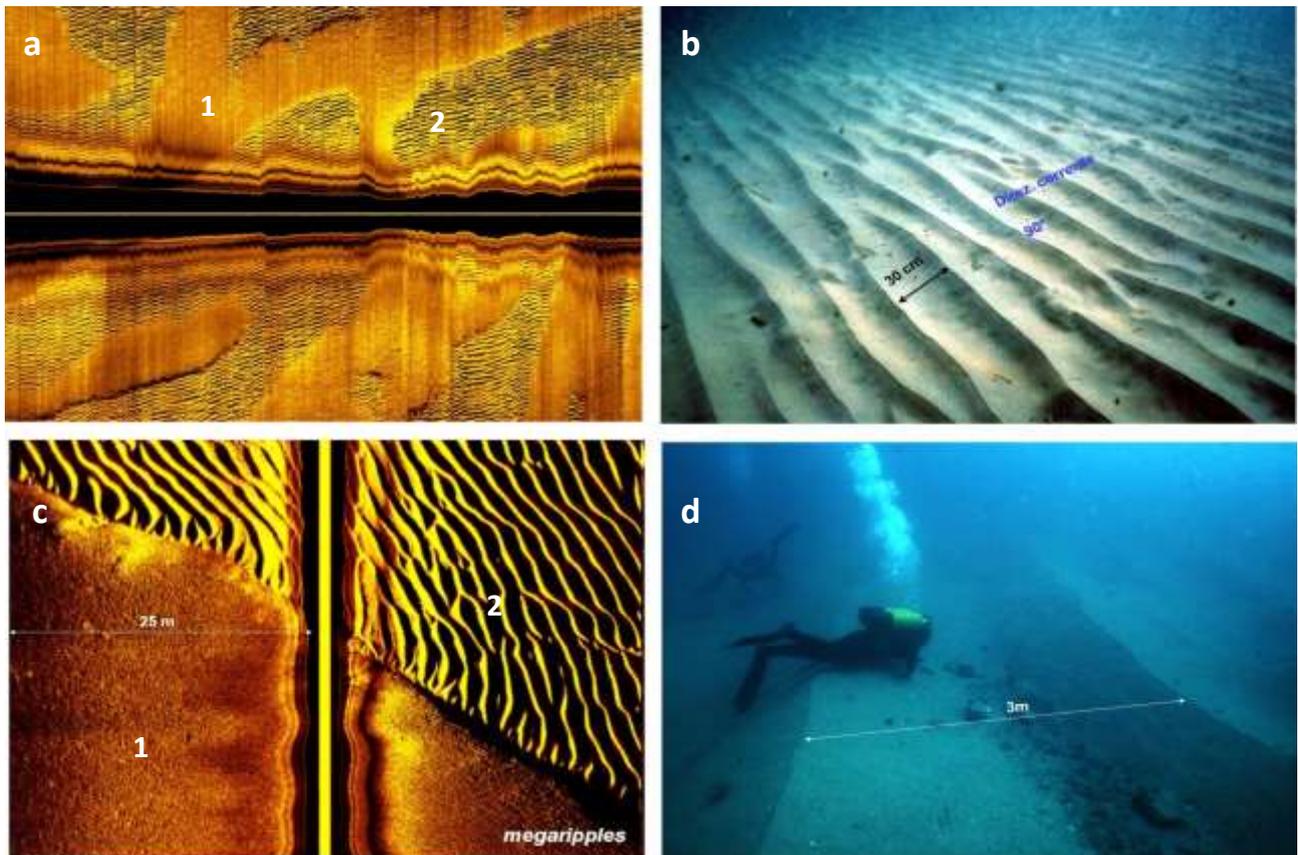


Figure 12 - a) Sonogramme Side Scan Sonar :: 1- Sables moyens et fins 2- Structures sédimentaires à la marque d'ondulation; b) les structures sédimentaires du type de marques d'ondulation; c) sonar à balayage latéral de sonogramme: 1- sables moyens et grands avec fraction organogénique dominante; Structures 2-sédimentaires aux mégaripples; d) détecteur sous-marin engagé dans la détection des structures sédimentaires mégariiformes.

Les sables lithoclastiques, principalement le quartz et le quartz-feldspath, dominent dans la plate-forme proximale. La texture uniforme et les tons plus clairs subissent des variations dans la correspondance des pentes de pente modestes et des canaux faiblement acclantants (figure 12). L'analyse de la dynamique des sédiments et des processus d'érosion au pied des falaises est réalisée à travers l'étude du faciès des sédiments incohérents et de toutes les structures sédimentaires détectables dans le secteur submergé. En plus de fournir des informations sur les processus d'interaction entre les vagues et la côte, cette phase permet d'évaluer la contribution des dépôts de glissement de terrain à l'approvisionnement des côtes sableuses voisines.

2.3.3 Mouvement de Vagues

L'information vague-métriques est fondamentale dans toutes les études, les projets, les travaux et les opérations d'ingénierie côtière et maritime, ainsi que dans l'analyse des impacts environnementaux connexes (Weisse et al., 2015). L'acquisition de données est donc une condition indispensable pour une connaissance précise et complète des paramètres de la mer qui définissent moment après moment et point par point l'état de la mer (Picone, 2009).

Le type de données disponibles influence à la fois la méthodologie des études sur l'état de la mer et la qualité des résultats. Les exigences de données idéales sont (APAT, 2005):

- contenu d'information élevé et possibilité d'extraire tous les paramètres caractéristiques;
- fiabilité et précision;
- bonne couverture de la période pertinente;
- durée prolongée dans le temps (représentativité à long terme);
- Représentativité géographique pour le site en question.

Aucune des sources habituellement disponibles ne possède toutes ces exigences en même temps. La disponibilité de données instrumentales suffisantes pour l'évaluation des événements extrêmes n'est pas encore très étendue. Par exemple, pour la Sardaigne sont disponibles (de 1989 à 2014) les données vague-métriques détectées à la bouée d'Alghero, appartenant au réseau de mesure d'onde (RON), qui fournit des données directionnelles, pour le fond marin dans lequel il est amarré, et les caractéristiques de la requête qui peut valablement être étendue à toute la côte ouest de l'île (Atzeni, 2011).

Mais toutes les autres côtes sardes ne sont pas équipées d'enquêtes instrumentales, indépendamment des 56 mois pris à la bouée Capo Comino (nord-est de la Sardaigne), et d'environ 73 mois détectés par la bouée Capo Boi dans le golfe de Cagliari (jeu de données RON) dans la technologie Linked Open Data <http://dati.isprambiente.it/id/website/ronRmn/html>). De plus, au cours des vingt dernières années, des données instrumentales obtenues à partir de satellites sont disponibles, qui doivent être vérifiées avec d'autres sources (Izaguirre et al., 2011). D'autres sources de données directes sont installées par des institutions privées ou institutionnelles à des fins précises allant de la recherche à la conception et à l'exécution d'installations à terre ou *off-shore*. Généralement, ces données sont parfois peu utiles pour certains traitements, en raison des périodes d'exploitation trop courtes (souvent inférieures à trois ans) et discontinues (dues aux interruptions de service, souvent aux marées de pointe), dues à des erreurs d'installation et la fiabilité des instruments et des mesures. Dans certains cas, même les méthodes utilisées pour l'acquisition et l'analyse des données ont compromis la fiabilité des résultats obtenus. L'utilisation de modèles avancés permet la reconstruction du mouvement des vagues à partir de données météorologiques pour des horizons temporels larges et non discontinus, et spatialement distribués (Perez et al., 2017). Ces modèles nécessitent la disponibilité d'une quantité importante de données et une puissance de calcul importante, difficilement disponible, de sorte que l'utilisation de ces modèles reste, au moins pour l'instant, réservée aux spécialistes. En particulier, les modèles numériques de vague de troisième génération fournissent aujourd'hui des informations précises sur le climat des vagues (Stopa et al., 2016) pour

compléter les données mesurées en termes de résolution et de couverture. Pour de nombreux sites méditerranéens où le fetch est limité, l'utilisation de modèles simplifiés est très utile.

Les données d'onde peuvent être acquises par des mesures directes (réseau RON, réseau RMN) et indirectes (méthode SMB, modèles SWAMP, modèle WAM).

3 GÉODATABASE

3.1 IDENTIFICATION DE LA PLATEFORME DE STOCKAGE ET DE PUBLICATION DE DONNÉES

L'un des principaux objectifs à atteindre dans la production de données cartographiques et généralement géoréférencées est la création d'un système de gestion et de partage des données dans l'environnement GIS et leur exposition via une interface Web-GIS. Il est donc nécessaire d'identifier et de mettre en place une plateforme modulaire répondant aux exigences suivantes:

- permettre le stockage structuré des données collectées sur les sites échantillons dans les campagnes d'acquisition avec les différentes techniques d'enquête;
- permettre l'analyse et la comparabilité spatiale et numérique des observations et produits issus de leur élaboration;
- permettre la publication à travers le réseau des observations acquises sur les sites d'échantillonnage et le partage des connaissances issues de l'analyse des processus d'érosion des littoraux examinés.

Compte tenu de la grande variabilité des observations qui découleront des différentes activités d'acquisition envisagées, le module de stockage de données doit permettre le stockage, la gestion relationnelle et l'utilisation intégrée de données tabulaires et spatiales acquises ou traitées en format vectoriel et en matrices *raster*. Par conséquent, le *database* doit inclure les fonctions de gestion des composants géométriques associés aux composants d'information et doit être capable de construire des tables relationnelles permettant l'optimisation de la structuration du contenu. Grâce à l'interface SIG, les données spatiales doivent être visibles dans leurs plans géographiques respectifs avec leurs propres composants géométriques et doivent être mutuellement superposables pour l'analyse multiniveau et être comparables avec d'autres données topographiques et environnementales disponibles. L'accès aux données doit être adressé à la communauté du projet scientifique (intranet) et également au plus grand nombre d'utilisateurs (internet), grâce à une interface web simple, intuitive et efficace, permettant à un utilisateur, même non expert, la recherche, l'exploration, la visualisation et le téléchargement des données rendues utilisables dans le projet. Ces fonctionnalités doivent être intégrées dans le système de publication, via des modules de gestion et d'affichage du catalogue de données de *database* et des métadonnées associées aux *dataset* d'acquisition, de traitement et d'acquisition des données utilisées dans les campagnes d'observation et d'analyse. Grâce à ses fonctionnalités avancées, l'adhésion (dans la version de base) à la philosophie Open Source qui lui permet d'être implémentée avec des fonctionnalités supplémentaires pouvant être construites sur mesure, largement utilisées par diverses administrations publiques pour l'affichage de catalogues complexes données, le choix de la plate-forme de partage concerne le software GeoNetwork et des applications cartographiques spécifiques. Ce système incorpore de manière modulaire à la fois le composant de portail, pour la publication et le partage d'informations, et le composant de stockage (base de données) organisé comme un catalogue d'Infrastructure de Données Spatiales (SDI) tel que défini dans l'Architecture de Référence OGC *Reference Architecture*.

3.2 LE SYSTÈME GEONETWORK

GeoNetwork Opensource c'est un environnement *software* créé pour la gestion de l'information spatiale. Développé en *joint venture* par la FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), le Programme WFP (*United Nations World Food Programme*), et du UNEP (*United Nations Environment Programme*), il a été enregistré dans sa première version en 2003. GeoNetwork a été développé pour permettre un accès partagé à l'information aux communautés de l'information spatiale à travers une architecture moderne, à la fois puissante et peu coûteuse, basée sur les principes du *software libre et open source (FOSS)* et normes internationales pour les services et les protocoles (ISO / TC211 et OGC). Le système fournit des outils d'édition et des fonctions de recherche de métadonnées ainsi qu'un visualiseur Web de

cartes géoréférencées. De nombreuses entités faisant partie des organisations internationales utilisent actuellement la plateforme *GeoNetwork* pour accéder à une grande variété de données et de métadonnées, inhérentes à différentes disciplines et organisées de manière standard et cohérente, grâce à la possibilité d'utiliser le standard international de référence du secteur: ISO19115-Métadonnées.

Les principales caractéristiques de ce système sont:

- l'accès aux catalogues de recherche géospatiale locale et distribuée;
- *uploading et downloading* des données, des cartes, des graphiques, des documents, des fichiers PDF et tout autre type de contenu numérique;
- Interactive *Web Map Viewer* capable d'utiliser les services WMS à partir de serveurs répartis dans le monde entier;
- *editing online* de métadonnées au format xml avec un système de gabarit personnalisable;
- la collecte programmée et la synchronisation des métadonnées entre les catalogues distribués;
- contrôle d'accès via un module spécifique de gestion des utilisateurs;
- Interface utilisateur en version plusieurs langues. *GeoNetwork* est parfaitement intégré aux normes de catalogage et de publication des données et métadonnées géographiques et non géographiques. En effet, il prévoit l'utilisation de ISO19115 / ISO19119 / ISO19110 selon ISO19139, FGDC et Dublin Core, les interfaces pour le catalogue (profil client et serveur OGC-CSW2.0.2 ISO, client et serveur OAI-PMH, serveur GeoRSS , Les serveurs GEO OpenSearch, la collecte WebDAV, le support de récolte *GeoNetwork* à *GeoNetwork*) et les services de cartographie (OGC-WMS, WFS, WCS, KML et autres) à travers le *software* *GeoServer* incorporé. En plus de fournir des outils de gestion et de publication de métadonnées sur les données spatiales, *GeoNetwork* fournit également des outils pour la publication de services connexes, tels que les services de recherche de métadonnées et de données distribuées, qui permettent d'accéder à un volume important d'informations. de différents environnements. Il fournit également les services de visualisation des données cartographiques grâce à une carte *Web-based* interactive.

