

Projet de faisabilité technique et économique du parc éolien offshore flottant « Atis » de 864 MW dans la mer Ligure, au large des côtes de la Toscane

Rapport géologique



Signé numériquement par :
Laura Maria Conti
Date : 12/12/2024

16:38:

Révision

Auteur	Vérfié par	Société	Réviser	Approuvé par	Société
Vito Cucciniello	Eleonora Lamanna Corrado Pluchino	Montana S.p.A.	Loreta Bruni Valerio Labattaglia	Enrico Testa	Eni Plenitude S.p.A

Document préparé par

Montana S.p.A

Via Angelo Carlo Fumagalli 6, Milan (MI), 20143, Italie

✉ segreteria@montanambiente.com

Ramboll

Ramboll Deutschland GmbH

Jürgen-Töpfer-Straße 48

22763

Hambourg

Allemagne

✉ info@ramboll.de



Coordonnées de la société

Atis Floating Wind S.r.l

Numéro d'inscription au registre du commerce :

12645610960 Via Ripamonti 85, Milan (MI), 20141,

Italie

✉ Atisfloatingwind@legalmail.it

Contenu

1	Introduction	9
1.1	Objectifs du travail	9
1.2	Présentation du projet	9
1.2.1	Emplacement du parc éolien	9
1.2.2	Description des principaux composants.....	10
1.2.3	Caractéristiques de l'éolienne	12
1.2.4	Types de fondations	12
1.2.5	Conduit souterrain	15
1.3	Références législatives.....	17
2	Géologie	18
2.1	Cadre géologique onshore	18
2.1.1	Contexte géologique général	18
2.1.2	Aspects géologiques de la zone du projet onshore	22
2.2	Cadre géologique offshore.....	26
2.2.1	Contexte géologique général	26
2.2.2	Aspects géologiques de la zone du projet offshore	30
3	Géomorphologie.....	57
3.1	Aspects géomorphologiques de la zone du projet - onshore	57
3.2	Aspects géomorphologiques de la zone du projet - offshore	59
4	Hydrogéologie	62
5	Analyse des contraintes	66
5.1	Risques géomorphologiques	66
6	Risque sismique.....	69
6.1	Phénomènes de liquéfaction.....	70
7	Conclusions	73
8	Bibliographie	75

Liste des figures

Figure 1-1 : Localisation cartographique du parc éolien en projet.....	9
Figure 1-2 : Cadre géographique des travaux du projet « Atis »	11
Figure 1-3 : Type de semi-submersible à 3 colonnes, avec tour centrale.....	13
Figure 1-4 : Type de semi-submersible à 4 colonnes, avec base rectangulaire	13
Figure 1-5 : Représentation tridimensionnelle de l'éolienne et de la fondation flottante	14
Figure 1-6 : Schéma d'ensemble de la sous-station marine (FOSS) et de la fondation flottante	14
Figure 1-7 : Représentation schématique d'un TOC.....	15
Figure 1-8 : Tracé du conduit terrestre.....	16
Figure 2-1 : Carte des unités stratigraphiques et structurales de la région Toscane (source : Carte géologique de la Toscane).....	19
Figure 2-2 : Extrait de la carte géologique de la région Toscane.....	21
Figure 2-3 : Extrait de la carte géologique de la commune de Rosignano Marittimo à l'échelle 1:25 000 (modifiée).....	24
Figure 2-4 : Section 6 de la carte géologique de la commune de Rosignano Marittimo	24
Figure 2-5 : Extrait de la carte géologique de la commune de Castellina Marittima à l'échelle 1:10 000.....	25
Figure 2-6 : Carte des limites des plaques tectoniques (en noir) et des fronts de déformation orogénique (en gris) dans l'ouest de la Méditerranée, d'après Rollet et al (2002). Parc éolien Atis marqué d'un astérisque	26
Figure 2-7 : Extension maximale de la crise de salinité du Messinien. (source : Wikimedia Commons).....	27
Figure 2-8 : Les zones orange étaient des terres sèches pendant la dernière glaciation	28
Figure 2-9 : Localisation des lobes turbiditiques et des cumuls de contourite dans le bassin corse. (d'après Miramontes et al., 2016).....	29
Figure 2-10 : Caractéristiques physiographiques (source : Réseau européen d'observation et de données du milieu marin EMODnet).....	30
Figure 2-11 : Profil sismique M-10 (à gauche) issu du projet CROP de sismique profonde, montrant comment le contact collisionnel entre le bloc corse, à gauche, et la marge adriatique, à droite, a été modifié par le mouvement d'extension ; la position du profil est indiquée en jaune sur le plan du site (à droite) ; La ligne sismique traverse la partie sud du parc éolien (ligne rouge du profil). (modifié d'après Finetti 2003).	31
Figure 2-12 : Carte structurale de la mer Ligure, d'après Morelli et al (2022) ; plusieurs failles, ainsi qu'une partie du graben de Capraia, se trouvent dans la zone du projet ; il convient de noter que Gorgona a été erronément nommée « Capraia ».....	32
Figure 2-13 : Caractéristiques géologiques des fonds marins (source : EMODnet).....	33
Figure 2-14 : Les différents ensembles de données bathymétriques utilisés par EMODnet, représentés par des couleurs arbitraires. La couleur grise représente les ensembles de données GEBCO les plus anciens. (Source : EMODnet).	34
Figure 2-15 : Bathymétrie à l'Atis OWF. La qualité des données est très mauvaise dans la partie nord de la zone d'intérêt. (Source : EMODnet)	35
Figure 2-16 : Coupe transversale N-S le long de la zone d'intérêt. (Source : EMODnet).....	36
Figure 2-17 : Coupe transversale NW-SE le long de la zone d'intérêt (Source : EMODnet).....	36

Figure 2-18 : Pente en degrés dans la zone d'intérêt (AOI). Carte basée sur les données bathymétriques fournies par EMODnet37

Figure 2-19 : Carte bathymétrique du conduit sous-marin du projet Atis. (Source : EMODnet).....38

Figure 2-20 : Coupe transversale le long du tracé du câble pour le FOSS nord. (Source : EMODnet).....39

Figure 2-21 : Coupe transversale le long du tracé du câble pour la FOSS sud. (Source : EMODnet).....40

Figure 2-22 : Pente en degrés le long du tracé du câble. Carte basée sur les données bathymétriques fournies par EMODnet41

Figure 2-23 : Stations d'échantillonnage marines. (Source : Service géologique de la France et EMODnet).42

Figure 2-24 : Coupe sismique le long du talus entre le bassin corse et la plate-forme toscane (située dans la « Figure 2-14 » de la Figure 2-9 ; d'après Miramontes et al 2016).44

Figure 2-25 : Coupe sismique le long du talus entre le bassin corse et la plate-forme toscane (située dans la « Figure 2.2.9 » de la Figure 2.2.4 ; d'après Miramontes et al 2016).45

Figure 2-26 : Carte structurelle montrant les failles (en magenta) superposées aux failles provenant d'EMODnet (voir légende).47

Figure 2-27 : Carte montrant l'accélération maximale prévue (g) dans les roches en fonction de l'intensité et de la fréquence des séismes passés. Les séismes enregistrés sont également indiqués. Il convient de noter que les différents niveaux utilisent les mêmes icônes pour représenter différentes intensités. (Source : ISPRA).48

Figure 2-28 : Carte bathymétrique montrant les zones où des rochers peuvent être présents (polygones rouges). (Source : EMODnet).49

Figure 2-29 : Zones le long du tracé du câble où des rochers peuvent être présents. (Source : EMODnet).50

Figure 2-30 : Carte bathymétrique indiquant les zones où des glissements de terrain sont susceptibles de se produire (polygones rouges). (Source : EMODnet).51

Figure 2-31 : Carte montrant la susceptibilité aux glissements sous-marins. Les valeurs élevées de susceptibilité (rouge) indiquent une probabilité élevée de glissements. La carte indique la probabilité que des glissements se produisent au fil du temps dans cette partie du fond marin, mais elle ne mesure pas quand et à quelle fréquence un événement peut se produire, ni son ampleur possible. Modifié par EMODnet.....52

Figure 2-32 : Zones exposées au risque de glissements de terrain. (Source : EMODnet).53

Figure 2-33 : Carte indiquant la susceptibilité aux glissements de terrain sous-marins. Les valeurs élevées de susceptibilité (rouge) indiquent une probabilité élevée de glissements de terrain. La carte indique la probabilité que des glissements de terrain se produisent au fil du temps dans cette partie du fond marin, mais elle ne mesure pas quand et à quelle fréquence un événement peut se produire, ni son ampleur potentielle. Modifié par EMODnet54

Figure 2-34 : Objets artificiels et autres activités humaines dans la zone d'intérêt. Modifié par EMODnet.56

Figure 3-1 : Extrait de la carte géomorphologique de la commune de Rosignano Marittimo à l'échelle 1:25 000 (modifiée).58

Figure 3-2 : Extrait de la carte géomorphologique de la commune de Castellina Marittima à l'échelle 1:10 000.....59

Figure 3-3 : Carte géomorphologique de la zone du projet offshore (source : EMODnet)61

Figure 4-1 : Caractéristiques hydrogéologiques du district (source : Plan 2021/2027 du district des Apennins Septentrionale).63

Figure 4-2 : Complexes hydrogéologiques du district des Apennins septentrionaux (source : Plan 2021/2027 du district des Apennins septentrionaux).64

Figure 5-1 : Carte de la dangerosité géomorphologique de l'Autorité de bassin du district du nord.....67

Figure 5-2 Zones à risque géomorphologique dans la zone du conduit souterrain (Source : PAI « Dissesti Geomorfologici »)68

Figure 6-1 : Classification sismique de la région Toscane (à gauche) et carte de la dangerosité sismique (à gauche).70

Figure 6-2 : Distribution granulométrique71

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Caractéristiques dimensionnelles des éoliennes de 18 MW envisagées pour le projet12

Tableau 2.1 : Descriptions des matériaux pertinents dans la zone d'atterrage (à partir de la fiche n° 111).....43

Tableau 6.1 : Classification des zones sismiques69

Tableau 6.2 : Vérification de l'exclusion de la liquéfaction.....71

Abréviations et symboles

Abréviations	
AOI	Zone d'intérêt (Area of Interest)
AV	Inondations dans les vallées
Beta	Coefficient de réduction de l'accélération maximale attendue
CU	Coefficients d'utilisation
DET	Formations détritiques
DQ	Dépressions quaternaires
EC	Câble sous-marin (câble d'exportation)
EMODnet	Réseau européen d'observation et de données du milieu marin
FOSS	Sous-stations électriques flottantes (Floating offshore sub-stations)
FOWT	Éoliennes offshore flottantes (Floating offshore wind turbine)
GEBCO	Carte bathymétrique générale des océans
IAC	Câble inter-réseaux
LOC	Aquifères locaux
MaGIC	Risques géologiques marins le long des côtes italiennes
MBES	Sondeur multifaisceaux
NTA	Normes techniques d'application
NTC	Normes techniques pour les constructions
OC	Câble terrestre (Onshore Cable)
OSS	Sous-station électrique (Onshore sub-station)
PAI	Plan d'aménagement hydrogéologique
PG	Risque géomorphologique
POC	Point de connexion (Point of Connection)
PVR	Période de référence
RTN	Réseau national de transport d'électricité
SSS	Profilomètre sous-marin
SE	Sous-station électrique
SLC	État limite de rupture
SLD	État limite de dommage
SLE	État limite d'exploitation
SLO	État limite de fonctionnement
SLU	État limite ultime
SLV	État limite de sauvegarde
TC	Période de début du segment à vitesse constante du spectre
TJB	Baie de jonction (Transition Joint Bay)
TOC	Forage horizontal dirigé
TR	Période de retour

Abréviations	
USGS	United States Geological Survey
VN	Durée de vie nominale
WTG	Éolienne (Wind turbine generator)

Symboles	
ag	Accélération horizontale maximale attendue
Amax (m/s ²)	Accélération maximale
Fo	Facteur d'amplification
km	Kilomètres

Résumé

Le présent document constitue le rapport géologique préparé par Atis Floating Wind S.r.l. dans le cadre du développement du projet de parc éolien offshore flottant « Atis » situé dans la mer Ligure, à environ 55 km au large des côtes de la Toscane, dans la partie de la mer face à l'archipel toscan, dans la province de Livourne.