3.2.1 Métadonnées

Les fonctionnalités de catalogage de *GeoNetwork* permettent de résoudre l'un des points focaux pour le partage d'informations, permettant la construction d'archives de métadonnées structurées et intégrées dans le système. La construction d'une archive de métadonnées du projet, liée aux données et aux outils, garantit la réalisation de nombreux avantages qui trouvent un plus grand support dans la consultation et dans la recherche des données. En effet, les métadonnées cataloguées et organisées permettent:

Pour décrire les caractéristiques des données pour leur utilisation correcte;

Le partage d'informations thématiques géoréférencées entre les partenaires du projet et les utilisateurs externes;

Suivi du contenu du système de données spatiales et environnementales, de leur état de mise à jour, de leur qualité et de leur fiabilité;

La possibilité de rechercher et d'afficher des données d'intérêt selon différents critères.

La plateforme *Geonetwork* permet l'indexation des données dans une base de données dédiée consultable sur le web. Le catalogage des métadonnées peut également être divisé en macro catégories de référence, convenues avec les partenaires du projet, qui seront proposées par le portail. Ces macro-catégories, qui peuvent être mises en œuvre et modifiées même au cours du travail, couvriront les thèmes de recherche du projet et, bien que non contraignantes pour la recherche, tendront à optimiser et à faciliter la consultation. Pour le moment, les macrocatégories, catégories et sous-catégories suivantes sont identifiées:

- Sites
- Outils

- Données de pièce émergées
- Données géostructurelles
- Données géomécaniques
- Données géotechniques
- Remote Sensing optique
- Remote Sensing Laser Scanner
- Partie submergée de données
- Reliefs bathymétriques
- Reliefs *singlebeam*
- Reliefs *multibeam*
- Reliefs *Side Scan Sonar*.

Après avoir défini les macro-catégories de métadonnées, il est possible de procéder à la hiérarchisation de l'information, avec des liens du type Parent ---> Child qui permettent de reconnaître une relation logique entre les métadonnées.

La possibilité d'établir des liens hiérarchiques "Parent/Child" entre les métadonnées est offerte par la norme ISO19115. L'association logique des métadonnées permet d'agréger les données par type de macro-catégorie, comme dans l'exemple suivant:

SITE -----> n ... outils -----> partie émergée / submergée -----> n ... mesures -----> n ... dataset

Chaque élément de la chaîne dépend de l'élément dont il dérive et génère des dépendances en fonction des liens logiques. Cette hiérarchie dans *GeoNetwork* peut être rendue explicite grâce à la création de liens qui permettent une mise à jour facile à travers les fonctions de propagation et de compilation automatique. Le système permet la mise à jour en cascade de l'information, rendant possible les changements et mises à jour du "Parent" également dans les éléments "Child" qui en dépendent, évitant ainsi la recompilation manuelle des enregistrements qui peuvent aussi être nombreux. L'inclusion des métadonnées dans le système sera effectuée en fournissant aux spécialistes des diverses techniques d'acquisition des informations d'identification personnelles. Chaque utilisateur peut alors être en mesure d'entrer indépendamment les métadonnées de sa propre compétence, en remplissant un formulaire dont le contenu répondra aux normes internationales (ISO) qui garantissent l'interopérabilité de l'information.

3.2.2 Le Database PostgreSQL

Les données alphanumériques et géographiques issues des campagnes d'acquisition et des élaborations seront stockées dans des tables d'un DBMS PostgreSQL, intégrées à GeoNetwork et implémentées avec le module PostGIS pour les données spatiales. La structure de la base de données, au niveau de la table, sera réalisée à la suite de l'analyse des types de données qui vont circuler dans le système et des variables spécifiques qui doivent être introduites pour chaque type d'observation. Si le type de données requis, grâce à la préparation d'un diagramme de relations entités E-R, les tables de relations seront définies et préparées dans le DBMS qui permettra de connecter les informations qui appartiennent logiquement à différentes tables mais qui peuvent être connectées conceptuellement plus de clés. Une fois la base de données configurée, les tables seront remplies en définissant des procédures de transfert de données manuelles, automatiques ou semi-automatiques. Ces procédures permettront, selon le type de données, de transférer les contenus spatiaux et informatifs directement dans la base de données à partir des outils d'acquisition / traitement ou via des points de traitement intermédiaires qui, en utilisant les processus de conversion et de préparation des données, permettent la transition vers le système de stockage. D'un point de vue qualitatif, les données spatiales seront vérifiées par des procédures de contrôle topologiques et / ou géométriques, tandis que les contenus d'information feront l'objet de contrôles formels sous les aspects de cohérence, d'exhaustivité et de conformité des données. Par conséquent, si d'une part il existe un

environnement GIS *back-office* pour la création, le stockage et la gestion de toutes les données acquises dans les sites d'intérêt, d'autre part il sera possible de donner accès à toutes les informations que les chercheurs et utilisateurs ils voudront généralement partager. L'accès aux données sera géré via les interfaces de recherche et de publication GeoNetwork, préparées pour le projet. Le *download* des données rendues utilisables par les utilisateurs sera garanti par l'exportation dans des formats ouverts (par exemple, *shapefile* pour les données spatiales vectorielles, dbf ou similaire pour les données tabulaires, Geotif ou ASCII pour les données raster).

3.2.3 Achèvement de la fonctionnalité GeoNetwork

Grâce à l'architecture software totalement ouverte, *GeoNetwork* permet la mise en œuvre de nouvelles fonctionnalités définies et développées par un utilisateur ayant besoin d'un accès spécifique ou d'outils de recherche de données. Par conséquent, par rapport à la version de base, des améliorations seront introduites aux fins du projet à la fois du point de vue graphique et du point de vue fonctionnel. L'aspect graphique de la version *opensource* actuellement distribuée est présenté avec une apparence délibérément minimale et nue, qui garantit l'accès aux services, tout en conservant une apparence anonyme. Dans ce contexte, un visuel graphique sera conçu et développé en adhérant à l'iconographie du projet, qui est plus moderne et attrayante d'un point de vue esthétique et en même temps plus intuitive et lisible pour la recherche et la consultation des ressources. D'un point de vue fonctionnel, l'analyse des améliorations à introduire dans le système sera développée. L'analyse sera basée sur la conformité des fonctionnalités de base avec les exigences suivantes, ou sur la possibilité de mettre en œuvre le software avec des améliorations ou avec le développement de modules spécifiques:

- Facilité d'utilisation:

- Perception: les informations et commandes nécessaires à l'exécution de l'activité seront toujours disponibles et perceptibles;
- Compréhension: les informations et les commandes nécessaires à la réalisation des activités seront faciles à comprendre et à utiliser;
- Opérabilité: les informations et les commandes seront de nature à permettre un choix immédiat de l'action appropriée pour atteindre l'objectif souhaité;
- Cohérence: les mêmes symboles, messages et actions auront les mêmes significations tout au long de la plateforme;
- Appréciabilité: l'apprentissage de son utilisation par l'utilisateur dans un court laps de temps et avec un minimum d'effort sera garanti
- Performance: les temps de réponse de chaque page seront tels qu'ils permettent une utilisation du système même en pleine charge d'information.

- Sécurité:

Des critères seront définis pour identifier et suivre les opérations effectuées par les opérateurs individuels avec la possibilité de stocker les journaux du système. Le *software* fournira des outils d'audit minimum visant à contrôler le fonctionnement du système d'information. Le software, tel que requis dans les spécifications et également indiqué dans l'introduction de ce chapitre, comprendra la préparation et la gestion de divers profils d'utilisateurs pour l'accès aux modules, applications, sections du système, ce qui permettra la définition des autorisations à différents niveaux (lire, lire-écrire, lire-écrire - modifier, modifier). De plus, le profil permettra de limiter le fonctionnement à des modules spécifiques ou à un groupe de modules.

- Flexibilité:

La solution d'application proposée sera flexible afin de garantir, également grâce à un concept d'évolutivité technologique, l'adaptation aux exigences changeantes du pouvoir adjudicateur à la fois en termes de

nombre d'utilisateurs et de domaines d'application à mettre en œuvre. En particulier, les interventions physiques pour installer ou activer de nouveaux modules *software* n'impliqueront pas des interruptions de service ou des ré-implémentations du système. L'interface web développée pour le projet aura aussi des points d'accès facilités aux ressources à travers des outils de recherche textuels (par exemple avec des menus déroulants sur les listes de catégories de données) ou par l'interrogation de cartes interactives développées dans l'environnement Web-GIS.

3.2.4 Intégration d'environnements de stockage et publication de Databases dans un point d'accès unique.

Les expériences de publication de données et de métadonnées selon les spécifications dictées par la législation sur le partage et la publication de données ouvertes convergent vers la proposition d'un système de gestion déjà largement testé par les auteurs et utilisé dans le SHARE-Geonetwork national et international. Le projet SHARE-Geonetwork, qui dans ce contexte semble le mieux répondre aux besoins du projet MAREGOT, a été créé en 2013 dans le but de partager les données acquises des stations climatiques de haute altitude de la chaîne Karakorum-Himalaya. D'où la nécessité de développer une plateforme d'accès aux données contenant, en plus des mesures, toutes les informations nécessaires aux chercheurs pour comprendre comment les données, les outils et les processus d'étalonnage ont été collectés. Il a donc été décidé de développer un système capable de gérer à la fois les données et les instruments de mesure / capteurs pour chaque station. Cette idée a également été étendue à d'autres thèmes (Projet I-AMICA, Projet *Nextdata*, Projet FLOWERED) et reconnue comme fonctionnelle dans plusieurs projets impliquant le développement d'un Géoportail, dans lequel en plus de la composante information des données, nous voulions donner le contenu correct méthodologie adoptée pour son acquisition. De cette manière, les métadonnées des instruments ont acquis la visibilité nécessaire pour permettre aux techniciens et chercheurs d'appliquer les mêmes méthodologies d'acquisition dans des contextes différents de ceux déjà existants. Bref, c'est une architecture software qui permet, à travers un CMS *WordPress* (Content Management System) type *WordPress* pour gérer dans un même environnement les bases de données géographiques des mesures et retours cartographiques et la base de métadonnées.

<http://geonetwork.nextdataproject.it/>

4 ÉVALUATION DE LA DYNAMIQUE ÉVOLUTIVE

Les prospections décrites au chapitre 2 et organisées dans une Géodatabase comme indiqué au chapitre 3 servent à définir le contexte dans lequel les conditions d'instabilité peuvent se développer dans les hautes côtes rocheuses, compte tenu des facteurs géologiques, hydrodynamiques et climatiques. Bref, il s'agit de comparer les caractéristiques de la côte en question que nous pouvons considérer comme les éléments prédisposants à l'instabilité avec les mécanismes qui peuvent activer les phénomènes d'instabilité. Les éléments prédisposants concernent les caractéristiques géologiques, géomorphologiques et climatiques (entendues comme la moyenne des événements météorologiques à long terme), hydrogéologiques et géotechniques. Les mécanismes d'activation des processus qui conduisent à l'instabilité sont, à des degrés divers et parfois en partenariat, le mouvement des vagues, la structure géomécanique, la variation du niveau de la mer et de la marée (bien que peu significative dans le contexte méditerranéen), les vents (et les phénomènes météorologiques en général), le comportement des eaux souterraines, les précipitations et l'effet de l'altération causée par les embruns (Figure 13).

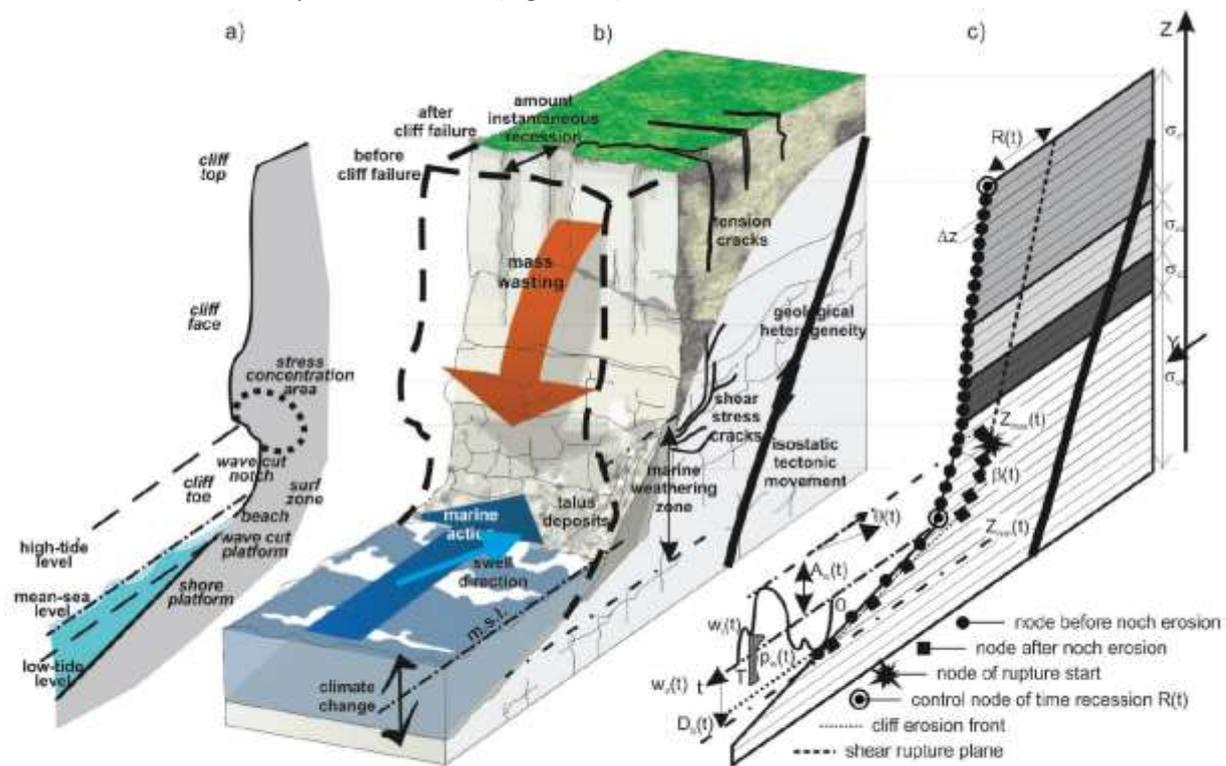


Figure 13 - Schéma fonctionnel d'une falaise: (a) aspects morphologiques d'une falaise; (b) une unité côtière homogène (CBU), qui présente des conditions géologiques et océanographiques homogènes; (c) la discrétisation d'une section riveraine sur la falaise avec les principaux éléments impliqués, de (Castedo et al., 2017).

L'étude des côtes rocheuses est principalement orientée vers la compréhension du phénomène d'érosion et vers l'arrière afin de pouvoir prédire l'évolution et ensuite planifier des interventions pouvant réduire les éventuels dommages. La grande majorité des expériences et des recherches connues dans la littérature internationale (Sunamura, 1992, Castedo et al., 2012, Lim et al., 2010, Del Rio & Gracia, 2009, etc.) se concentrent sur les phénomènes de retour des hautes côtes constitués de roches tendres ou très tendres (résistance à la compression uniaxiale - ou expansion latérale libre - inférieure à 25-50 MPa), tandis que les côtes des zones d'étude dans la zone de partenariat sont composées majoritairement de matériaux moyennement à très résistants déformation (vulcanites, carbonates, grès bien cimenté, etc.). Bien qu'il existe différentes approches, également en ce qui concerne les données collectées et le modèle d'analyse choisi, il existe un accord substantiel dans la littérature pour classer deux types extrêmes (*end-member*) de

mécanismes qui déclenchent des glissements de terrain dans des contextes de falaises des roches dures: un "marin", principalement dû à l'action du mouvement des vagues, et un autre plus lié aux phénomènes "terrestres" d'évolution de la pente, parmi lesquels le plus pertinent est l'action de la nappe phréatique. Entre ces deux extrêmes, il peut y avoir des situations d'interconnexion entre les phénomènes, avec l'interaction des processus marins et terrestres qui créent des conditions d'instabilité différentes, surtout pour leur tendance évolutive; Jusqu'à des situations où, dans la même falaise, vous pouvez développer différents types de glissements de terrain, en passant d'un mécanisme d'activation à un autre. L'analyse de la dynamique évolutive d'un tronçon de haute côte rocheuse proposée ici pour comprendre les phénomènes qui affectent sa stabilité, vise à atteindre deux objectifs d'échelle différente. A l'**échelle local**, celle de la seule falaise côtière (falaise), l'objectif est de vérifier le péril et le risque hydrogéologique, souvent en présence de phénomènes passés, parfois récents, et constitue la base des connaissances essentielles pour la conception de l'intervention. A l'**échelle régional**, avec des détails mineurs, l'objectif est d'identifier avec une approximation acceptable les zones ayant différents degrés de propension à l'échec afin d'avoir un outil de planification dans l'utilisation des zones côtières. Les deux échelles différentes, bien que basées sur les mêmes modèles conceptuels généraux, utilisent différemment les données détectées décrites au chapitre 2.

4.1 ANALYSE DE L'ÉCHELLE LOCAL

A l'échelle locale, le but principal est d'évaluer le degré de stabilité d'une pente et son évolution dans le temps. Les conditions d'équilibre ont une influence déterminante sur une série de facteurs qui tendent à réduire sa stabilité (caractéristiques intrinsèques, pente de la pente, géométrie du relief, etc.). Comme déjà mentionné, dans le cas des falaises côtières actives, l'effet marin rend le tableau plus complexe.

4.1.1 Retraite Côtière

Nous avons déjà mentionné que l'approche technique du problème de la stabilité des côtes rocheuses dans le domaine scientifique vise principalement les côtes rocheuses à recul rapide, un cas rare dans le contexte méditerranéen considéré dans le projet MAREGOT. Les études connues montrent que dans les côtes rapides, il est important non seulement la position géographique de la falaise (donc son orientation par rapport aux vents et aux conditions climatiques en général) mais aussi l'interaction avec le régime hydrodynamique en évolution continue marée et niveau moyen de la mer, etc.), ce qui crée un système côtier complexe (Figure 14) (Sunamura, 1992, Lee et Clark, 2002, Castedo et al., 2012). L'un des objectifs intermédiaires du projet est de vérifier dans quelle mesure l'approche envisagée pour un contexte hydrodynamique, géologique et climatique est applicable aux zones côtières des côtes Tyrrhéniennes et Provençales du centre-sud et surtout quels sont les paramètres et processus déjà identifiés. et dans le cas identifier ou étudier de nouveaux. L'étude efficace des différents scénarios de récession côtière dans différentes conditions nécessite une représentation adéquate des processus impliqués, en particulier lorsque le littoral répond de manière non linéaire en raison de changements dans les caractéristiques géologiques au sens large, le régime hydrodynamique, le climat, etc. Pour atteindre ce résultat, l'approche choisie, comme le montre le chapitre 2, consiste à intégrer différentes compétences technico-scientifiques. Seule l'activité expérimentale permettra de trouver le résultat le plus satisfaisant, pour lequel dans ce document sont rapportés les modèles qui, à l'état actuel des connaissances générales et des compétences spécifiques, ont été retenus comme les plus prometteurs.

Il existe peu de modèles fiables de réponse au processus de recul de la falaise. Ceux-ci reposent généralement sur des relations fonctionnelles entre les processus physiques dominants qui agissent sur la côte (Figure 14) (Walkden et Hall, 2005; Walkden et Hall, 2011; Trenhaile, 2009; Castedo et al., 2012). Rappelons-nous quelques-uns des plus significatifs. Les modèles nécessaires pour simuler l'érosion basale

et l'effondrement subséquent de la crête Bray & Hooke (1997) et Castedo et al. (2012) proposent un modèle qui, à travers l'analyse de la stabilité de l'équilibre frontalier avec la «Méthode suédoise» ou la «Méthode Fellenius» (Fellenius, 1936), intègre le modèle de l'érosion en réponse aux processus agissants. Cependant, ce sont des méthodes valables dans les roches tendres où les processus d'instabilité prédominent le long de surfaces incurvées et incurvées, qui sont formées par une perte générique de cohésion du matériau. Par conséquent, ils ne conviennent pas pour les nervures dans les roches de résistance moyenne à très résistante au cisaillement (résistance à la compression uniaxiale > 50 MPa). Lajoie et Mathieson (1998) croient que l'action des vagues est principalement responsable du recul des falaises, tandis que Hampton et Dingler (1998), dans une étude menée sur différentes zones des promontoires côtiers de la Californie du Nord, y compris Pacifica, supposent que l'action des infiltrations d'eau souterraine est parfois répandue; les mêmes auteurs ont suggéré que l'action des vagues ne peut jouer qu'un rôle secondaire en enlevant le dépôt d'accumulation au pied de la falaise. Cela dépend évidemment de l'augmentation de la pression interstitielle dans les sédiments granulaires inconsistants qui constituent ces côtes, avec pour conséquence une réduction de la résistance au cisaillement.

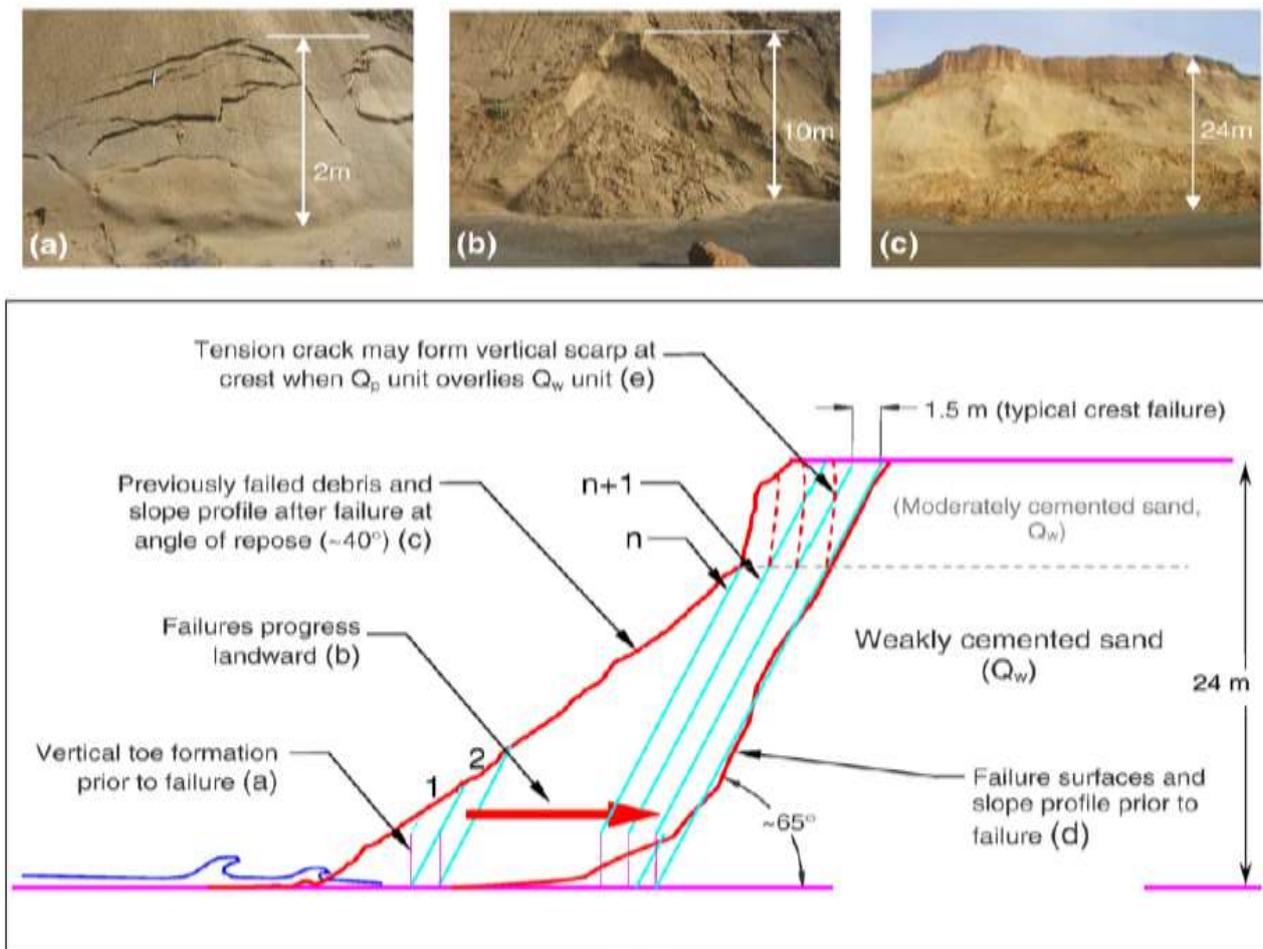


Figure 14 - Modèle de recul du rocher sur la base des données LIDAR induites par l'action du mouvement des vagues. Les vagues qui agissent uniquement sur les dépôts de glissement de terrain précédents provoquent des glissements de terrain de moins de 2 mètres (a) de hauteur. Les processus d'effondrement augmentent en hauteur (1, 2, n) (b), mais sans affecter le bord, lorsque le mouvement ondulatoire perturbe le dépôt basal associé aux effondrements antérieurs ou au matériau intact et intact (c). L'effondrement qui affecte toute la falaise se produit dans n + 1 avec un recul parallèle conséquent du bord (d). Le cycle recommence lorsque les débris résultant des effondrements sont érodés par l'action des vagues. A Pacifica (Californie), le sable modérément cimenté (Q_p) domine le sable faiblement cimenté sur la crête et forme des escarpements verticaux (e) qui ne répondent pas à l'érosion du pied induite par l'action des vagues. De Collins et Sitar (2008).

Sallenger et al. (2002) suggèrent qu'il peut y avoir un certain équilibre entre ces deux facteurs, mais ils n'ont pas réussi à trouver une correspondance dans les ensembles de données acquis. Collins & Sitar (2008) ont tenté de clarifier ce débat en fournissant un cadre cognitif pour de futures études sur l'érosion des falaises, identifiant les mécanismes d'effondrement dans des environnements en évolution rapide caractérisés par des sédiments côtiers sableux faiblement cimentés. L'instabilité d'une falaise côtière, selon le modèle classique de Sunamura (1992), est le résultat de la relation entre les forces résistantes (F_r) et les agents des forces (F_w) (Figure 15), où la prévalence de cette dernière conduit à l'effondrement une partie du rocher due à l'érosion à la base.

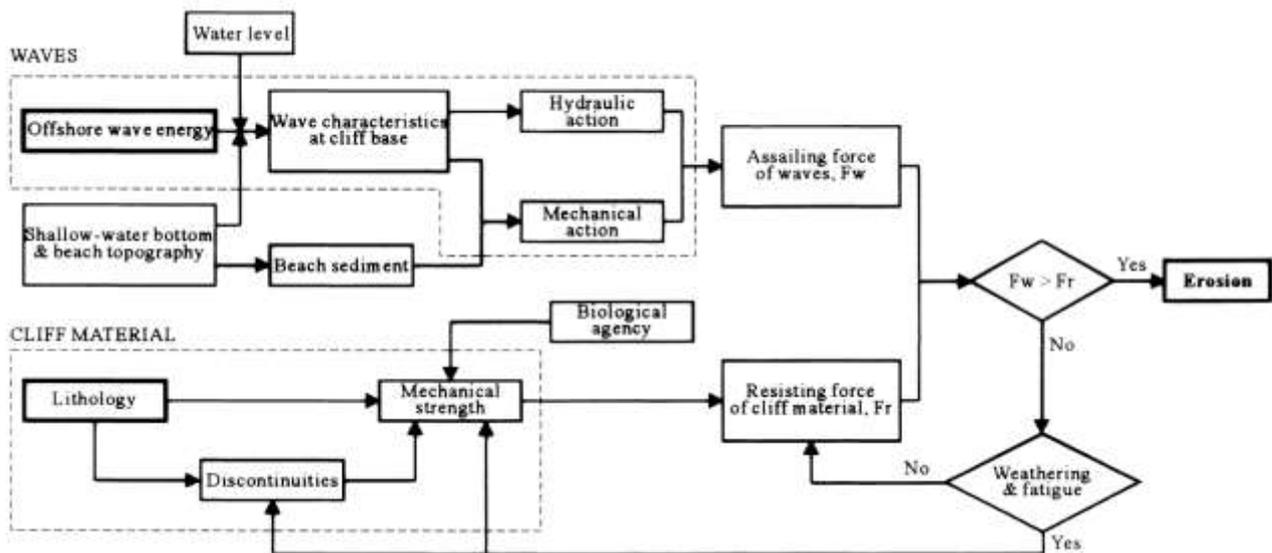


Figure 15 - Facteurs qui déterminent l'érosion à la base de la falaise due au mouvement des vagues, selon l'élaboration du modèle de Sunamura (1992) proposé par (Budetta et al., 2000).