L'objectif principal est de fournir une analyse détaillée de la géologie et des caractéristiques géomorphologiques et sismiques de la zone concernée par le projet, tant onshore qu'offshore, à travers une étude bibliographique et cartographique.

Il est important de souligner que le présent document est basé sur les données bibliographiques actuellement disponibles au public ; il convient toutefois de noter que les enquêtes de terrain spécifiques au site ont également été menées à bien, dont les résultats sont présentés dans les rapports d'enquête réf. ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00 et ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00, réalisés afin d'obtenir une évaluation complète et détaillée tant pour la zone côtière que pour la zone offshore. En particulier, des études géophysiques et environnementales ont été menées afin de caractériser la morphologie des fonds marins, les caractéristiques sismostratigraphiques de la zone, les processus géologiques et la présence éventuelle de géo-risques (zones à risque géologique). Ces études ont notamment fait appel à un sondeur multifaisceaux (MBES), un sonar à balayage latéral (SSS), un profileur de fond marin (SBP), un spiker (SPK), un magnétomètre (MAG), des études avec ROV et des échantillonnages de sédiments et d'eau.

Des mesures d'atténuation appropriées devraient être adoptées lors de la planification et de la mise en œuvre du projet afin de gérer efficacement les risques identifiés.

Titre du document	Date	Auteur	Contrôlé par	Statut	
ATI-ING-VIA-RELGEO-R02-00	30/09/2024	Montana	Eni Plenitude	Final	Page8 sur 75 

1 Introduction

1.1 Objectifs du travail

Le projet en question concerne la construction d'un nouveau parc éolien offshore flottant, appelé « Atis », d'une capacité totale de 864 MW, situé à environ 55 km de la côte toscane. Les travaux de raccordement au réseau électrique national au point indiqué par TERNA concernent les communes de Rosignano Marittimo et Castellina Marittima, dans la province de Livourne, en Toscane.

La société promotrice est Atis Floating Wind S.r.l, dont le siège social est situé Via Ripamonti 85, Milan (MI). À cette fin, le présent document constitue le **rapport géologique** du projet.

1.2 Présentation du projet

1.2.1 Emplacement du parc éolien

Le projet « Atis » concerne la construction d'un parc éolien offshore flottant dans les eaux de la mer Ligure et, plus précisément, dans une zone cartographiée par les coordonnées barycentriques P0 (43° 19' 20.0394" N, 9° 37' 38.6429" E) dans le système de référence WGS84-UTM zone 32N (Figure 1-1). La zone du site d'installation présente une profondeur de fond comprise entre -250 et -630 m au-dessus du niveau de la mer et se trouve à une distance minimale d'environ 17 km de l'île de Gorgona, à 22 km de l'île de Capraia et à 55 km des côtes de la Toscane continentale, plus précisément de la localité de Calafuria, dans les eaux face à l'archipel toscan, dans la province de Livourne.

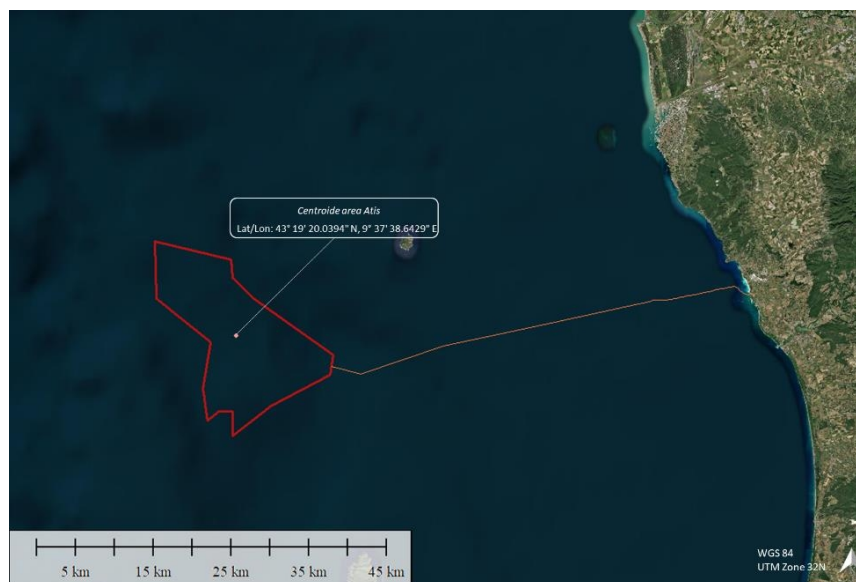


Figure 1-1 : Cartographie du parc éolien en projet.

Le projet, qui s'étend sur une superficie d'environ 264 km², prévoit l'installation de 48 éoliennes flottantes, d'une puissance de 18 MW chacune, pour une capacité totale de 864 MW. Les éoliennes seront reliées par une série de câbles sous-marins (IAC - Inter-array cable) à deux sous-stations électriques flottantes offshore (FOSS - Floating offshore sub-stations).

À partir des deux FOSS, quatre câbles (EC - Export cable), deux pour chaque sous-station, seront posés à partir des deux FOSS pour transporter l'électricité produite jusqu'à la zone d'accostage dans la commune de Rosignano Marittimo (à environ 1,6 km au nord du port de Vada) et la connexion à terre jusqu'à la sous-station électrique pour le raccordement au réseau national de transport d'électricité (RTN) selon les modalités prévues par TERNA (Figure 1-2).

Le projet a été développé en tenant compte des technologies émergentes de l'éolien offshore flottant, en incluant les détails essentiels et pertinents pour évaluer les impacts potentiels et vérifier la compatibilité environnementale. Pendant la phase d'exécution, la conception sera optimisée et tiendra compte de la disponibilité commerciale des éléments au moment de la construction.

1.2.2 Description des principaux composants

Plus précisément, les principaux composants du parc éolien en projet se divisent en :

- **Parc éolien offshore (OWF - Offshore Wind Farm)**
Il s'agit du système qui permet aux éoliennes situées en mer d'exploiter l'énergie cinétique du vent, de la convertir en énergie électrique et de la transporter vers la terre ferme. Il comprend :
 - 48 éoliennes flottantes offshore (FOWT - Floating offshore wind turbine), y compris les fondations flottantes ;
 - 2 sous-stations électriques marines flottantes (FOSS - Floating offshore sub-stations) ;
 - des câbles inter-réseaux (IAC), câbles sous-marins qui relient les turbines entre elles au sein du parc éolien, transportant l'énergie produite vers les sous-stations offshore ;
 - Câbles d'exportation (EC), câbles sous-marins qui transportent l'énergie des sous-stations offshore vers la côte.
- **Atterrage ou « landfall »**
Zone à l'interface onshore/offshore où les câbles offshore sont amenés à terre pour être connectés au conduit terrestre, qui comprend :
 - Baie de jonction (TJB – Transition Joint Bay), essentielle pour garantir la sécurité, la fiabilité et l'efficacité des connexions électriques entre les turbines et, de manière générale, tous les composants en mer et les sous-stations, c'est-à-dire les composants à terre.
- **Infrastructure onshore**
Partie de l'installation qui se développe sur la terre ferme, qui comprend les travaux de connexion au réseau électrique national :
 - Câble terrestre (OC – Onshore cable), qui relie l'installation de la baie de raccordement au point de connexion (POC – Point of connection), via la sous-station terrestre ;
 - n° 1 sous-station électrique (OSS – Onshore sub-station), qui représente le point de connexion entre le parc éolien offshore et le système de transmission électrique terrestre.

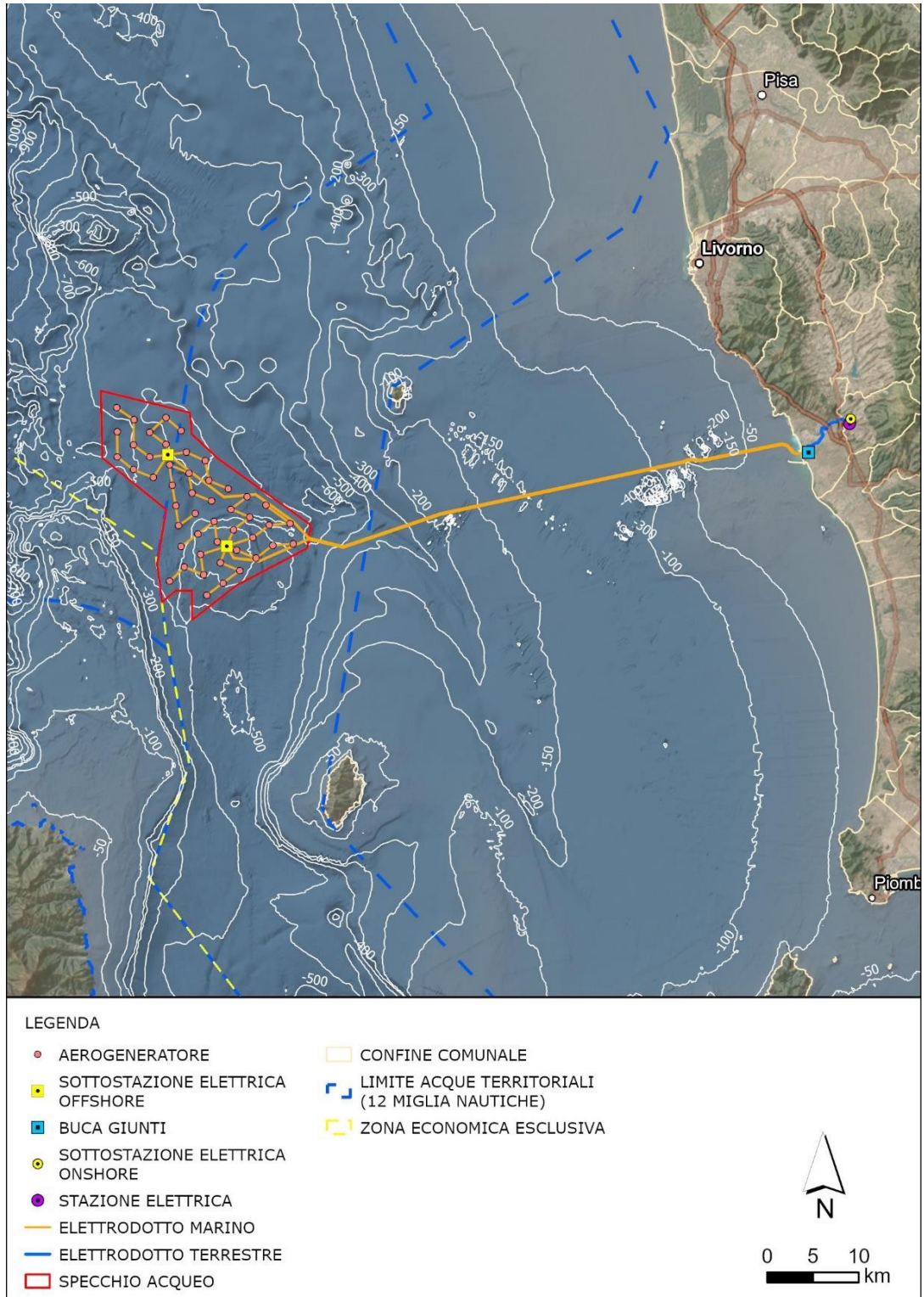


Figure 1-2 : Cadre géographique des travaux du projet « Atis ».