C'est un mécanisme actif surtout dans les falaises à roches tendres, directement liées à l'action des vagues sur les parois, ce qui provoque l'érosion progressive à la base d'une falaise et l'effondrement subséquent d'un volume de roche. C'est le modèle classique de "surcharge d'une étagère" et dépend de plusieurs facteurs en fonction du lithotype et de ses caractéristiques géomécaniques. La relation entre la présence d'un sillon et la probabilité de développement d'un glissement de terrain (effet de plateau) est bien discutée par Lim et al. (2010) qui n'a pas seulement démontré la validité de l'hypothèse proposée par Sunamura (1988, 1992) mais ils l'ont aussi mieux articulé en prouvant statistiquement qu'il existe une relation entre le lithotype et l'instabilité, mesurée en évaluant la relation entre la profondeur de l'incision et le volume du glissement de terrain accumulé à la base de la falaise. Le fait que les matériaux plus tendres produisent des volumes plus petits pendant les événements individuels est interprété comme l'effet d'une plus grande instabilité, l'effondrement se produisant également en raison de l'effet des rainures peu profondes et donc de la présence de petits coins rocheux. D'autre part, dans les roches tendres, la fréquence des glissements de terrain est généralement plus élevée que dans les roches plus résistantes. La présence d'un sillon d'érosion, pas nécessairement seulement liée au mouvement normal des vagues, comme décrit aux paragraphes 2.3.1.4.2, est donc un indicateur important de la prédisposition possible à l'effondrement d'une partie de la pente même dans les roches résistantes à la déformation. De même, l'accumulation de matériaux effondrés au pied de la falaise constitue une protection contre l'érosion de la falaise elle-même, de sorte que sa présence empêche une érosion continue à la base (Figure 13).

Des estimations ont été faites de la force destructive des vagues au pied des falaises où des données bathymétriques précises ne sont pas disponibles, grâce à la corrélation semi-logarithmique linéaire entre le

taux de recul des côtes rocheuses et la résistance mécanique de la masse rocheuse mesurée la force de compression uniaxiale (Budetta et al, 2000).

La détermination de la dynamique évolutive en cours, et l'identification des tendances évolutives futures des hautes côtes rocheuses, tous les aspects et le cadre des connaissances acquises à travers les «méthodes d'enquête» présentées au chapitre 2. Partant du niveau de mobilité tectonique de la région et de l'ordre géologique-structural, de l'évolution géomorphologique passée des processus gravitationnels (paléo-glissements de terrain) et des preuves de réactivation, de l'interprétation du système de surface par l'utilisation de données distantes avec des capteurs multi-bandes, de l'analyse des qualités géotechniques des roches à la modélisation appliquée à la vérification de la stabilité des masses rocheuses, de la reconstruction de la circulation de surface et du sous-sol (aquifères profonds et suspendus) au rôle des sources sous-marines; jusqu'à la quantification de l'énergie incidente (mouvement des vagues) selon les schémas d'exposition de la bande côtière puis l'évaluation du rôle joué par le changement climatique global dans ses différents effets (élévation du niveau de la mer et altération et changements dans la répartition des précipitations) (Castedo et al., 2017). Tout ceci sera traité selon une approche multi-échelles, en particulier dans une analyse locale l'identification de toutes les situations détectables dans la zone pilote sera développée, la reconstruction de la mosaïque des processus gravitationnels distinguant la typologie, le niveau d'activité et la génération; isoler ensuite des types d'instabilité typologiques et / ou plus actifs sur lesquels effectuer une analyse plus détaillée (morphostructurale, hydrogéologique, géotechnique et morphostructurale). Afin d'atteindre, uniquement pour les objets étudiés, un cadre cognitif apte à soutenir la conception d'hypothèses d'intervention de stabilisation ou d'atténuation des risques.

4.2 ANALYSE À L'ÉCHELLE RÉGIONAL (MODÈLES D'ÉVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITÉ À L'INSTABILITÉ)

L'analyse à l'échelle régional est nécessairement différente de celle à l'échelle locale car, malgré le besoin évident de distinguer les zones à propension différente à l'échec, pour des raisons logistiques et des ressources, il n'est pas possible de caractériser les kilomètres de côtes rocheuses comme cela est faisable à l'échelle local. Tu essaies de déterminer quelques caractéristiques principales, qui peuvent être considérées comme indicatives du zonage du péril à grande échelle, et qui permettent de reconnaître les traits qui présentent une telle dangerosité qu'ils nécessitent un approfondissement plus poussé dans la phase de planification. Ceux-ci font partie de ceux décrits au chapitre 2 et en tout cas de cette analyse dérivent, évidemment considérés avec une approximation de l'échelle adéquate. Généralement, pour réaliser ce type de zonage, il existe plusieurs méthodes qui peuvent être distinguées conceptuellement en: a) les modèles heuristiques, c'est-à-dire ceux qui reposent sur la capacité de l'observateur à sélectionner, en fonction de son expérience, les indicateurs significatifs pour la définition de la propension à l'échec en leur attribuant un poids différent selon les différentes conditions; b) des modèles empiriques, qui étudient les relations entre différents paramètres physiques (pente de la pente, contraintes transmises à la paroi rocheuse par le mouvement des vagues, etc.); c) des méthodes statistiques basées principalement sur un répertoire de glissements de terrain. Nous préférons ne pas adopter des modèles heuristiques, car étant influencés par l'expérience du géologue, ils ont tendance à être faiblement objectifs et lorsque des zones analysées par différents opérateurs sont comparées, il peut y avoir des incohérences dans le zonage proposé. Une intégration entre les modèles empiriques et les modèles statistiques devrait fournir des produits plus fiables, à condition que nous puissions identifier des paramètres facilement mesurables dans toutes les conditions. Nous donnons ci-dessous les informations générales sur le zonage de la susceptibilité, le péril et le risque de glissement de terrain, puis nous traitons du cas le plus spécifique de zonage dans les côtes rocheuses.

4.2.1 Zonage de la susceptibilité, des dangers et des risques de glissements de terrain : généralité

Les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives sont couramment utilisées pour le zonage de la susceptibilité, de dangerosité, du risque de glissement de terrain (Corominas et al., 2014). Les méthodes qualitatives incluent principalement des critères subjectifs avec un zonage en termes descriptifs tels que: les inventaires de glissements de terrain, la cartographie géomorphologique, les cartes thématiques qui se chevauchent (indexation des causes, avec des modèles heuristiques); les méthodes quantitatives sont basées sur des critères objectifs plus ou moins reproductibles avec des estimations numériques de probabilités (modèles statistiques et modèles déterministes). La plupart des études de zonage existantes sont basées sur une analyse qualitative, dont les résultats ont souvent un faible degré de fiabilité. Dans une moindre mesure, ce sont des méthodes plus rigoureuses avec une analyse quantitative à la fois du péril, par l'estimation de la probabilité d'occurrence (fréquence) des glissements de terrain potentiels, et du risque auquel les éléments existants sont exposés. La nécessité d'une analyse quantitative des risques, en particulier à des fins d'aménagement du territoire, a incité la communauté scientifique à mener de nombreuses études visant à établir des lignes directrices et des recommandations appropriées pour l'analyse quantitative du risque de glissement de terrain (Fell et al. al., 2008, Corominas et al., 2014). Entre autres, le JTC-1 (Comité technique conjoint ISSMGE, ISRM et IAEG Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes) a élaboré des lignes directrices qui fournissent des éléments utiles pour décrire et définir le zonage de la susceptibilité, du péril et du risque de glissement. . Les lignes directrices s'adressent aux autorités locales, aux gouvernements des États et nationaux, aux professionnels travaillant dans le domaine du génie géotechnique et aux planificateurs territoriaux.

La **susceptibilité** aux glissements de terrain indique la propension à l'instabilité gravitationnelle d'une zone donnée, différents modèles d'évaluation sont proposés, parmi lesquels la détermination de "l'instabilité potentielle" (RAS Guidelines, etc.) basée sur des opérations de overlay mapping élémentaires. Pour pouvoir disposer d'une Géodatabase fiable et complète, l'une des méthodes analytiquement plus complètes permet d'utiliser l'évaluation des facteurs prédisposants en croisant les thèmes et le type de mouvement.

La **dangerosité** de glissement de terrain identifie la probabilité qu'un événement gravitationnel donné se développe sur une certaine période impliquant une zone donnée et présentant une magnitude donnée qui, dans le cas d'un glissement de terrain, est représenté par le volume impliqué et par la vitesse d'évolution.

La **vulnérabilité** désigne le degré de dommage attendu pour un élément ou un ensemble d'éléments placés dans une zone donnée en raison d'un phénomène de glissement de terrain.

L'**exposition au risque** indique l'élément qui doit supporter l'événement, exposé à un certain péril: nombre de présences humaines, nombre et type de centre habité, infrastructures industrielles et routières, ressources naturelles et culturelles présentes. Dans le cas d'une côte rocheuse ou d'une côte de falaise, l'élément à risque est rarement représenté par un bâtiment construit sur le bord, plus fréquent est le cas des structures routières et ferroviaires affectées par les processus en arrière. Le cas le plus fréquent est l'exposition des touristes et des nageurs qui sont stationnés au pied des falaises ou à *Pocket Beach* y compris au pied des falaises, comme les canoéistes ou les plaisanciers au fond qui fréquentent les eaux côtières.

La **valeur** est la quantification de l'estimation économique de chaque élément à risque: la valeur économique de la vie humaine, la valeur économique des bâtiments et des infrastructures, la valeur économique des activités qui persistent dans la zone, la valeur économique des actifs environnementaux et culturels.

Le **risque** est une mesure de la probabilité et de l'ampleur des conséquences des glissements de terrain sur la santé, les biens et l'environnement. Le risque est souvent obtenu en tant que produit de la probabilité d'occurrence d'un phénomène de volume assigné pour les conséquences attendues (Fell et al., 2008).

Certaines expériences de zonage de la susceptibilité et du risque de glissement de terrain (Cascini et al., 2005; Fell et al., 2005; Fell, 2005; Cascini, 2008) montrent comment les produits finaux (la zonation) présentent différents niveaux de précision et la fiabilité. De plus, l'évaluation du risque de glissement de terrain nécessite une approche multirisque, chaque type de glissement de terrain pouvant être associé à des caractéristiques, causes de déclenchement et probabilités spatiales, temporelles et dimensionnelles différentes (Corominas et al., 2014; Van Westen & Greiving, 2017). Les développements récents dans les techniques d'acquisition de données (*Remote Sensing*), les méthodologies d'analyse et les systèmes GIS fournissent des outils qui rendent le zonage de risque quantitatif moins difficile (Corominas et al., 2014; Remondo et al., 2008). L'évaluation de la grande zone de susceptibilité à l'instabilité (et si possible du péril et du risque) pour les hautes côtes rocheuses pourrait être abordée par une approche méthodologique qualitative-quantitative basée sur la superposition de cartes et DTM thématiques résumant la complexité de la base de données acquise (zone émergée et zone submergée). Cette approche se développerait par l'identification et la classification de paramètres discriminants, qui représentent les conditions nécessaires mais non suffisantes pour l'occurrence d'un type de glissement de terrain donné (par exemple l'unité géologique, la stratification, la pente) les traverser avec des facteurs aggravants, c'est-à-dire des facteurs de toute nature qui contribuent, directement ou indirectement, à tout type de mouvement, à aggraver les conditions d'instabilité gravitationnelle (par exemple: présence de fractures ouvertes, degré d'altération, lubrification des surfaces de discontinuité, etc.) évaluées pour chaque thème (géologie, géomorphologie, hydrogéologie, géomécanique, utilisation des sols, etc.). Le modèle à développer pourrait tirer des indications à la fois du CNR élaboré par la région de Calabria (Antronico et al., 2010) et du RES (*Rock Engineering System*) ou de la méthodologie probabiliste (*Certainty factor*), décrit ci-dessous, correctement interprété et adapté à la physiographie et à la dynamique évolutive des hautes côtes rocheuses des falaises.

4.2.2 Zonage de la susceptibilité aux glissements de terrain pour les hautes côtes rocheuses

Le zonage de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la zone côtière en plus des paramètres et des éléments décrits et discutés dans les chapitres précédents, prévoit leur intégration avec le milieu marin et les données sur le climat et les vagues. En Méditerranée (et pas seulement, mais à la différence de l'Atlantique et du Pacifique), le phénomène d'instabilité des côtes rocheuses et leur recul sont généralement caractérisés par des taux très faibles mais concentrés dans des épisodes très rapides souvent liés lors d'événements à haute énergie au cours desquels des mouvements de masse massifs sont générés, beaucoup plus élevés que la moyenne et qui sont difficiles à observer et à mesurer en raison de leur irrégularité. Il en résulte que même leur prévisibilité est difficile, et avec elle la planification appropriée d'un territoire côtier rocheux. A cela s'ajoute la difficile accessibilité générale.

Le but est que, suite à l'analyse à échelle locale qui sera réalisée dans les différents sites pilotes identifiés en Sardaigne, il est possible de tracer les caractéristiques les plus représentatives pour distinguer leur propension à la perturbation des glissements de terrain dans les côtes. L'hypothèse de départ, et les premières études le confirment, envisagent de prendre en considération outre les facteurs géologiques au sens large (pente de la falaise, lithologie, présence de couches souterraines, géométrie de la falaise submergée, etc.), aussi ceux hydrodynamiques (exposition au mouvement des vagues) et météorologiques (présence de fortes pluies dans les séries historiques, vents dominants, etc.). Mais s'il y en a d'autres, et de quelle manière et avec quel poids ils devront être pris en compte, ils feront l'objet de l'étude prévue dans la phase suivante de mise en œuvre du projet (Component T3, voir fiche projet MAREGOT) différentes expériences décrites dans la littérature. Voici quelques exemples des plus intéressants.

4.2.2.1 Méthode semi-quantitative (Del Río & Gracia, 2009)

Del Río & Gracia (2009) propose une méthode semi-quantitative pour évaluer le risque d'érosion du récif dans les climats tempérés, en analysant à la fois les principaux facteurs de déclenchement et les aspects socio-économiques associés à l'érosion, qui représentent le potentiel de perte de la falaise (comprise comme une retraite) et dommages potentiels. La méthode est testée et validée en utilisant des données sur les taux de retrait des récifs et les processus gravitationnels sur la côte de la province de Cadix (SW Espagne, Figure 16, Figure 17). L'approche proposée par les auteurs permet le zonage des falaises côtières en fonction du niveau de risque, de péril et/ou d'impact, y compris la reconnaissance des zones critiques où appliquer des stratégies d'intervention d'atténuation. Dans le détail, les auteurs proposent l'utilisation d'une série de facteurs naturels intégrés avec d'autres anthropiques (tels que l'utilisation des sols, la présence de zones urbaines et de zones naturelles, la densité de population, etc.). Les facteurs naturels sont les suivants: lithologie, structure, pente, présence et caractéristiques des plages pour protéger la falaise ou les plateformes rocheuses, variation de la marée, exposition aux vagues, variation de la vague en cas de tempête, variation du niveau de la mer, précipitations. Certains des facteurs humains sont également considérés comme des facteurs naturels, tels que les structures d'ingénierie de protection situées au pied de la falaise. Les facteurs sont considérés en fonction de leur impact sur l'instabilité ou l'érosion d'une falaise. Il est important de noter que les auteurs eux-mêmes suggèrent que leur choix et leur poids sont adaptés aux conditions d'application; par exemple, il est clair que le système côtier atlantique où la méthode a été testée présente des caractéristiques profondément différentes de celles de la Méditerranée, ne serait-ce que pour la variation du niveau de la mer, de l'amplitude des marées et de l'énergie des vagues. L'impact de ces éléments sur les côtes de la zone méditerranéenne est certainement différent. Un exemple est la variation moins importante des marées qui favorise une concentration des vagues dans le sillon toujours à des niveaux similaires et qui maximise donc l'effet érosif de l'onde moyenne. Dans le cas contraire, l'énergie des vagues en présence de fortes variations de marée est dissipée sur les grandes surfaces.



Figure 16 - Exemple d'évolution historique du bord de la falaise entre 1956 et 2005 et transepts de perpendiculaire à la côte le long de laquelle les mesures ont été faites.

Cette méthode est supposée semi-quantitative car, bien qu'elle présuppose une mesure de certains paramètres physiques auxquels attribuer un poids différent, elle est faite dans le travail présenté de manière arbitraire, avec des considérations dérivées de l'expérience des auteurs, comme typique des méthodes heuristiques et qualitatives. Dans le cadre des études détaillées prévues par le projet dans certains sites pilotes, et en présence d'un inventaire des glissements de terrain affectant les côtes rocheuses, on pense pouvoir attribuer aux différents facteurs un poids mesuré statistiquement et vérifier leur fiabilité en appliquant ces données dans d'autres régions où il existe un inventaire des glissements de terrain à utiliser comme élément de contrôle.

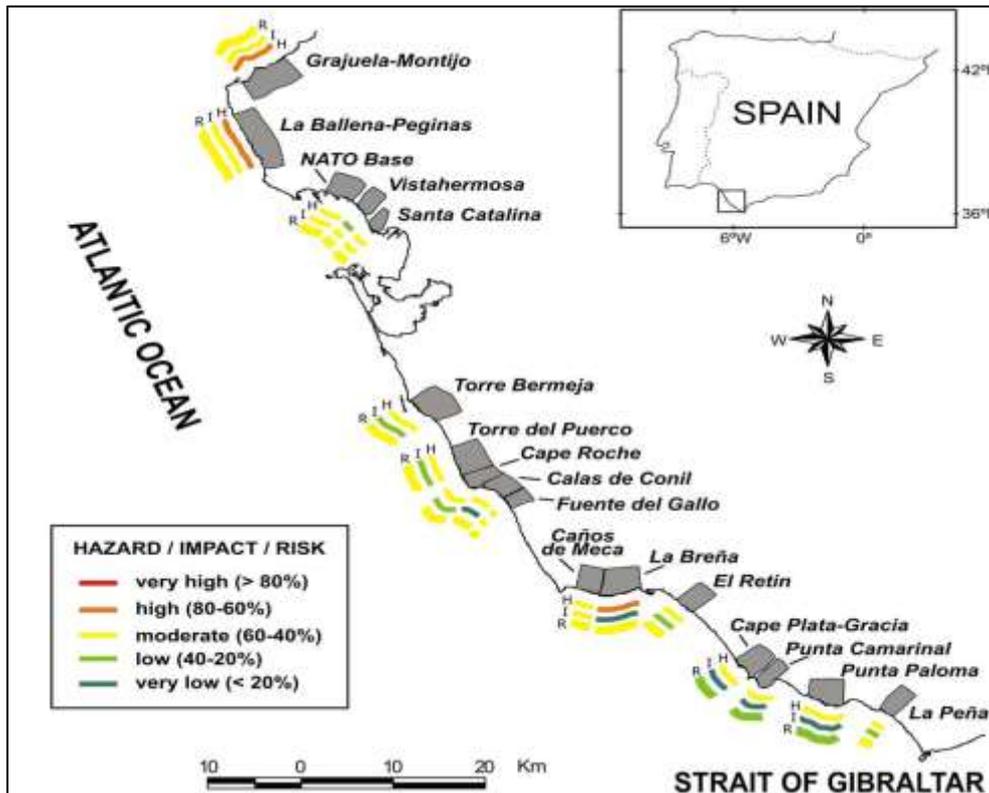


Figure 17 - Application d'une méthode semi-quantitative pour définir la susceptibilité, le péril, l'impact et le risque d'une portion de côte dans le sud de l'Espagne. De Del Rio & Gracia, 2009.

4.2.2.2 Méthodologie probabiliste (Certainty factor)

Le critère fondamental d'une méthodologie statistique est que, en présence d'un inventaire des phénomènes de glissements de terrain actuels et détaillés et en étudiant les facteurs qui déterminent l'instabilité d'une falaise côtière, il est possible d'identifier des zones ayant la même tendance au développement des phénomènes d'instabilité même s'ils ne se sont pas déjà produits. La méthode illustrée ci-dessous est une méthode probabiliste statistique directe qui, pour l'évaluation de la contribution des différents paramètres liés à l'instabilité, utilise l'approche du *Certainty Factor* (CF) ou du «facteur de certitude» (Binaghi et al. 1998, Devokta et al., 2013, Pourghasemi et al., 2013). Les données utilisées, localisées au moyen d'une géodatabase, permettent de vérifier la FC qui exprime la probabilité (dans un intervalle de variation variant entre -1 et +1) qu'une certaine hypothèse puisse se produire (zone susceptible de glissement) par rapport à la présence ou absence de preuves connues. Les valeurs positives des FC indiquent une plus grande certitude de l'hypothèse réalisée, tandis que les valeurs négatives déterminent une diminution de la certitude de l'activation éventuelle d'un glissement de terrain. Une valeur de CF proche de zéro indique plutôt qu'il n'est pas possible de donner une indication de la probabilité que l'hypothèse se produise. Les valeurs de CF sont obtenues en comparant certains

paramètres spatialisés à travers des cartes thématiques (par exemple l'exposition de la falaise au mouvement des vagues) avec l'apparition de glissements de terrain, tirés de la carte d'inventaire des glissements de terrain, selon la formule suivante:

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & \text{se } PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_a)} & \text{se } PP_a < PP_s \end{cases}$$

La valeur pp_a est calculée comme le rapport entre la zone de glissement appartenant à une classe donnée et la superficie totale de cette classe (par exemple: glissements de terrain/exposition de la falaise au mouvement des vagues). La valeur pp_s est la relation entre la surface des zones de glissements de terrain et la surface de l'ensemble de la zone d'étude.

Par conséquent, les valeurs de probabilité sont calculées en utilisant les paramètres:

1. Zone dans le studio
2. Superficie totale des glissements de terrain dans la zone d'étude (dérivée des polygones des glissements de terrain étudiés)
3. Superficie totale de chaque classe pour chaque thème (ex: exposition de la falaise au mouvement de la vague dominante)
4. Zone affectée par un glissement de terrain de chaque classe par un seul thème (ex: glissement de terrain)

Les valeurs numériques utilisées sont mesurées en nombre de *pixels*.

Le facteur de certitude est calculé pour chaque *Layer* de données considérée comme un indicateur d'instabilité, de sorte que nous procédons à la combinaison deux-par-deux des couches, au moyen de règles d'intégration successives (Chung et Fabbri, 1993):

$$z = \begin{cases} x + y - xy & \text{se } x, y \geq 0 \\ \frac{x + y}{1 - \min(|x|, |y|)} & \text{se } x, y \text{ sono di segno diverso} \\ x + y + xy & \text{se } x, y < 0 \end{cases}$$

dans lequel x et y sont les CF liés à deux couches différentes et z est leur combinaison, c'est-à-dire le CF résultant. L'intégration de CF se fait en appliquant les règles précédentes d'une manière itérative sur les thèmes considérés: le résultat de la première intégration entre les deux premiers thèmes sera combiné avec le troisième thème, fournissant un résultat qui sera combiné avec le quatrième et ainsi de suite jusqu'au *Layer* de données.

L'approche méthodologique proposée peut également fournir une différenciation spécifique liée au type de glissement de terrain, de sorte que différents indicateurs d'instabilité peuvent être considérés en fonction des différents types de glissements de terrain.

Les valeurs calculées de CF doivent être reclassées dans des classes d'instabilité potentielle ou de probabilité d'occurrence d'un phénomène de glissement de terrain, dans ce cas il devient fondamental de pouvoir construire une fréquence de phénomènes.

4.2.2.3 Méthodologie RES (Rock Engineering System)

Le RES est une méthodologie développée par Hudson (Hudson, 1992) pour aborder les problèmes de la mécanique des roches d'un point de vue systémique. Cette méthodologie d'analyse peut être très utile pour traiter rapidement les zones qui ont des processus d'instabilité généralisée. La force du RES est sa polyvalence; il est bien connu que, selon les lois générales, les systèmes naturels ont des réponses différentes selon le lieu et le temps. Le RES présente, même dans le cadre d'un schéma général établi sur la base du type de problème à traiter, les paramètres et les interactions qui peuvent être adaptés de temps en temps au contexte et aux objectifs de l'étude du projet; de même, il sera possible de varier le degré de détail avec lequel le système peut être caractérisé, ses éléments et ses interactions. Pour gérer un modèle systémique, il est nécessaire de considérer les éléments et les interactions qui le composent à l'aide d'un instrument. Dans la méthodologie RES, cet outil est représenté par la matrice des interactions. Le principe fondamental de la matrice des interactions est de lister les principaux paramètres le long de la diagonale principale et de considérer les interactions dans les cellules non diagonales. Les termes de la diagonale principale peuvent être des sujets ou des concepts: ils ne doivent pas nécessairement avoir des valeurs quantitatives, bien qu'il y ait des avantages à s'assurer qu'ils sont tous de la même qualité, par exemple mesurables avec la même unité. En ce qui concerne les interactions, il existe différentes manières de présenter l'information: une cellule d'interaction peut contenir une analyse plus détaillée du mécanisme ou, en variante, on peut essayer de représenter la signification du mécanisme à travers une certaine forme de codage. La matrice est, en général, asymétrique; l'asymétrie est associée au fait que l'interaction dépend du chemin suivi. En général, un phénomène peut être étudié avec un degré de détail compatible avec les moyens et les objectifs imposés. En ce qui concerne la matrice des interactions, un plus grand degré de détail signifie également un plus grand nombre de paramètres et de relations à prendre en compte. Dans la matrice des interactions, utiliser une résolution plus élevée signifie être capable de reconnaître des relations de causes d'effets plus élémentaires; inversement, l'utilisation d'une résolution grossière consiste à agréger dans un paramètre ou dans une interaction plusieurs paramètres ou mécanismes élémentaires; le concept de résolution est également lié aux cellules non diagonales et à la densité qu'elles donnent à la matrice. Comme, dans le cas général, il s'agit d'un nouveau problème pour lequel un modèle prêt n'est pas disponible, le modèle de référence doit être construit sur la base des connaissances spécifiques disponibles. La procédure d'application de la méthodologie RES est divisée en deux phases: une première analyse (l'entrée dans le système) et un résumé ultérieur (la sortie du système). Dans la première phase, définie les objectifs, le système est décomposé en ses parties uniques, c'est-à-dire les éléments et les interactions, afin de les définir et de les examiner.