1.2.3 Caractéristiques de l'éolienne

Le projet prévoit l'installation d'éoliennes à trois pales à axe horizontal, d'une hauteur au moyeu de 155 m. Au sommet de la tour sera placée la nacelle, à laquelle est relié le rotor d'un diamètre de 250 m. La hauteur maximale totale du système tour-pales atteindra 280 m, en tenant compte de la pointe des pales.

Les principales caractéristiques dimensionnelles du type d'éoliennes actuellement envisagé pour le projet sont indiquées ci-dessous.

Tableau 1.1 : Caractéristiques dimensionnelles des éoliennes de 18 MW envisagées pour le projet

ÉOLIENNE DU PROJET		
Données de fonctionnement	Valeur	Unité de mesure
Puissance nominale	18	MW
Rotor		
Diamètre	250	m
Nombre de pales	3	-
Vitesse du rotor (nominale)	7,6	tr/min
Vitesse du rotor (minimale)	4,3	tr/min
Vitesse du rotor (maximale)	7,6	tr/min
Tour		
Type	Tubulaire	
Hauteur au moyeu	155	m
Pale		
Longueur	120	m
Caractéristiques globales		
Hauteur maximale	280	m
Poids (RNA : Rotor-Nacelle Assembly)	930	t

Au cours de la phase d'exécution, le choix de la marque et du modèle de l'éolienne sera effectué en tenant compte de l'évolution effective des machines disponibles au moment de la construction.

1.2.4 Types de fondations

Compte tenu de la profondeur des fonds marins sur le site, il a été décidé d'opter pour un système de fondations flottantes. Des structures flottantes semi-submersibles (floaters) en acier sont donc prévues. Le type de floater a été sélectionné à l'issue d'un processus d'évaluation basé sur un ensemble de critères technologiques spécifiques, combiné aux conditions particulières de la morphologie des fonds marins italiens. Ce concept repose sur :

- semi-submersibles en acier à 4 colonnes ou à 3 colonnes avec une tour centrale ;
- un système d'amarrage tendu ou semi-tendu.

Vous trouverez ci-dessous les représentations tridimensionnelles des types de fondations de l'éolienne et de la sous-station électrique marine flottante.

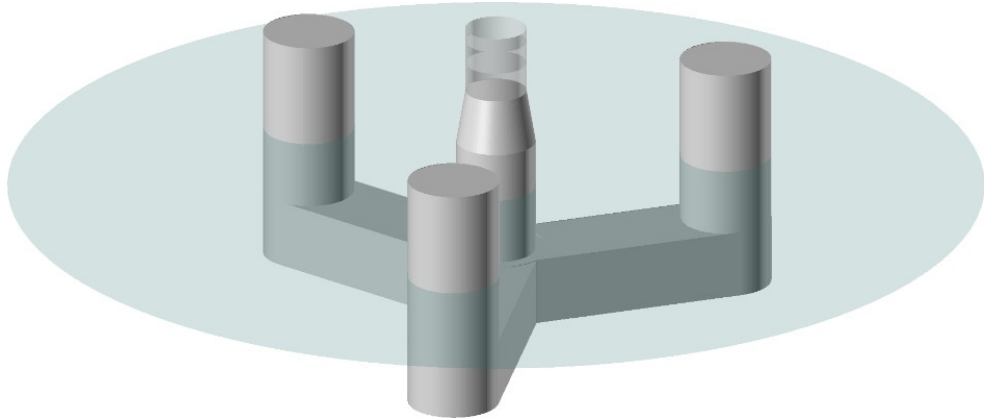


Figure 1-3 : Type de semi-submersible à 3 colonnes, avec tour centrale

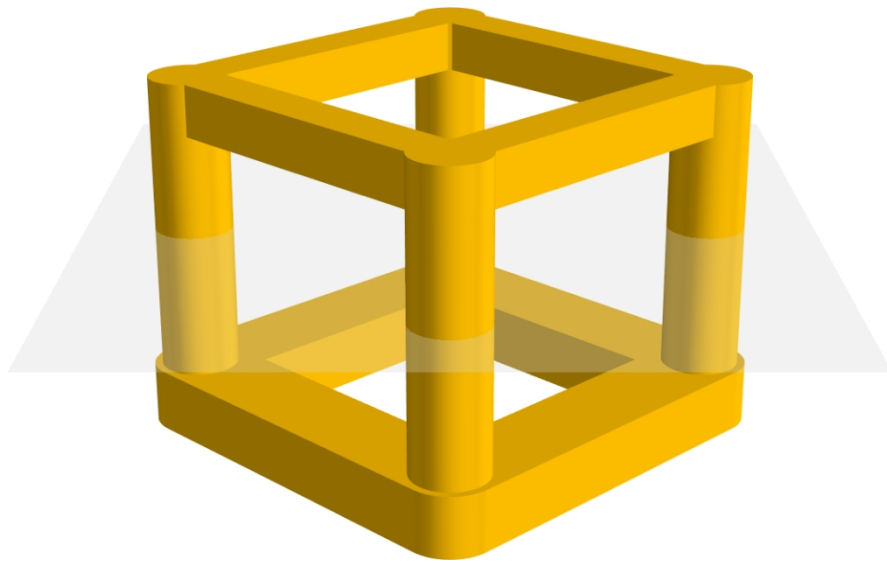


Figure 1-4 : Type de semi-submersible à 4 colonnes, avec base rectangulaire



Figure 1-5 : Représentation tridimensionnelle de l'éolienne et de la fondation flottante

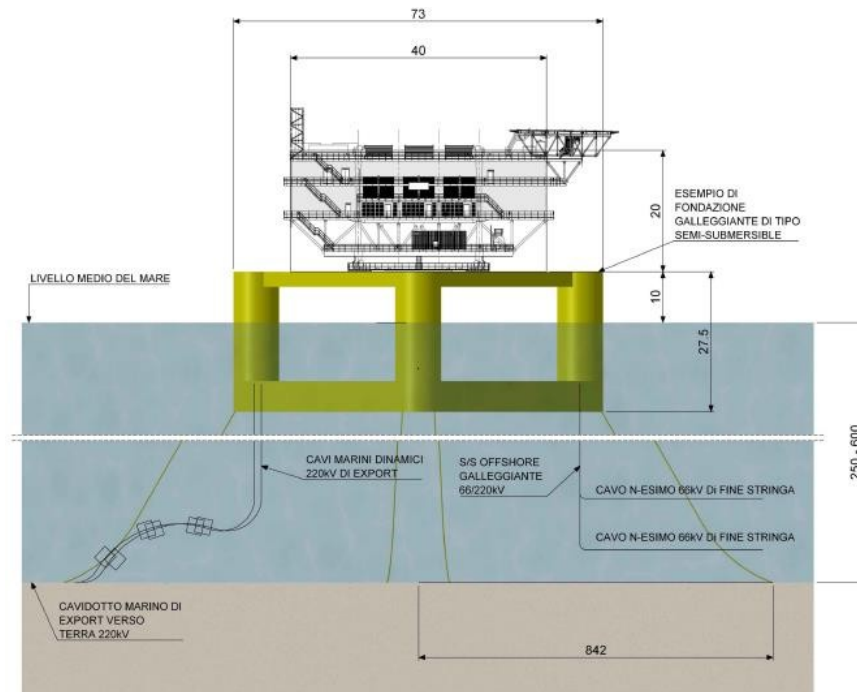


Figure 1-6 : Schéma d'ensemble de la sous-station marine (FOSS) et de la fondation flottante

1.2.5 Conduit terrestre

Le projet comprend un conduit terrestre enterré qui, partant du point d'atterrage dans la commune de Rosignano Marittimo (à environ 1,6 km au nord du port de Vada), suit le réseau routier existant et se connecte à la nouvelle station électrique « Suvereto-Piombino », dans la commune de Castellina Marittima (PI).

L'arrivée à terre des câbles d'exportation sera réalisée à l'aide de canalisations souterraines avec forage horizontal dirigé (FHD). La TOC est une technique de forage avec contrôle actif de la trajectoire, pour la pose d'infrastructures souterraines sans excavation, qui permet la pose de tuyaux flexibles sous les routes, les voies ferrées, les rivières, etc. en évitant toute interférence.

Plus précisément, le système de pose consistera à réaliser un trou souterrain qui servira de siège d'enfilage d'un tuyau-gaine en plastique ou en métal. Le trou dans le sous-sol sera réalisé à l'aide d'une fraise rotative placée à l'extrémité d'un train de tiges (Figure 1-7).

Avec cette technique, la trajectoire de la tête de forage est télécommandée depuis la surface, ce qui permet de réaliser des parcours prédéfinis qui atteignent l'objectif souhaité avec une tolérance de quelques centimètres. Une fois l'arrivée atteinte, la fraise sera déconnectée et remplacée par un alésoir avec la tête du tuyau à poser. L'alésoir élargira ensuite les dimensions du trou pilote afin de créer le siège de pose du nouveau tuyau qui y sera raccordé.