Le plan général est le suivant:

- 1) Définition des objectifs: étant la méthodologie basée sur l'objectif, sa définition doit être effectuée en premier; cette phase peut conditionner la linéarité de l'analyse elle-même.
- 2) Analyse du système: dans cette phase, les paramètres impliqués dans le fonctionnement du système sont établis; il n'y a pas de règle absolue à choisir avec quel et combien de paramètres construire dans le modèle; sur la base des objectifs, l'opérateur doit rejeter les paramètres les moins significatifs et choisir les paramètres et relations les plus représentatifs et / ou complexes à étudier.
- 3) Analyse des mécanismes interactifs: il s'agit de collecter les informations disponibles pour la caractérisation des interactions entre tous les paramètres choisis, en déterminant lesquels sont significatifs et non en fonction des objectifs, des moyens disponibles et donc du degré de détail choisi. Le produit de cette phase est une matrice très détaillée et adhérente au problème étudié.

Les deux dernières étapes de la phase analytique sont mises en œuvre en s'appuyant sur la littérature disponible et en collectant des données in situ. Une fois la phase d'analyse terminée, la base de connaissances est nécessaire pour «résumer» le problème. Nous entrons ainsi dans la phase de synthèse, également divisée en trois étapes:

- 1) Structuration des connaissances acquises: la phase de synthèse débute par la réorganisation des connaissances accumulées dans une structure fonctionnelle aux objectifs et aux moyens disponibles pour la mesure des paramètres et des phénomènes. Tout ceci peut impliquer une nouvelle compaction de la matrice détaillée à laquelle nous sommes parvenus à la suite de la troisième étape de la phase analytique.
- 2) Compréhension du fonctionnement du modèle: dans cette étape vous avez l'opportunité d'approfondir la compréhension entamée avec la deuxième étape en interprétant (pour nos objectifs) le fonctionnement du système tel qu'il a été structuré par nous, avec le degré de détail accordé par les contraintes imposées (temps, ressources, outils). L'interprétation du modèle passe par le codage de la matrice des interactions.
- 3) Établissez les méthodes et les procédures à adopter: à la suite de la phase de synthèse, vous avez une connaissance complète du système, vous pouvez donc décider et mettre en œuvre les actions que vous devrez entreprendre pour atteindre les objectifs fixés. Il peut s'agir de méthodes, de données à collecter ou d'algorithmes de calcul.

Une fois la matrice d'interactions construite, il existe plusieurs méthodes pour leur codage numérique. Les plus utilisées sont les méthodes semi-quantitatives avec jugement d'expert (ESQ, Hudson, 1992). Par ce codage, pour chaque paramètre P représenté dans la diagonale de la matrice, l'influence de ce paramètre sur tous les autres (causes) et l'influence que tous les autres ont sur lui (effets) peuvent être évaluées. La valeur numérique de la cause et de l'effet pour chaque paramètre est tracée sur un diagramme C-E à partir duquel l'importance de chaque paramètre dans le système considéré peut être établie (Figure 18), puis assignée aux classes de valeurs déterminées pour ce paramètre.

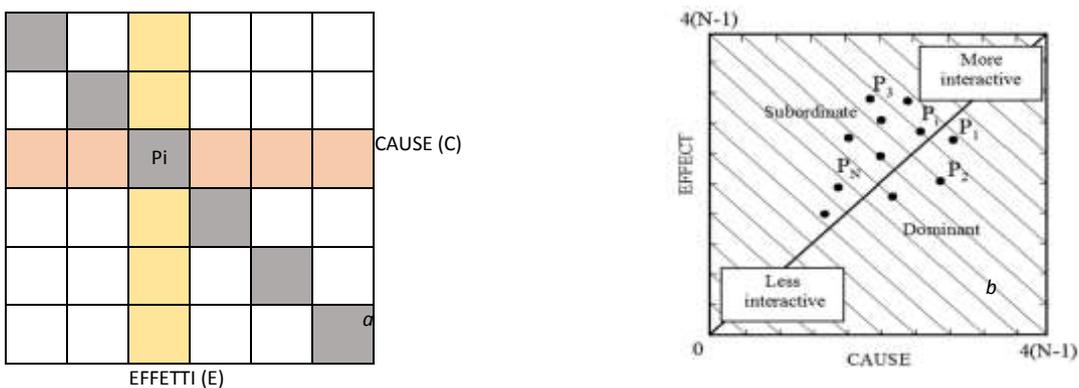


Figure 18 - Matrice des interactions (a); la somme des valeurs dans les lignes et les colonnes passant par chaque paramètre définit les coordonnées des points de cause à effet pour chaque paramètre (b) (de Hudson, 1992, modifié).

4.2.2.3.1 Index RMII

La méthodologie RES est utilisée pour déterminer l'indice d'instabilité Rock Mass Instability Index (RMII), qui fournit une indication du niveau d'instabilité potentielle des pentes (Mazzoccola, 1992, Mazzoccola & Hudson, 1996); plus cet indice sera grand plus les pentes seront instables. L'index RMII, pour un côté j , est donné par la sommation:

$$RMII_j = \sum_0^n a_i P_{ji}$$

Où:

- a_i représente la contribution de C+E de chaque paramètre sur le total des contributions C+E ($a_i = \frac{C_i + E_i}{\sum_i C_i + \sum_i E_i}$)
- P_{ji} c'est le score attribué aux différentes classes de valeurs du paramètre (différent pour chaque côté j) à travers la procédure de codification des causes et des effets.

Les valeurs de susceptibilité obtenues peuvent être classées, pour une plus grande lisibilité, dans les niveaux qui identifient les zones de susceptibilité faible, moyenne et élevée. Le coefficient est destiné à peser la valeur du paramètre à travers l'importance du complexe de ses interactions avec le reste du système. Cet indice représente la synthèse la plus efficace du rôle du paramètre dans le système. Sur la base de cela, il est possible de faire une classification des paramètres, ce qui constitue une autre manière d'interpréter le système.

4.2.2.4 Méthode basée sur des études géologiques-structurelles indirectes (De Vita et al., 2012)

Sur la base des résultats d'enquêtes indirectes géologiques/structurelles ou "sans contact", De Vita et al. (2012) ont développé une méthodologie pour l'évaluation détaillée de la susceptibilité à la rupture dans les zones côtières rocheuses partiellement résidentiel. Les auteurs ont appliqué cette méthodologie en Ligurie, dans le golfe du Tigullio (Mer Tyrrhénienne Nord-Nord), le long d'un tronçon de haute côte d'environ 6 km de long. La méthode a été développée afin de fournir des informations utiles pour l'aménagement du territoire, en particulier pour les zones côtières caractérisées par une faible accessibilité. Comme on le sait dans le panorama scientifique, dans le cas des hautes côtes rocheuses, les caractéristiques géologiques et structurelles sont généralement bien exposées mais difficilement mesurables en raison de l'accessibilité difficile des sites. Dans ces contextes géomorphologiques, la photogrammétrie numérique terrestre peut être considérée comme une technique utile de *Remote Sensing* pour la caractérisation et la cartographie des systèmes de discontinuité (Crosta, 1997). La méthodologie proposée par De Vita et al. (2012) peut être classé comme avancé (Fell et al., 2008) en raison de l'échelle de détail à laquelle la cartographie de la propension à l'échec (échelle 1: 5000) est retournée et repose sur les étapes opérationnelles suivantes (Figure 19): i) étude photogrammétrique continue de la ligne de côte depuis la mer, ii) analyse géologique et géomorphologique des paires stéréoscopiques d'images photographiques, iii) analyse géologique-structurale de la méso et de la macro échelle des fronts rocheux afin d'identifier les zones homogènes du point de la vie géologique-structurelle, iv) estimation de la disposition des discontinuités au moyen de techniques de détection sans contact utilisant des tables rigides orientées et des boussoles, v) analyse cinématique de la stabilité des sections de haute côte au moyen de tests de Matheson (1983); vi) la mise en œuvre d'un modèle de susceptibilité à la rupture dans l'environnement SIG en utilisant des données sur la géométrie de la pente (inclinaison et orientation) et les dépôts de discontinuité. En raison des caractéristiques morphologiques particulières de la zone d'étude et de son extension, afin de valider l'estimation de la discontinuité réalisée par des techniques indirectes sur des images photogrammétriques et de vérifier ensuite le degré de subjectivité, les auteurs ont comparé les résultats. des levés géomécaniques sur site effectués en correspondance avec les fronts rocheux échantillonnés.

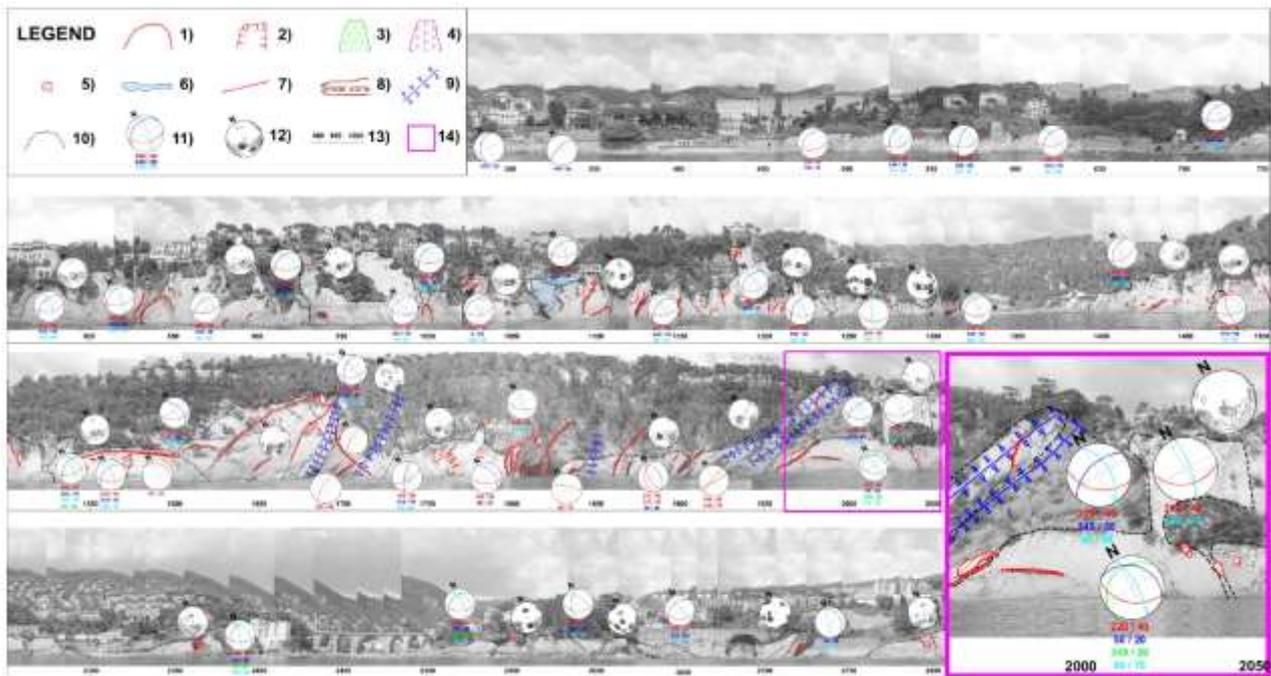


Figure 19 - Mosaïque photographique montrant l'application de la méthode basée sur des levés géologiques-structuraux indirects, proposée par De Vita et al. (2012). Légende: (1) niches pour le détachement des glissements de terrain de l'effondrement; (2) de simples niches de glissement de terrain; (3) les dépôts d'effondrement; (4) les dépôts de glissement de terrain; (5) blocs de roche instables; (6) des mesures pour atténuer les risques de glissement de terrain; (7) les fautes; (8) les zones de coupe et de glissement; (9) axe de pli; (10) station de détection géomécanique; (11) l'orientation des discontinuités; (12) diagramme de densité de discontinuité; (13) scalimeter; (14) grossissement (tiré de De Vita et al., 2012)

5 PROPOSITION DU PROTOCOLE D'INVESTIGATION

Dans l'état actuel des activités, nous pouvons anticiper un modèle d'investigation qui devra être validé pendant la partie restante du projet, en l'appliquant aux différentes études de cas représentées par les sites pilotes choisis. Le chemin imaginé est maintenant résumé dans un organigramme qui met en ordre et en séquence une série d'investigations avec des produits scientifiques connexes attendus (Tableau 5.1). Ce protocole, encore générique dans le détail du contenu, est celui qui doit être appliqué à partir de l'échelle du site, puis de la portion de côte choisie, jusqu'à l'échelle extrêmement locale (ponctuelle) de la pente instable. Les résultats de cette étude permettront également de déterminer quelles quantités, paramètres ou indicateurs peuvent également être pertinents pour un zonage de la susceptibilité au risque de glissement de terrain à l'échelle régionale, à appliquer selon l'un des modèles empiriques, heuristiques ou statistiques indiqués dans le chapitre précédent.

Tableau 5.1 - Résumé des études et des produits techniques à réaliser pour l'étude à échelle local des côtes ayant une propension au développement de glissements de terrain

Caractéristiques	Typologie d'enquête	Produit attendu
Données existantes	Analyse et intégration des données existantes	Géodatabases et modèles cartographiques
Morphologique	<i>Remote Sensing</i> , Reliefs bathymétriques,	DTM de la partie émergée et morphologie de la partie submergée.
Analyse multitemporelle	analyse de photos aériennes	Modèle de la variation historique de la ligne de la côte
Géologique Structural	Reliefs de champ, <i>Remote Sensing</i> , Analyse de photo,	Modèle Géologique/Structurel
Géomorphologique	Reliefs de champ, <i>Remote Sensing</i> , Analyse de photo, Reliefs sous-marins	Modèle Géomorphologique Inventaire local des phénomènes de glissement de terrain
	Reliefs de champ, <i>Remote Sensing</i> , analyse de photo, Analyse in situ et en laboratoire	Caractérisation géomécanique, reconstruction 3D de la masse rocheuse (Modèle Géomécanique)
Géomécanique	Analyse in situ et en laboratoire	Modèle géotechnique
Géotechnique	Reliefs de champ, <i>Remote Sensing</i> ,	Modèle hydrogéologique
Hydrogéologique	analyse pluviométrique	Seuils Pluviométriques
Mouvement des vagues	Mesures directes et indirectes	Caractérisation énergétique du mouvement des vagues

5.1 PROPOSITION DE PROTOCOLE D'INVESTIGATION À L'ÉCHELLE LOCAL

En résumé, l'approche de l'étude à l'échelle local de la zone d'étude (dans cette phase du projet coïncidant avec les sites pilotes) est divisée en différentes phases illustrées à la Figure 20 et brièvement décrites ci-dessous.