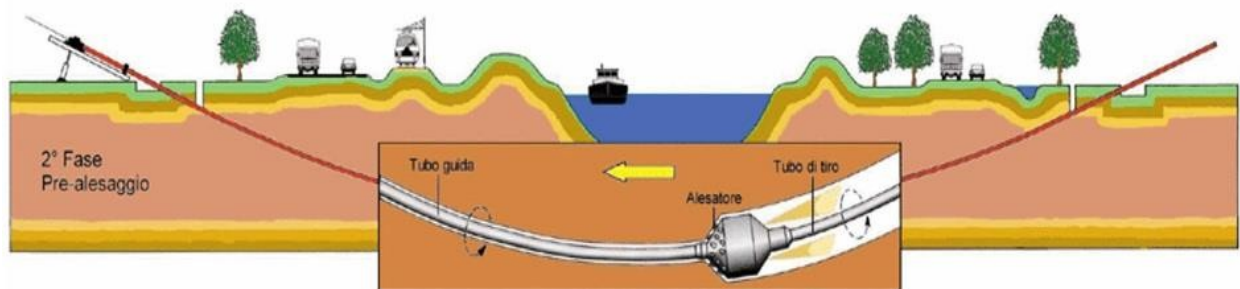
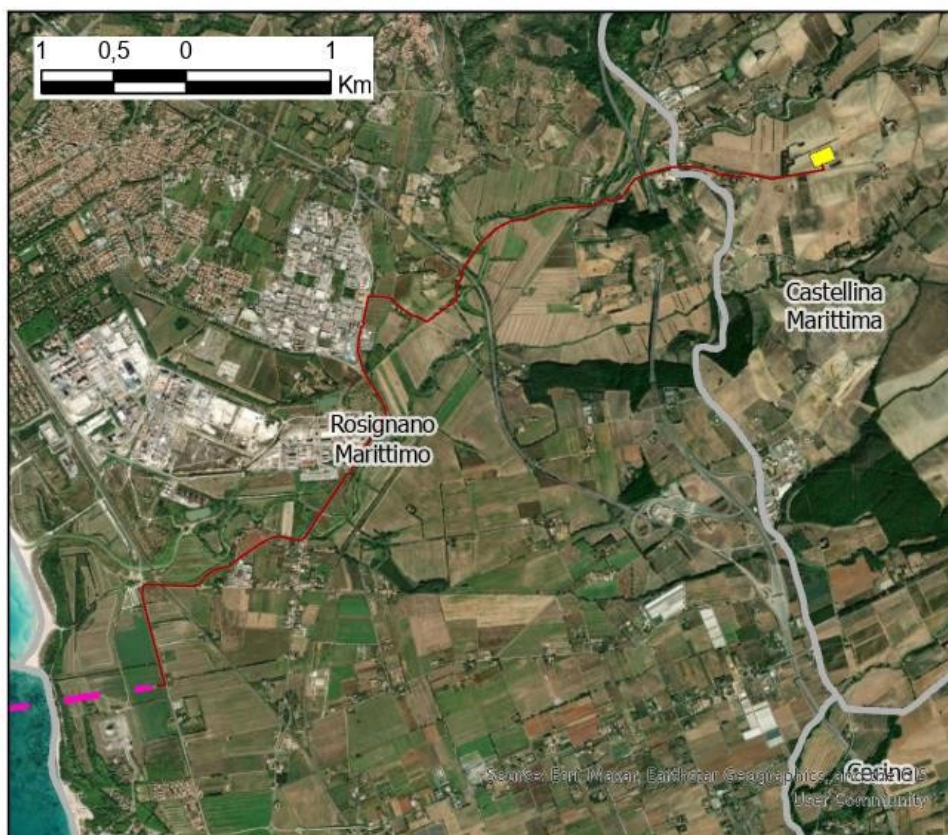


Figure 1-7 : Représentation schématique d'un TOC

À l'intérieur d'une structure souterraine appelée « fosse de jonction », la jonction entre les câbles d'exportation et la gaine terrestre aura lieu. Cette dernière permettra la connexion au RTN dans une sous-station électrique à construire sur le territoire communal de Castellina Marittima (Figure 1-8).

Le tracé de la gaine terrestre (environ 7,7 km) est prévu le long des principales artères routières publiques, dans la mesure du possible, et son installation sera réalisée à au moins 1 m de profondeur à l'aide de tranchées ouvertes ou en plaçant des conduits dans les tranchées et en les recouvrant.



Legenda

- - TOC
- Buca giunti (TJB - Transition Joint Bay)
- Cavidotto terrestre (OC - Onshore cable)
- Sottostazione elettrica onshore
- Limiti Comunali

Figure 1-8 : Tracé du conduit souterrain

Titre du document	Date	Auteur	Contrôlé par	Statut	Page16 sur 75
ATI-ING-VIA-RELGEO-R02-00	30/09/2024	Montana	Eni Plenitude	Final	

1.3 Références législatives

En ce qui concerne les principales références normatives auxquelles le présent document fait référence, voici une liste des principales, tant au niveau national que régional et local :

- Normes techniques pour la construction (NTC) DM 17/01/2018 ;
- Décret législatif n° 49 du 23/02/2010, transposant la directive 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation ;
- Décret législatif n° 152 du 3 avril 2006 « Normes en matière d'environnement » qui constitue un texte unique regroupant les normes en matière de protection de l'environnement et de gestion des déchets.

Titre du document	Date	Auteur	Contrôlé par	Statut	Page17 sur 75	
ATI-ING-VIA-RELGEO-R02-00	30/09/2024	Montana	Eni Plenitude	Final		

2 Géologie

2.1 Cadre géologique onshore

2.1.1 Contexte géologique général

Dans le contexte géologique régional, la zone maritime de la Toscane revêt une importance capitale, car elle représente une partie significative de la chaîne paléo-apennine. Cette chaîne de montagnes est née à l'Oligocène à la suite de la collision entre la marge européenne et la microplaque adriatique, un événement de grande ampleur qui a profondément marqué l'évolution géologique de la région.

Il est intéressant de noter que cette phase de formation montagneuse a été suivie d'une période d'effondrement post-collisionnel, qui a débuté à la fin du Miocène inférieur, entraînant un changement significatif dans le paysage géologique de la région.

Les dynamiques tectoniques qui ont façonné la structure actuelle de la Toscane maritime ont été complexes et ont impliqué à la fois des phases de compression et de détente. Cependant, c'est surtout la tectonique distensive post-collisionnelle, apparue au Néogène et au Quaternaire, qui a joué un rôle clé dans la morphologie actuelle de la région. Cette tectonique a généré des déformations qui ont conduit à l'effondrement et à la fragmentation du secteur, donnant naissance à une configuration géologique unique, caractérisée par une interaction complexe entre reliefs montagneux, dépressions et plaines.

Des études détaillées menées sur le territoire ont montré que les événements déformatifs liés à la tectonique distensive ont commencé à la fin du Miocène inférieur. Les formations géologiques les plus anciennes, qui constituent le substrat de la zone étudiée, émergent dans les zones vallonnées et sont représentées par les complexes allochtones ligures, comme le montre le schéma des unités stratigraphiques et structurelles de la figure 2-1 à la page suivante.

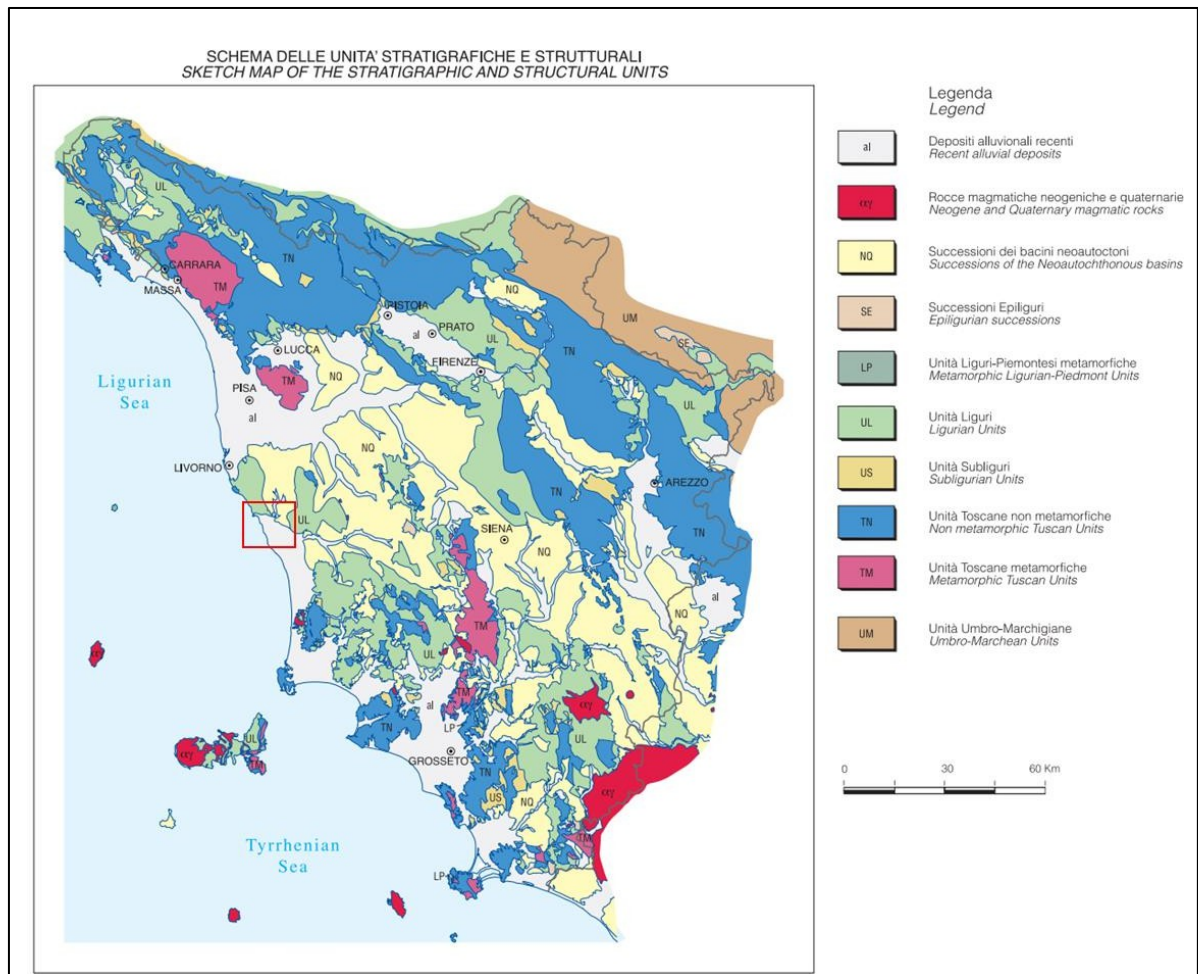


Figure 2-1 : Carte des unités stratigraphiques et structurales de la région Toscane (source : Carte géologique de la Toscane).

Ces complexes, principalement constitués de roches métamorphiques argilo-schisteuses datant du Jurassique supérieur et du Crétacé, sont intercalés par des masses de roches magmatiques basiques et ultrabasiques.

La superposition de ces complexes à travers des surfaces de glissement tectonique, comme le Complexe ligure supérieur, le Complexe ligure intermédiaire et le Complexe ligure inférieur, a contribué à définir la stratigraphie complexe de la région.

Le paysage actuel de la commune de Rosignano Marittimo est le résultat d'un long processus évolutif, lié à l'action combinée de phénomènes tectoniques et d'érosion.

Après la phase de compression qui a caractérisé la formation des structures classiques en couches de recouvrement, une phase de détente s'est ouverte à partir du Miocène supérieur. Cette phase a conduit à la formation de dépressions et de reliefs de type « Horst-Graben », définissant ainsi les caractéristiques morphologiques de la région.

En outre, il convient de souligner que l'évolution géologique de la Toscane maritime ne s'est pas produite de manière isolée, mais a été influencée par des processus qui ont touché toute la région sud-ouest de la Toscane.

Le substrat pré-néogène, recouvert d'une couverture clastique-terrigène qui s'étend du Tortonien supérieur au Pléistocène, représente un élément important de continuité géologique. Les alluvions des fleuves Cecina et Fine, ainsi que les sables côtiers, témoignent du rôle important joué par les processus sédimentaires dans le modelage du paysage actuel.

Enfin, l'ouverture du bassin tyrrhénien au Miocène supérieur a marqué une autre étape cruciale dans l'évolution géologique de la région. Cet événement a déclenché un régime tectonique extensif, qui a généré une série de graben tectoniques et d'horsts, contribuant ainsi à la formation des bassins sédimentaires caractéristiques de la région. La plaine côtière de Vada, située dans le bassin sédimentaire de Castiglioncello-San Vincenzo, est un exemple significatif de la manière dont les processus tectoniques ont influencé la morphologie du territoire.

La morphologie du toit des argiles du Pléistocène inférieur est caractérisée par des vallées d'érosion remplies par la suite de dépôts marins transgressifs, un aspect d'une importance fondamentale pour l'évaluation du risque sismique associé aux zones de faille. Il est important de noter qu'avant la transgression tyrrhénienne, on suppose l'existence d'un système de vallées bien creusées, ensuite ensevelies par les sédiments tyrrhénien-wurmien, qui ont contribué à la formation de la plaine actuelle. La carte géologique de la région Toscane présentée à la figure 2-2 montre que la zone étudiée est constituée de dépôts continentaux et côtiers pliocènes et quaternaires composés principalement de sable, de galets et de limon.

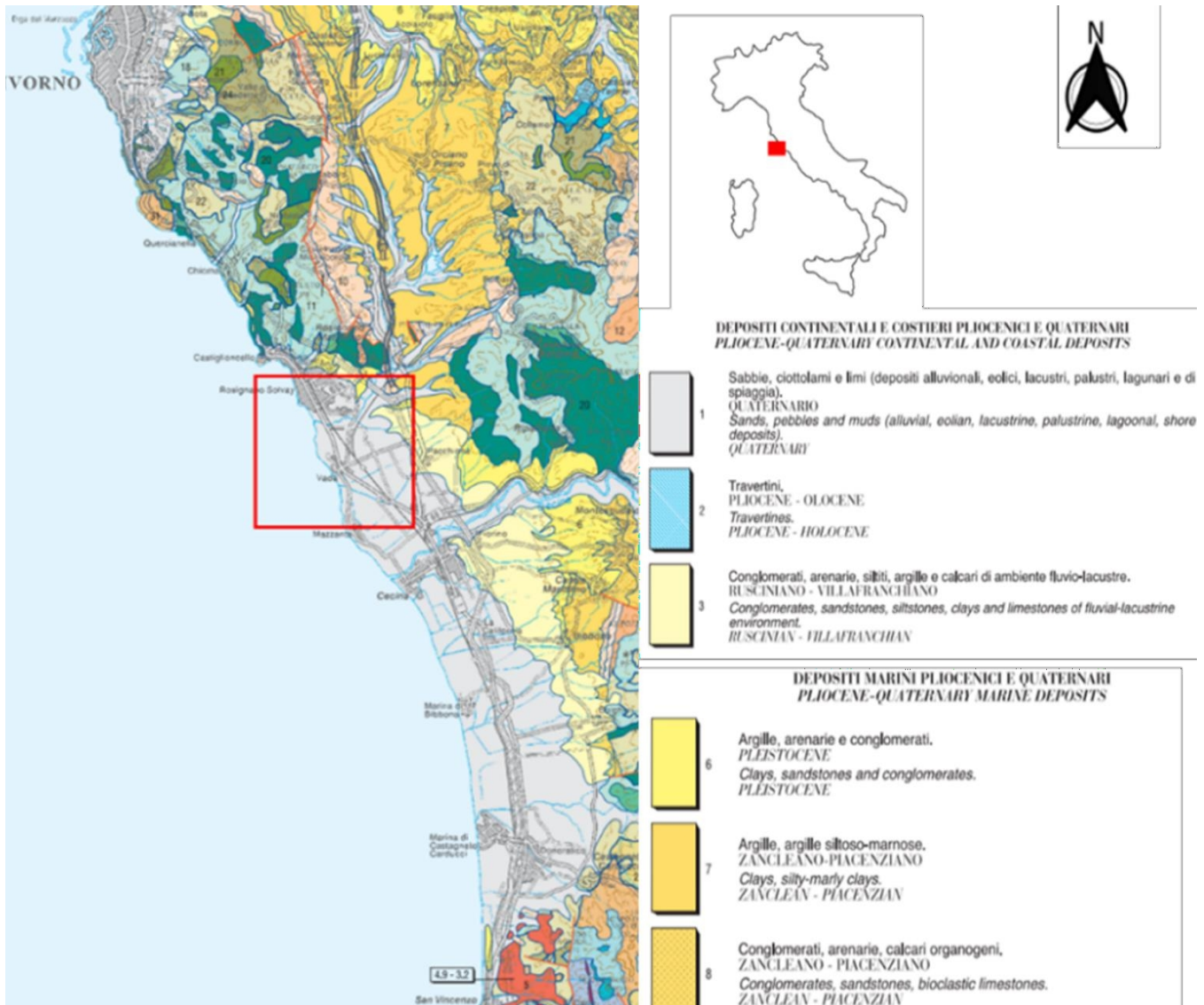


Figure 2-2 : Extrait de la carte géologique de la région Toscane.

2.1.2 Aspects géologiques de la zone du projet onshore

La zone étudiée est située le long de la côte toscane, entre les communes de Vada, Castellina Marittima et Rosignano Marittimo.

Du point de vue sédimentologique, on note la présence des « Sables rouges de Donoratico », caractérisés par une teinte rouge-orange et constituant un sol avec un noyau sableux immergé dans une matrice limoneuse-argileuse compacte, d'une épaisseur moyenne d'environ 2,50 mètres.

Ce type de sol, dépourvu de fossiles, est courant dans les plaines toscanes. Il se forme principalement par des processus sédimentaires continentaux, notamment par des épisodes éoliens et colluviaux survenus au Pléistocène supérieur.

En analysant la carte géologique de la commune de Rosignano Marittimo à l'échelle 1:25 000, représentée dans la figure 2-3, il apparaît que le projet, dans sa partie onshore, traversera la plaine alluviale du fleuve Fine. Plus précisément, on peut prévoir le franchissement de dépôts holocènes comprenant des plages, des dunes et des conglomérats sableux, ainsi que des sédiments marécageux, alluviaux et de comblement.

En se dirigeant vers l'intérieur des terres, le long de la première partie du tracé, l'électrode terrestre traverse principalement des dépôts alluviaux holocènes et la formation « q9 », représentée par les « Sables rouges de Donoratico », en particulier dans la phase finale du trajet, où l'installation de la station électrique terrestre est prévue.

Ces dépôts, principalement constitués de sables très fins, relèvent d'un contexte morpho-sédimentaire principalement éolien, avec une coloration orange qui provient probablement de la décomposition de dépôts rougis par des phénomènes pédologiques.

Les structures sédimentaires dans cette zone sont rares, tout comme la stratification, donnant ainsi lieu à des dépôts homogènes de nature continentale avec des faciès éoliens.

À proximité de la zone, la section géologique indiquée sur la carte géologique de la commune de Rosignano Marittimo (Figure 2-4) montre que, en allant de la mer vers l'intérieur des terres, on observe des sédiments sableux dunaires intercalés à des dépôts alluviaux près du fleuve Fine, qui se déposent principalement sur un substrat argileux connu sous le nom de « q2 », appartenant au Pléistocène inférieur.

Ces sédiments sont principalement sableux-argileux, avec des stratifications de conglomérats à éléments fins à la base et des intercalations occasionnelles de couches arénacées-calcaires dans la partie supérieure, souvent enrichies de macrofossiles. Par conséquent, en ce qui concerne le projet en question, la pose du câble se fera à une profondeur d'environ 1,9 mètre. Compte tenu de la composition lithologique de la zone, le câble traversera principalement les sédiments superficiels formés par des dépôts sableux et alluviaux.

En analysant la carte géologique de la commune de Castellina Marittima à l'échelle 1:10 000, représentée dans la figure 2-5, il apparaît que le projet, dans sa partie terrestre, traversera la plaine alluviale du fleuve Fine.

Plus précisément, en se dirigeant vers l'intérieur des terres, le long de la première partie du tracé, l'électrode terrestre traverse principalement des dépôts alluviaux holocènes du fond de la vallée (a). Dans la phase finale du trajet, où l'installation de la station électrique terrestre est prévue, elle traverse les Argilles Bleues (FAA) du Pléistocène inférieur-moyen. Ces dépôts sont constitués de sédiments fins, principalement argileux, caractérisés par une couleur bleu-gris.

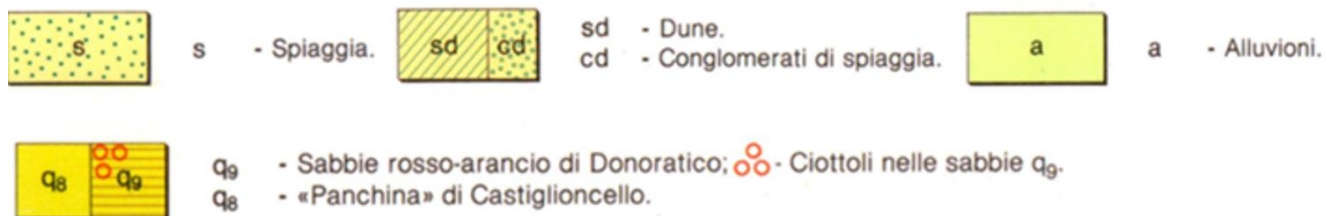
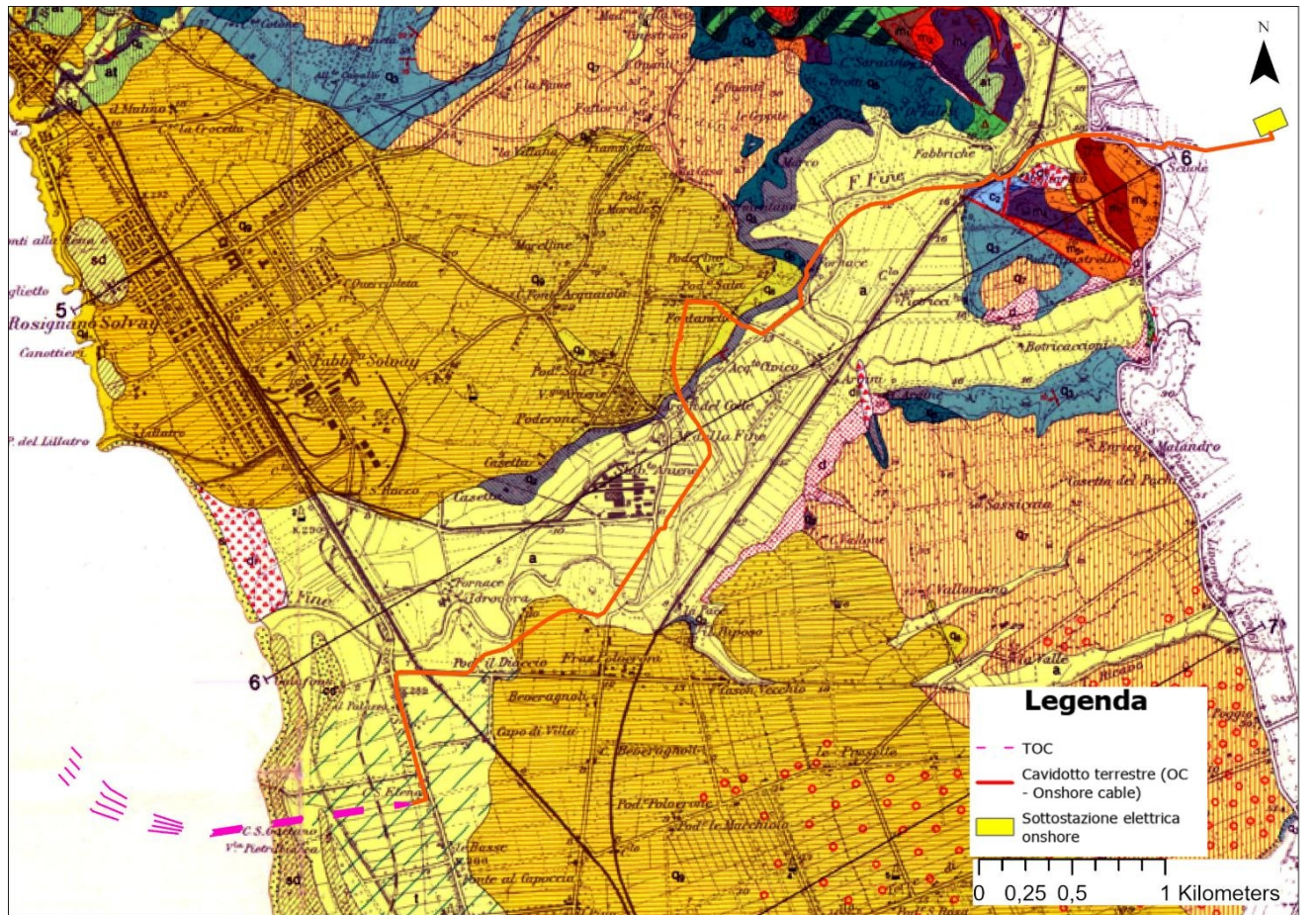