1 - Etat de l'art

La première étape de l'intervention est l'intégration de toutes les informations provenant des études précédentes, en particulier les outils de gestion et de planification, tels que IFFI, PAI et PAC (dans le cas de la Sardaigne), géologiques, cartes géomorphologiques, etc. disponible. Cela fournira un cadre à utiliser pour la conception d'enquêtes à l'échelle locale. En particulier, toutes les informations doivent être reportées dans une Géodatabase afin de pouvoir la relier, également à travers des modèles cartographiques géoréférencés qui permettent l'évaluation relative des différentes caractéristiques. La même Géodatabase aura une telle architecture (voir chapitre 3) qu'elle peut être mise en œuvre et peuplée même avec les nouvelles données produites au cours des phases d'investigation ultérieures. Les produits attendus de cette phase préliminaire seront donc:

- une archive de données dynamique permettant de relier les différentes données, par exemple entre la présence de failles et de champs de fractures et les urgences hydrogéologiques ou entre sources et corps de glissements de terrain, etc.
- des modèles cartographiques, également dans des représentations 3D dérivant directement de l'archive de données.

Cette phase est importante car elle détermine en partie le type d'investigations ex-novo qu'il faudra effectuer. Par exemple, la présence éventuelle d'aquifères poreux au lieu de fissures peut influencer le type de levé hydrogéologique à effectuer à l'étape 4.

2 - Acquisition de modèles topographiques

Réalisation, ou acquisition si déjà disponible, des modèles topographiques de la partie émergée et de la partie submergée.

3 - Modèle du mouvement des vagues et du modèle climatique

Selon les méthodes indiquées, cette caractérisation est fonctionnelle pour comprendre les mécanismes qui peuvent déclencher les instabilités détectées à l'étape 4 et approfondies à l'étape 6 et contribuer à la définition du modèle d'instabilité à l'étape 7. De plus, elles deviennent utiles pour l'hypothèse surveillance.

4- Reliefs pour la caractérisation géologique, géomorphologique et hydrogéologique

Réalisation des cartographies thématiques de la partie émergée et de la partie submergée selon les méthodes décrites au chapitre 2. Les produits attendus sont généralement des modèles tridimensionnels, qui contiennent les données les plus importantes de la partie émergée et de la partie submergée. L'utilisation de techniques d'analyse photogrammétrique numérique à l'échelle appropriée est fonctionnelle pour une caractérisation géomécanique rapide de toute la section côtière étudiée. L'exactitude de la méthode sera évaluée et validée par des mesures in situ. Dans cette phase, un inventaire actualisé des glissements de terrain est également réalisé, avec éventuellement des caractéristiques qui le rendent cohérent avec les glissements de terrain régionaux et/ou nationaux.

5 - Analyse multitemporelle

Sur la base des enquêtes réalisées à l'étape 4, une analyse des images historiques et des cartographies peut être effectuée pour déterminer la variation du littoral et la fréquence des événements d'instabilité. Cette analyse est importante pour la définition de la dangerosité des zones étudiées.

6- Étude détaillée des pentes instables

Sur la base des modèles cartographiques réalisés, des sites instables sont identifiés et donc un approfondissement de l'étude est réalisé avec une caractérisation géologique et géomorphologique détaillée, une caractérisation géomécanique et géotechnique de la pente, et le corps du glissement de terrain est également détaillé. Les techniques d'analyse photogrammétrique numérique sont également appliquées dans cette phase, avec plus de détails pour une caractérisation géomécanique efficace des masses rocheuses étudiées. Dans cette phase, les volumes de sédiments déversés dans la mer pourraient également être mesurés, afin de mettre en évidence la propension à la contribution sédimentaire des étendues de hautes côtes rocheuses étudiées. Données pouvant être utiles pour les modèles sédimentaires des corps sablonneux côtiers. Dans cette phase, des analyses d'instabilité sont produites.

7 - Modèle d'instabilité

En intégrant la connaissance générale du tronçon de côte étudié (étape 4) du mouvement des vagues (étape 3), la caractérisation des détails (étape 5) et l'analyse détaillée du site (étape 6), il est possible de définir un modèle d'instabilité. Nous mettons en évidence quels sont les processus qui induisent des glissements de terrain, définissent un zonage local de dangerosité.

8 - Hypothèse d'intervention

Sur la base du modèle de l'étape 7 et des études de l'étape 6, des interventions de sécurité, de stabilisation, etc. peuvent être proposées.

9- Hypothèse de monitoring

Le modèle d'instabilité à l'étape 7, qui intègre également les données climatiques et hydrodynamiques de l'étape 3, permet de vérifier les paramètres et / ou les quantités qui peuvent être surveillés dans le but de prévoir les événements et de réduire le risque.

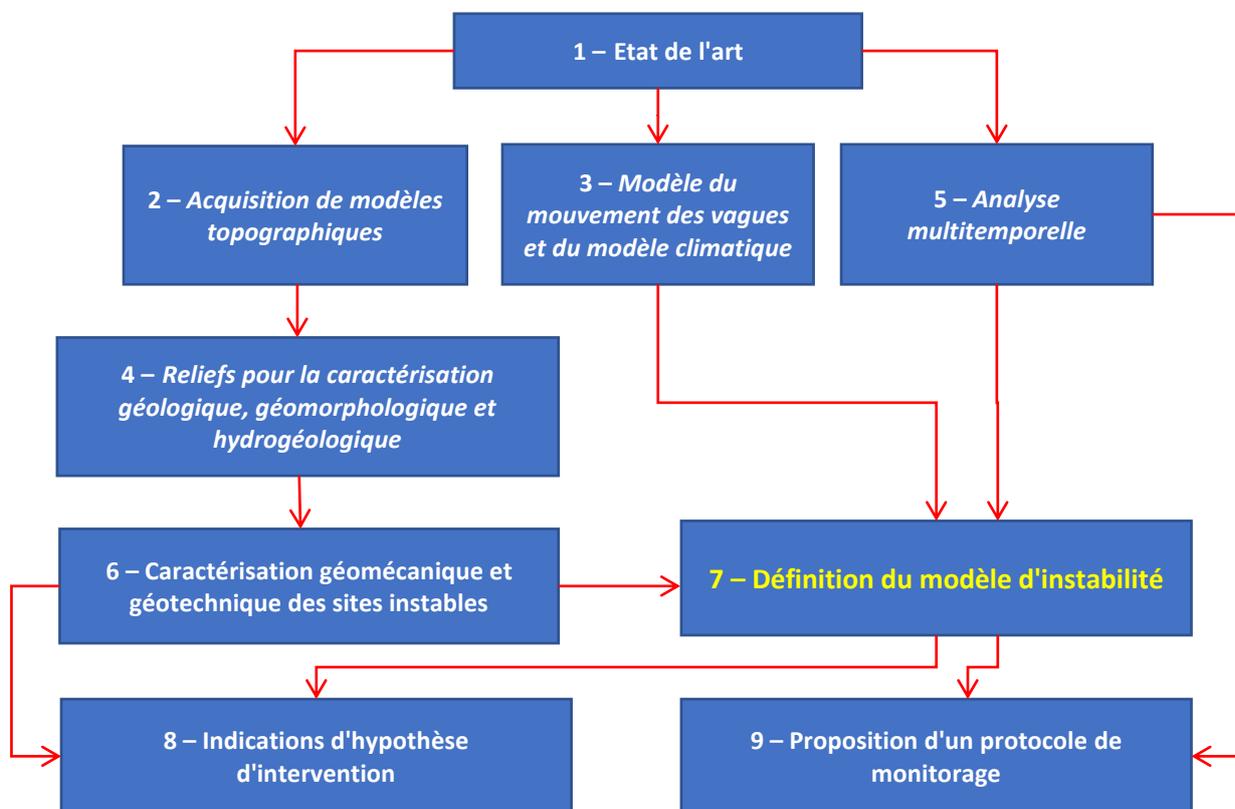


Figure 20 - Hypothèse du protocole d'enquête à l'échelle locale (celle du site pilote)

6 BIBLIOGRAPHIE

- Andriani GF, Walsh N (2007). Rocky coast geomorphology and erosional processes: a case study along the Murgia coastline south of Bari, Apulia- SE Italy. *Geomorphology* 87(3):224–238.
- Antronico, L., Borrelli, L., Gullà, G., & Sorriso-Valvo, M. (2010). La frana di Maierato (Calabria, Italia meridionale) del febbraio 2010: caratteristiche geomorfologiche ed evoluzione. *GEAM GEIngegneria Ambientale e Mineraria*, 2, 15-26.
- APAT, Università degli Studi Roma Tre. (2005). Atlante delle onde nei mari italiani.
- Atzeni, A., (2011). Dispense di idraulica marittima. Aracne Editrice, 400 p.
- Binaghi, E., Luzi, L., Madella, P., Pergalani, F., & Rampini, A. (1998). Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy Dempster–Shafer approaches. *Natural hazards*, 17(1), 77-97.
- Bray, M.J., Hooke, J.M., (1997) - Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise. *Journal of Coastal Research* 13, 453–467.
- Budetta, P., G. Galiotta, and A. Santo (2000). "A methodology for the study of the relation between coastal cliff erosion and the mechanical strength of soils and rock masses." *Engineering Geology* 56.3-4: 243-256.
- Budetta P, Nappi M (2011). Heterogeneous rock mass classification by means of the geological strength index: The San Mauro formation (Cilento, Italy). *Bull Eng Geol Environ* 70:585–593. doi:10.1007/ s10064-011-0351-1
- Budetta, P., & De Luca C. (2015). "Wedge failure hazard assessment by means of a probabilistic approach for an unstable sea-cliff." *Natural Hazards* 76.2 (2015): 1219-1239.
- Budetta, P., C. De Luca, & M. Nappi. (2016). "Quantitative rockfall risk assessment for an important road by means of the rockfall risk management (RO. MA.) method." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 75.4 (2016): 1377-1397.
- Bukata, R.P., Jerome, J.H., Kondratyev, K.Y., Pozdnyakov, D.V., 1995. Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters. CRC Press, Boca Raton.
- Buttau C., Fanelli F., Funedda A., Ibba A., Loi A., & Pillola G.L. 2011. Evidence of Quaternary tectonics in SW Sardinia. *Rendiconti online Soc. Geol. It.*, Vol. 15 (2011), pp. 11-13.
- Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska annaler: series A, physical geography*, 62(1-2), 23-27.
- Cancelli, A., & Nova, R. (1985, August). Landslides in soil debris cover triggered by rainstorms in Valtellina (Central Alps-Italy). In *Proceedings of the 4th international conference and field workshop on landslides*, The Japan Geological Society, Tokyo (pp. 267-272).
- Cannon, S. H. and Ellen, S.: (1985) -Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California, *California Geology*, 38(12), 267–272,.
- Carobene L., 1972. Osservazioni sui solchi di battente attuali ed antichi nel golfo di Orosei in Sardegna. *Italian Journal of Geosciences* (1972) 91 (3): 583-601.
- Cascini L, Bonnard Ch, Corominas J, Jibson R, Montero-Olarte J, (2005). Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development—state of the art report. In: Hungr O, Fell R, Couture R, Eberhardt E (eds) *Landslide risk management*. A.A. Balkema, Amsterdam, pp 199–235.
- Cascini L (2008). Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Eng Geol* 102:164–177.
- Castedo, R., Murphy, W., Lawrence, J., & Paredes, C. (2012). A new process–response coastal recession model of soft rock cliffs. *Geomorphology*, 177, 128-143.
- Castedo R, Ferná'ndez M, Trenhaile AS, Paredes C, (2013). Modeling cyclic recession of cohesive clay coasts: effects of wave erosion and bluff stability. *Marine Geol* 335:162–176. doi: 10.1016/j.margeo. 2012.11.001
- Castedo, R., Paredes, C., de la Vega-Panizo, R., & Santos, A. P. (2017). The Modelling of Coastal Cliffs and Future Trends. In *Hydro-Geomorphology-Models and Trends*. InTech.