Figure 2-3 : Extrait de la carte géologique de la commune de Rosignano Marittimo à l'échelle 1:25 000 (modifiée).

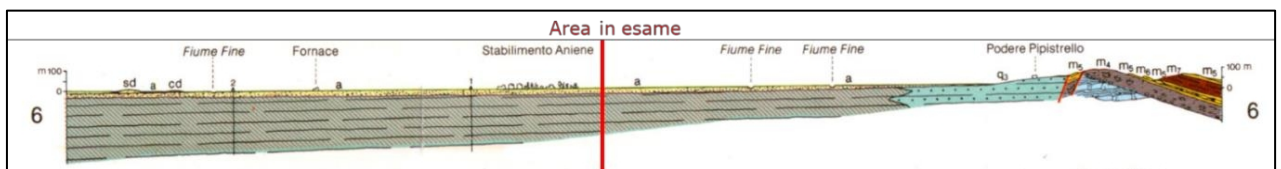


Figure 2-4 : Section c de la carte géologique de la commune de Rosignano Marittimo.

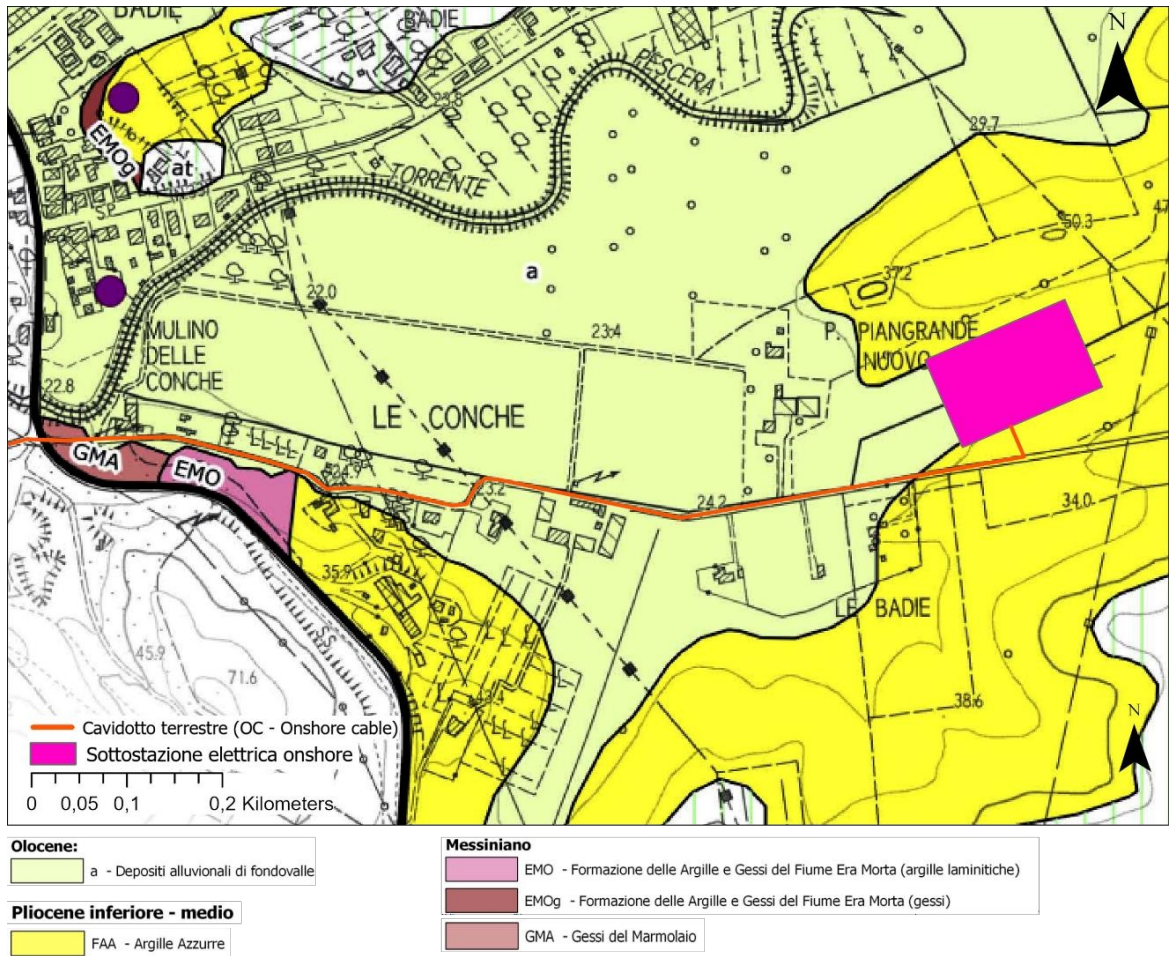


Figure 2-5 : Extrait de la carte géologique de la commune de Castellina Marittima à l'échelle 1:10 000.

2.2 Cadre géologique offshore

2.2.1 Contexte géologique général

En termes de géologie structurale à grande échelle, le territoire concerné par les travaux du projet se trouve sur la plaque tectonique européenne, qui comprend la Méditerranée orientale et une grande partie de l'Italie, et qui est délimitée à l'est et au sud par la plaque africaine (Figure 2-6).

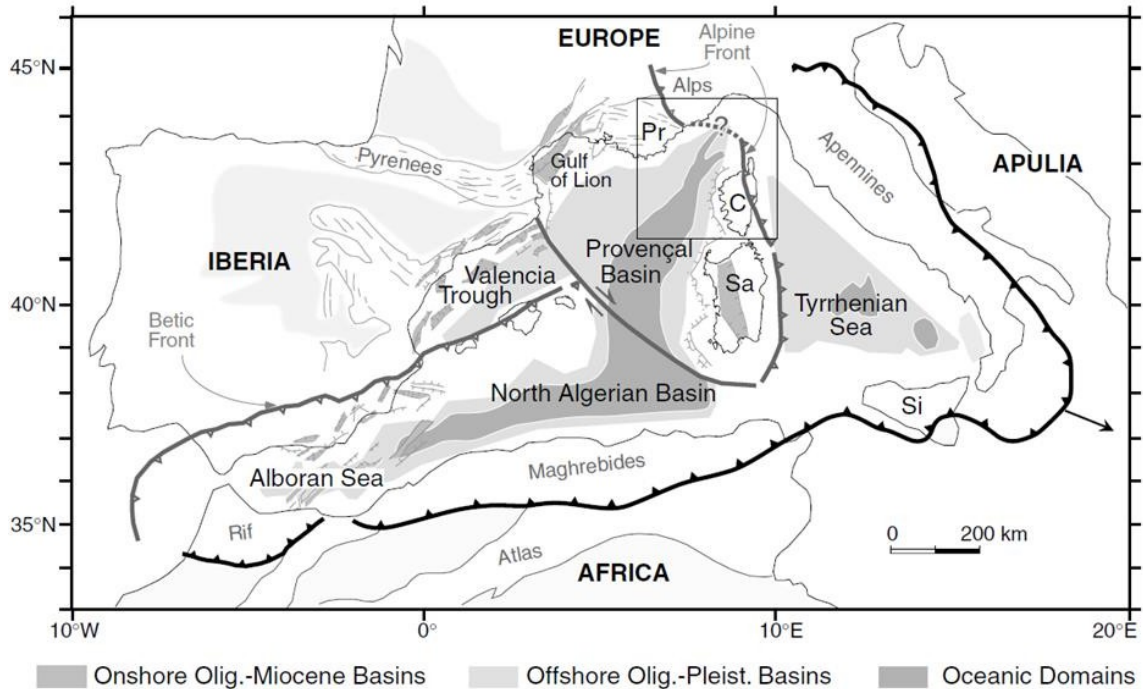


Figure 2-6 : Carte des limites des plaques tectoniques (en noir) et des fronts de déformation orogénique (en gris) en Méditerranée occidentale, d'après Rollet et al (2002). Le parc éolien Atis est indiqué par un astérisque.

La genèse de la mer Méditerranée est le résultat d'une interaction complexe de processus géodynamiques qui se sont succédé au cours de millions d'années.

Occupée à l'origine par l'océan Téthys au Crétacé supérieur, la Méditerranée a été façonnée par des phénomènes tels que la subduction, la collision et l'orogénèse, qui ont modelé le paysage et déterminé la formation de différentes structures géologiques.

Dans le détroit de Gibraltar, environ 70 000 m³ d'eau pénètrent chaque seconde dans la Méditerranée en raison du climat sec et chaud de la région qui provoque l'évaporation. Si ce flux s'arrêtait, le niveau de la mer en Méditerranée baisserait d'environ 1 mètre par an¹. Un phénomène similaire s'est produit lors de la crise de salinité du Messinien, voir figure 2-7, lorsque, au cours du Miocène supérieur, il y a environ 6,0 à 5,3 millions d'années (Ma), la Méditerranée a été séparée de l'océan Atlantique à Gibraltar en raison du soulèvement tectonique régional. Cela a entraîné une baisse massive du niveau de la mer et le dépôt de calcaires, de gypses et d'évaporites qui, dans la région de Crotona, se déposent à environ 2 km de profondeur sous le fond marin. Ces dépôts libèrent des gaz qui peuvent remonter vers le fond marin, provoquant la formation de volcans de boue (Cuffaro et al 2019).



Figure 2-7 : Extension maximale de la crise de salinité du Messinien. (source : Wikimedia Commons).

Les variations du niveau de la mer au Quaternaire ont été caractérisées par la glaciation weichselienne, ou Würm, dernier maximum glaciaire, au cours duquel le niveau mondial de la mer, et donc le niveau de la mer Méditerranée, était environ 110 à 120 m plus bas qu'aujourd'hui, comme le montre la figure 2-8.

¹https://en.wikipedia.org/wiki/Mediterranean_Sea#Oceanography

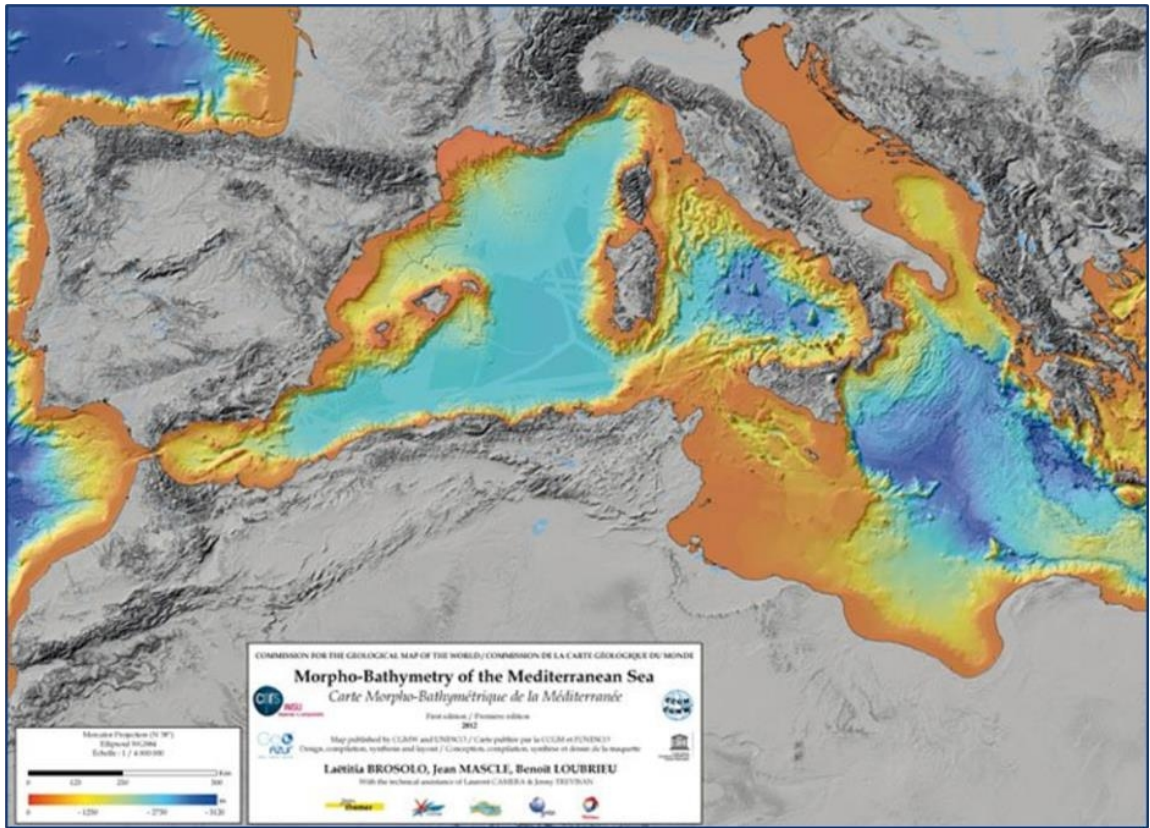


Figure 2-8 : Les zones orange étaient des terres sèches pendant la dernière glaciation

À ce jour, en Méditerranée occidentale, qui couvre une vaste zone comprenant l'Espagne, les îles Baléares, la Provence, la Ligurie, la Corse, la Sardaigne, l'Algérie et le Maroc, on distingue plusieurs bassins principaux. Parmi ceux-ci, le bassin d'Alboran, le bassin d'Alghero-Provence, le bassin sarde et le bassin ligure se sont formés entre la fin de l'Oligocène et le Burdigalien. Ces bassins sont le résultat de la rotation antihoraire du bloc sarde-corse et de l'orogénèse des chaînes montagneuses maghrébides et bétiques.

La mer Tyrrhénienne, située entre le bloc sarde-corse, l'Italie et la Sicile, s'est formée au Miocène supérieur. Elle est le résultat de l'orogénèse apennine et de l'océanisation, qui ont eu lieu il y a environ 3,1 à 1,8 million d'années. La région est caractérisée par la subduction de la mer Ionienne sous l'arc calabro-peloritan.

Dans le nord de la mer Tyrrhénienne, qui s'étend entre la Corse et l'Italie, la morphologie est influencée par la convergence des chaînes de montagnes alpines et apennines. La Corse elle-même est une île caractérisée par une lithosphère continentale amincie et complexe, avec une morphologie accidentée. Le long de la côte corse s'étend un vaste bassin sédimentaire, connu sous le nom de bassin corse, délimité par la dorsale de l'île d'Elbe.

Sur les pentes abruptes de ce bassin, on observe des traces de transport sous-marin de masse, sous forme de turbidites (Deptuck et al 2008), des flux gravitationnels descendant vers le fond du bassin, et de contourites, des flux induits par les thermohalines le long des côtés du bassin (Miramontes et al 2016), voir la figure 2-9. Les zones caractérisées par des turbidites sont divisées en zones, et la partie est du parc éolien est située dans la zone 7. Par conséquent, les parties les plus profondes du bassin peuvent présenter d'épaisses couches de turbidites, des matériaux proches de la côte transportés en eaux profondes par des glissements de terrain déclenchés par des tremblements de terre ou des tsunamis.

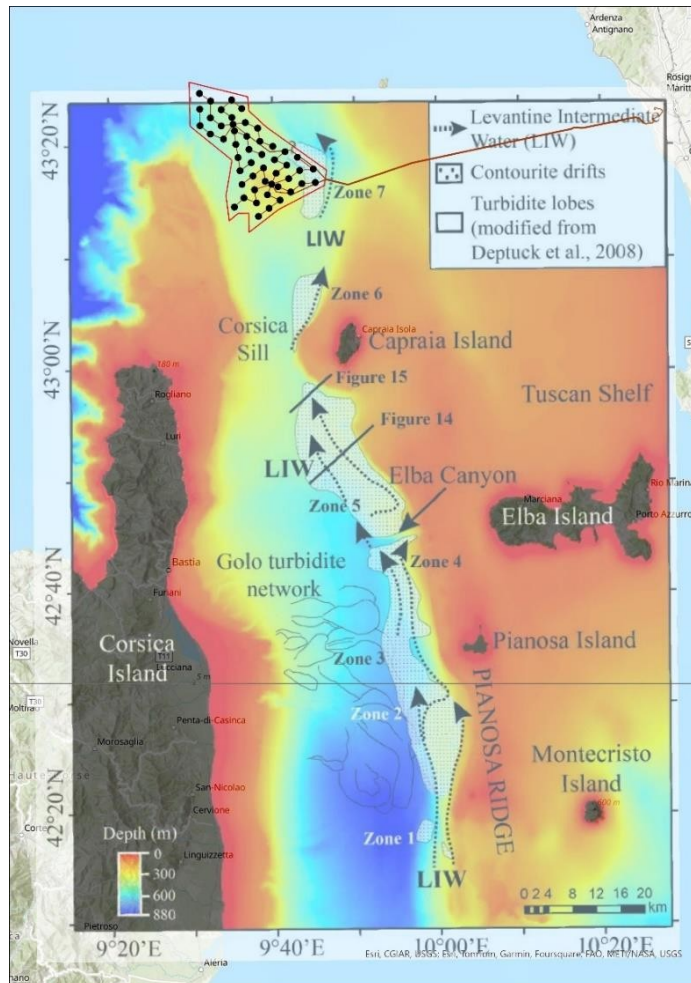


Figure 2-9 : Localisation des lobes turbiditiques et des cumuls de contourite dans le bassin corse. (d'après Miramontes et al., 2016).

Les unités géologiques du nord de la mer Tyrrhénienne présentent une déformation intense, avec des lamelles tectoniques superposées vers l'est. La séquence sédimentaire néo-autochtone reflète les différentes étapes de la tectonique distensive post-collisionnelle, avec des cycles sédimentaires miocènes, pliocènes et postérieurs. Dans l'ensemble, l'histoire tectonique de la mer Tyrrhénienne septentrionale s'inscrit dans le contexte des processus géodynamiques entre les plaques eurasienne et africaine, qui ont abouti à la création du système orogénique des Apennins et de la Corse alpine.

2.2.2 Aspects géologiques de la zone du projet offshore

Le projet Atis vise à exploiter les ressources éoliennes offshore grâce à l'installation d'un parc éolien composé de plusieurs éléments clés pour la production d'énergie durable.

Comme indiqué dans les chapitres précédents, les principales structures concernées comprennent des éoliennes montées sur des fondations flottantes, des sous-stations électriques offshore flottantes (OSS), des systèmes d'ancrage, des conduits de raccordement marins et des câbles inter-réseaux pour assurer une connexion efficace entre les turbines.

À cet égard, le site sélectionné pour la construction de ce parc éolien est situé dans une zone stratégique, à environ 17 km de l'île de Gorgona, 22 km de l'île de Capraia, environ 30 km au nord de la Corse et 55 km de la côte toscane.

Cette position est caractérisée par la présence du talus continental, une zone à gradient variable, de transition entre le plateau continental et les fonds océaniques, dont la profondeur atteint environ 630 m sous le niveau de la mer, comme le montre la figure 2-10.

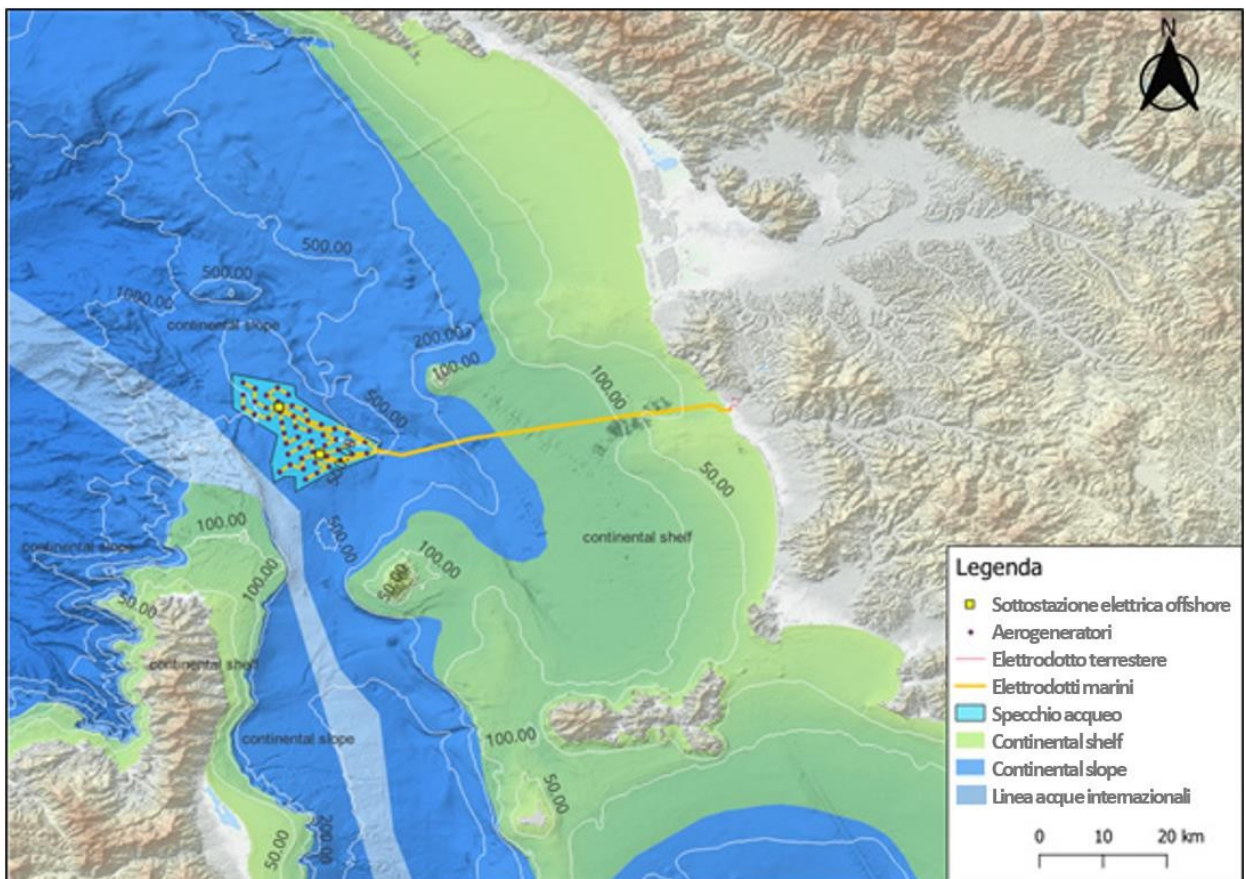


Figure 2-10 : Caractéristiques physiographiques (source : Réseau européen d'observation et de données du milieu marin EMODnet).