- Chelli A., Pappalardo M., Arozarena Liopis I., Federici P.R. 2010. The relative influence of lithology and weathering in shaping shore platforms along the coastline of the Gulf of La Spezia (NW Italy) as revealed by rock strength. *Geomorphology* 118 (2010) 93–104.
- Chiappone, A. & Scavia C. (1999) -"La prova al blu di metilene nella caratterizzazione geotecnica: un'applicazione allo studio della stabilità dei versanti." *Rivista italiana di geotecnica* 4: 36-51.
- Civita M. (2005) - *Idrogeologia applicata e ambientale*. CEA.
- Colantoni P., Mencucci D., Nesci O.; (2004) - Coastal processes and cliff recession between Gabicce and Pesaro (northern Adriatic Sea): a case history *Geomorphology*, 62, pp. 257-268
- Collins, B.D., Sitar, N., (2008) - Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA. *Geomorphology* 97, 483–501.
- Corominas, J., et al. (2014). "Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk." *Bulletin of engineering geology and the environment* 73.2: 209-263.
- Crosta, G. (1997). Evaluating Rock Mass Geometry From Photographic Images, *Rock Mech. Rock Eng.*, 30, 35–58
- Crosta, G. (1998). Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. *Environmental Geology*, 35(2-3), 131-145.
- Crosta, G. B., & Frattini, P. (2003). Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(1/2), 81-93.
- Crosta, G. B., & Agliardi, F. (2003). Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(1), 176-191.
- Crozier, M. J. (1999). Prediction of rainfall-triggered landslides: A test of the antecedent water status model. *Earth surface processes and landforms*, 24(9), 825-833.
- De Blasio F.V. & Mazzanti P. (2010) - Subaerial and subaqueous dynamics of coastal rockfalls. *Geomorphology*, 115: 188-193.
- De Vita P., Cevasco A., Cavallo C. (2012). Detailed rock-failure susceptibility mapping in steep rocky coasts by means of non-contact geospatial surveys: the case study of the Tigullio Gulf (Eastern Liguria, Northern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 867–880, 2012. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/12/867/2012/.
- Del Río, L., Gracia, F.J., (2009) - Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments. *Geomorphology* 112, 82–95.
- Dessena, A., & Melis, M. T. (2006). *Telerilevamento applicato*.
- Devkota, K. C., Regmi, A. D., Pourghasemi, H. R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I. C., ... & Althuwaynee, O. F. (2013). Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural hazards*, 65(1), 135-165.
- Doneus, M., Briese, C., 2011. Airborne Laser Scanning in Forested Areas - Potential and Limitations of an Archaeological Prospection Technique. In: Cowley, D. (Ed.), *Remote Sensing for Archaeological Heritage Management*. Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjavik, Iceland, 25-27 March 2010. Archaeolingua; EAC, Budapest, pp. 53–76.
- Dramis F. & Bisci C. (1998) – *Cartografia Geomorfologica*. Pitagora Ed., Bologna, 215 pp.
- Fairbridge, F.W., 1968. *The Encyclopedia of Geomorphology*, voll.2. Fairbridge F.W.(Ed.), Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Stroudsburg, Pennsylvania, pp 1295.
- Fall, M., R. Azzam, and C. Noubactep. "A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping." *Engineering geology* 82.4 (2006): 241-263.
- Fell R, Corominas J, Bonnard Ch, Cascini L, Leroi E, Savage WZ (on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes) (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Eng Geol* 102:85–98.

- Fell, E. L. C. B. R. (2005). Risk assessment and management. In *Landslide risk management* (pp. 163-202). CRC Press.
- Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S., Leroi, E., (2005). A framework for landslide risk assessment and management. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), *Landslide Risk Management*. Taylor and Francis, London, pp. 3–26.
- Fellenius, W., (1936) - Calculations of the stability of earth dams. *Transaction of the 2nd Congress on Large Dams*, 4, Washington, D.C.
- Francioni, M., et al. (2014). "A case study integrating remote sensing and distinct element analysis to quarry slope stability assessment in the Monte Altissimo area, Italy." *Engineering Geology* 183 (2014): 290-302.
- Furlani, S., Cucchi, F., Odorico, R., 2010. A new method to study microtopographical changes in the intertidal zone: one year of TMEM measurements on a limestone removable rock slab (RRS). *Z. Geolorphol.* 54 (Suppl. 2), 137e151.
- Furlani S., Cucchi F., Biolchi S., Odorico R. 2011. Notches in the Northern Adriatic Sea: Genesis and development. *Quaternary International* 232 (2011) 158e168
- Garzia G. (2007). L'erosione costiera e gli interventi di ripascimento del litorale: il quadro giuridico attuale e le prospettive di riforma. *Federalismi.it, Rivista di diritto pubblico, italiano comunitario e comparato*.
- Glade, T., Crozier, M., & Smith, P. (2000). Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model". *Pure and Applied Geophysics*, 157(6-8), 1059-1079.
- Group, T. W. (1988). The WAM model—A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12), 1775-1810.
- Gupta, A. S., & Rao, K. S. (2000). Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering Geology*, 56(3-4), 257-274.
- Gurocak, Z., & Kilic, R. (2005). Effect of weathering on the geomechanical properties of the Miocene basalts in Malatya, Eastern Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(4), 373-381.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and atmospheric physics*, 98(3-4), 239-267.
- Hall AM, Hansom JD, Jarvis J (2008). Patterns and rates of erosion produced by high energy wave processes on hard rock headlands: the Grind of the Navir, Shetland, Scotland. *Mar Geol* 248:28–46. doi:10.1016/j.margeo.2007.10.007
- Hervás, Javier, et al. (2003). "Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy." *Geomorphology* 54.1-2: 63-75.
- Hudson J.A. (1992). *Rock Engineering Systems: Theory and Practice*. New York, Ellis Horwood.
- Izaguirre, C., Méndez, F.J., Menéndez, M. and Losada, I.J., (2011). Global extreme wave height variability based on satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, 38 (10), 10.1029/2011GL047302.
- Kelletat, D., 1997. Mediterranean coastal biogeomorphology: processes form and sea-level indicators. In: Briand, F., Maldonado, A. (Eds.), *Transformations and Evolution of Mediterranean Coastline*: Monaco: Bull. Inst. of Oceanography, special, 18, pp. 209–226.
- Kogure, T., Aoki, H., Maekado, A., Hirose, T., & Matsukura, Y. (2006). Effect of the development of notches and tension cracks on instability of limestone coastal cliffs in the Ryukyus, Japan. *Geomorphology*, 80(3-4), 236-244.
- Laborel, J., Morhange, C., Collina-Girard, J., Laborel-Deguen, F., 1999. Littoral bioerosion, a tool for the study of sea-level variations during the Holocene. *Bulletin. Geological Society of Denmark* 45, 164–168.
- Lajoie, K.R., Mathieson, S.A., (1998) - 1982-83 El Niño Coastal Erosion, San Mateo County. U.S. Geologic Survey Open-File Report 98-041, CA. 61pp.
- Lee, E.M. & Clark, A.R., 2002. *Investigation and management of soft rock cliffs*. DEFRA, Thomas Telford, London.
- Lim, M., Rosser, N. J., Allison, R. J., & Petley, D. N. (2010). Erosional processes in the hard rock coastal cliffs at Staithes, North Yorkshire. *Geomorphology*, 114(1-2), 12-21.
- Martelloni, G., Segoni, S., Fanti, R., & Catani, F. (2012). Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale. *Landslides*, 9(4), 485-495.

- Martino, S., and P. Mazzanti. "Integrating geomechanical surveys and remote sensing for sea cliff slope stability analysis: the Mt. Pucci case study (Italy)." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14.4 (2014): 831.
- Marques, F. M. S. F., Matildes, R., & Redweik, P. (2013). Sea cliff instability susceptibility at regional scale: a statistically based assessment in the southern Algarve, Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(12), 3185.
- Matheson, G. D. (1983). Rock stability assessment in preliminary site investigations: graphical methods. Laboratory report 1039 of Transport and Road Research Laboratory, Berkshire, UK, 30 pp.
- Mazzanti, P., Bozzano, F., Brunetti, A., Esposito, C., Martino, S., Prestininzi, A., ... & Mugnozza, G. S. (2015). Terrestrial SAR Interferometry monitoring of natural slopes and man-made structures. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 5* (pp. 189-194). Springer, Cham.
- Mazzoccola D., Hudson J. A. (1996). A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability, *The Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29, pp. 37 – 56.
- Mazzoccola D.F. (1992). A comprehensive method of rock mass characterization for indicating slope instability – Dep. of Mineral Resources Engineering, Univ. London.
- Medatlas Group. (2004). *Wind and Wave Atlas of the Mediterranean Sea*. Western European Union, 420p.
- Mitchell, T., Suarez, G. and Hogan P., (2010) - "Integrated Remote Sensing of Bathymetry and Onshore Topography for Asset Inspection, Hydrology Modelling and Hazard Assessment", *Remote Sensing and Hydrology. Proceedings and International Association of Hydrological Sciences Red Book*.
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water resources research*, 30(4), 1153-1171.
- Montebello, C. (2004). La gestione integrata e sostenibile delle zone costiere nel diritto internazionale. *Rivista di diritto dell' economia, dei trasporti e dell'ambiente*.
- Moser, M., & Hohensinn, F. (1983). Geotechnical aspects of soil slips in Alpine regions. *Engineering Geology*, 19(3), 185-211.
- Naylor LA, Stephenson WJ (2010). On the role of discontinuities in mediating shore platform erosion. *Geomorphology* 114:89–100. doi:10.1016/j.geomorph.2008.12.024
- Orrù P. & Ulzega A. 1986. Geomorfologia costiera e sottomarina della baia di Funtanamare (Sardegna sud-occidentale) - *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. Vol. 9, 59/67.
- Pappalardo M., Cappiotti L., Arozarena Llopiés I., Chelli A. & De Fabritiis L., 2017. Development of Shore Platforms along the NW Coast of Italy: The Role of Wind Waves. *Journal of Coastal Research: Volume 33, Issue 5: 1102-1112*.
- Paronuzzi P (2010). Flexural failure phenomena affecting continental Pleistocene deposits along coastal cliffs (Croatia). *Ital J Eng Geol Environ* 1:93–106. doi:10.4408/IJEGE.2010-01.0-07.
- Perez, J., Menendez, M. and Losada, I.J., (2017). GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Engineering*, 124, 1-11.
- Picone, M., (2009). *Analisi e ricostruzione delle serie storiche dei dati mareografici ed ondametrici dell'ISPRA. Tesi di Tirocinio di formazione e orientamento*. ISPRA.
- Pirazzoli, P.A., 1986. Marine notches. In: Van de Plassche, O. (Ed.), *Sea-level Research: A Manual for the Collection and Evaluation of Data*. Geo Books, Norwich, pp. 361–400.
- Pirazzoli P.A., Evelpidou N. 2013. Tidal notches: A sea-level indicator of uncertain archival trustworthiness. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 369 (2013) 377–384.
- Pope, R.M., Fry, E.S., 1997. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Appl. Opt.* 36 (33), 8710–8723.
- Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., Gokceoglu, C., Mohammadi, M., & Moradi, H. R. (2013). Application of weights-of-evidence and certainty factor models and their comparison in landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(7), 2351-2365.

- Rahardjo, H., Leong, E. C., & Rezaur, R. B. (2008). Effect of antecedent rainfall on pore-water pressure distribution characteristics in residual soil slopes under tropical rainfall. *Hydrological Processes*, 22(4), 506-523.
- Remondo, Juan, Jaime Bonachea, and Antonio Cendrero. "Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences." *Geomorphology* 94.3-4 (2008): 496-507.
- Rovere, A., Antonioli, F., Bianchi, C.N., 2015. Fixed biological indicator, *Handbook of Sea-Level Research* pp. 268 -280.
- Ružić, Igor, et al. "A stability assessment of coastal cliffs using digital imagery." *Acta Geotechnica Slovenica* 12.2 (2015): 25-35.
- Sallenger, A.H., Krabill, W., Brock, J., Swift, R., Manizade, S., Stockdon, H., (2002) - Sea-cliff erosion as a function of beach changes and extreme wave runup during the 1997–1998 El Niño. *Marine Geology* 187, 279–297.
- Salvini, R., et al. (2013). "Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domodossola–Iselle railway, the Italian Alps." *Geomorphology* 185 (2013): 110-122.
- Schoeller, H. "Sur les conditions de circulation dans les Calcaires: capacité d'ingestion, capacité d'infiltration." *Mémoires AIH, Congrès de Montpellier* (1974).
- Stopa, J.E., Ardhuin, F., Babanin, A. and Zieger, S., (2016). Comparison and validation of physical wave parameterizations in spectral wave models, *Ocean Model.*, 103, 2-17, 10.1016/j.ocemod.2015.09.003
- Sulis, A., & Annis A., "Morphological response of a sandy shoreline to a natural obstacle at Sa Mesa Longa Beach, Italy." *Coastal Engineering* 84 (2014): 10-22.
- Sunamura, T., 1977. A relationship between wave-induced cliff erosion and erosive force of waves. *J. Geol.* 85, 613–618.
- Sunamura, T., 1983. Processes of sea cliff and platform erosion. In: Komar, P.D. (Ed.), *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 233–265.
- Sunamura, T., (1992) - *The Geomorphology of Rocky Coasts*. Wiley, Chichester.
- Trenhaile, A. S. (2002). "Modeling the development of marine terraces on tectonically mobile rock coasts." *Marine Geology* 185.3-4: 341-361.
- Varnes D. J. (1978) - Slope movements types and processes. In: Schuster R L, Krizek R J (eds). *Landslides: Analysis and Control*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., Special Report, No. 176. pp. 11-33.
- Walkden, M.J.A., Hall, J.W., (2005) - A predictive Mesoscale model of the erosion and profile development of soft rock shores. *Coastal Engineering* 52, 535–563.
- Walkden, M. J., & Hall, J. W. (2011). A mesoscale predictive model of the evolution and management of a soft-rock coast. *Journal of Coastal Research*, 27(3), 529-543.
- Weisse, R., Bisling, P., Gaslikova, L., Geyer, B., Groll, N., Hortamani, M., Matthias, V., Maneke, M., Meinke, I., Meyer, E.M.I., Schwichtenberg, F., Stempinski, F., Wiese, F. and Wöckner-Kluwe K., (2015). Climate services for marine applications in Europe, *Earth Perspect.*, 2 (1), 10.1186/s40322-015-0029-0.
- White I.D., Mottershead D.N., Harrison J.J. *Environmental Systems* (2nd edition), Chapman & Hall, London (1996), p. 616.
- Wieczorek, G. (1987). in central Santa Cruz Mountains, California. Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation, 7, 93.
- Wilson, R. C., & Wieczorek, G. F. (1995). Rainfall thresholds for the initiation of debris flows at La Honda, California. *Environmental & Engineering Geoscience*, 1(1), 11-27.