En ce qui concerne le débarquement ou « landfall », il est essentiel d'examiner attentivement les caractéristiques géologiques et géomorphologiques de la zone maritime concernée.

La zone du projet est située à proximité du front alpin, une zone de déformation orientée nord-sud qui traverse la partie nord-est de la Corse et se caractérise par de vastes failles à grande profondeur (figure 2-11).

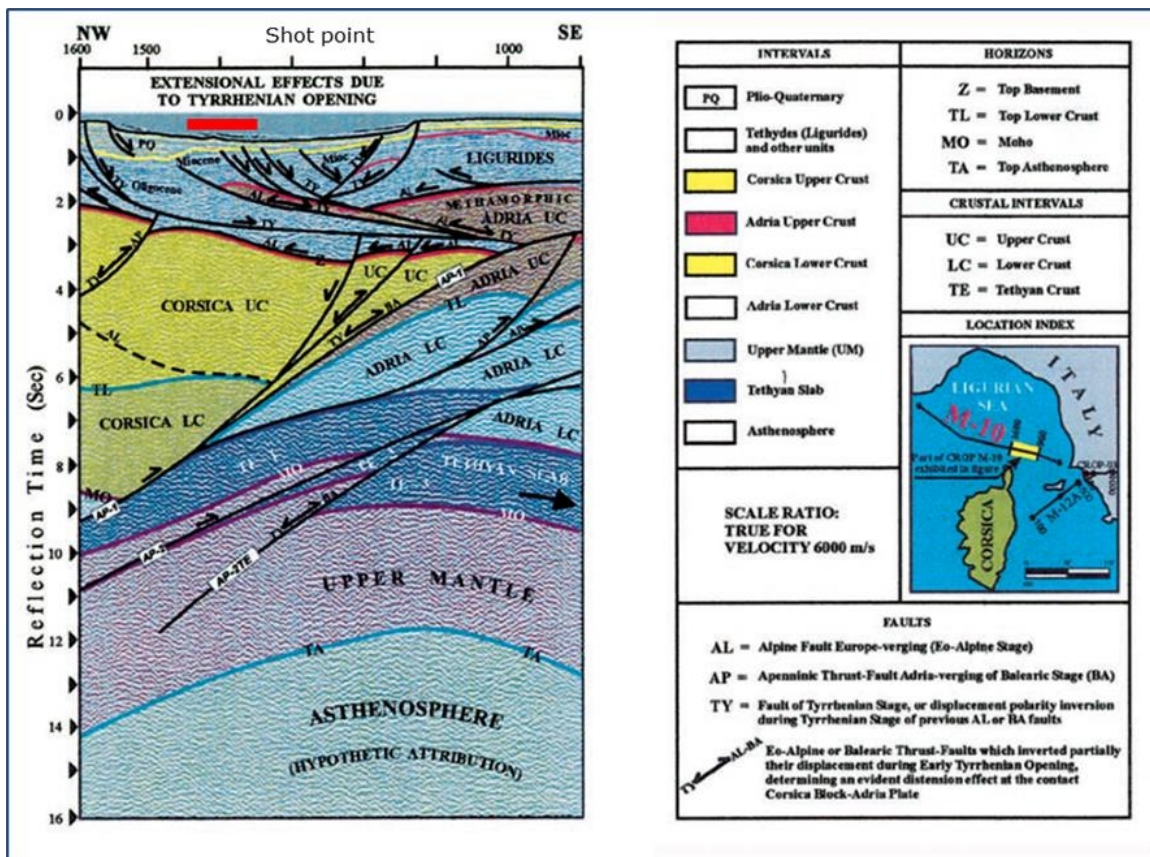


Figure 2-11 : Profil sismique M-10 (à gauche) issu du projet CROP de sismique profonde, montrant comment le contact collisionnel entre le bloc corse, à gauche, et la marge adriatique, à droite, a été modifié par le mouvement d'extension ; la position du profil est indiquée en jaune sur le plan du site (à droite) ; La ligne sismique traverse la partie sud du parc éolien (ligne rouge du profil). (modifié d'après Finetti 2003).

Les enregistrements sismiques indiquent (Morelli et al 2022) que les fonds marins de la mer Ligure sont composés d'épaisses séquences de sédiments du Miocène au Pléistocène, disposées en une série de bassins sédimentaires, qui ont été soumis à divers types de failles, voir figure 2-12.

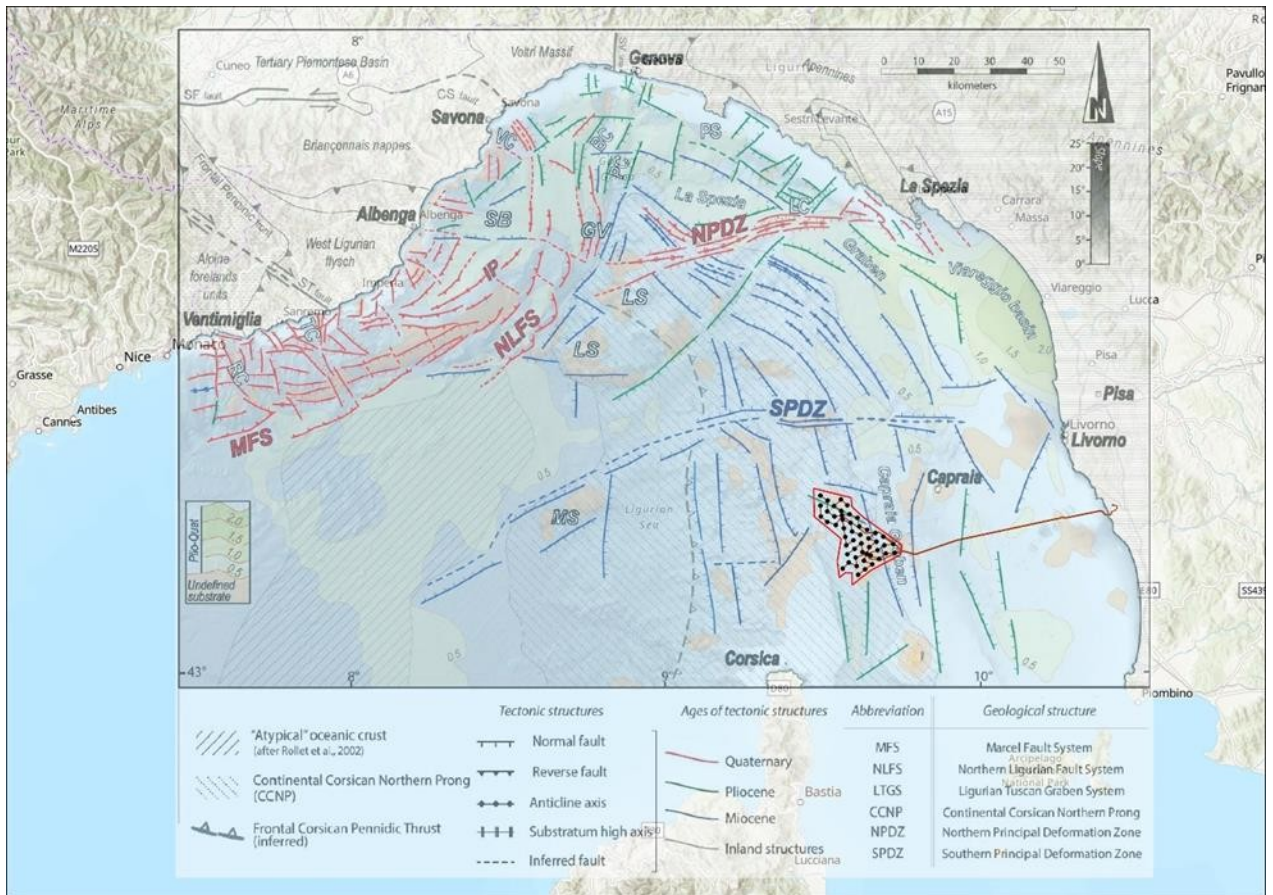


Figure 2-12 : Carte structurale de la mer Ligurie, d'après Morelli et al (2022) ; plusieurs failles, ainsi qu'une partie du graben de Capraia, se trouvent à l'intérieur de la zone du projet ; il convient de noter que Gorgona a été erronément nommée « Capraia ».

La zone du projet pourrait avoir été influencée par une activité volcanique importante de la couche volcanique de Capraia, dont seule la petite partie centrale se trouve aujourd'hui au-dessus du niveau de la mer, formant l'île de Capraia. Les principales phases éruptives ont eu lieu il y a 7,15, 4,65 et 1,63 million d'années (Ma) (Aldighieri et al 2004, Pensa et al 2019), entraînant la formation de couches de cendres, et peut-être de lave, à une certaine profondeur sous le fond marin.

Les données bathymétriques à haute résolution provenant des fonds marins autour de l'îlot du Scoglio d'Africa, suffisamment grand pour accueillir un phare et situé à environ 100 km au sud-sud-est de la zone du projet, montrent quelques volcans de boue et de nombreux signes de cratères sur les fonds marins (Spatola et al 2022). Les volcans de boue et les cratères sont la preuve de l'existence de lieux où des gaz et des fluides s'échappent des couches du fond marin.

Le terme « boue » n'est pas défini plus en détail dans les données, mais il est considéré dans le présent rapport comme synonyme de sédiment à grains fins, dominé par l'argile ou le limon, pouvant contenir une certaine quantité de matière organique et dont le durcissement ou la rigidité ne sont pas précisés.

L'extrait cartographique présenté à la figure 2-13 montre que la zone offshore présente une variété de sédiments datant de différentes époques géologiques. Alors que le Tortonien quaternaire prédomine dans la zone maritime, les sédiments pliocènes caractérisent la partie concernée par les électrodes marines, suivis, en se dirigeant vers la côte, par des dépôts pléistocènes.

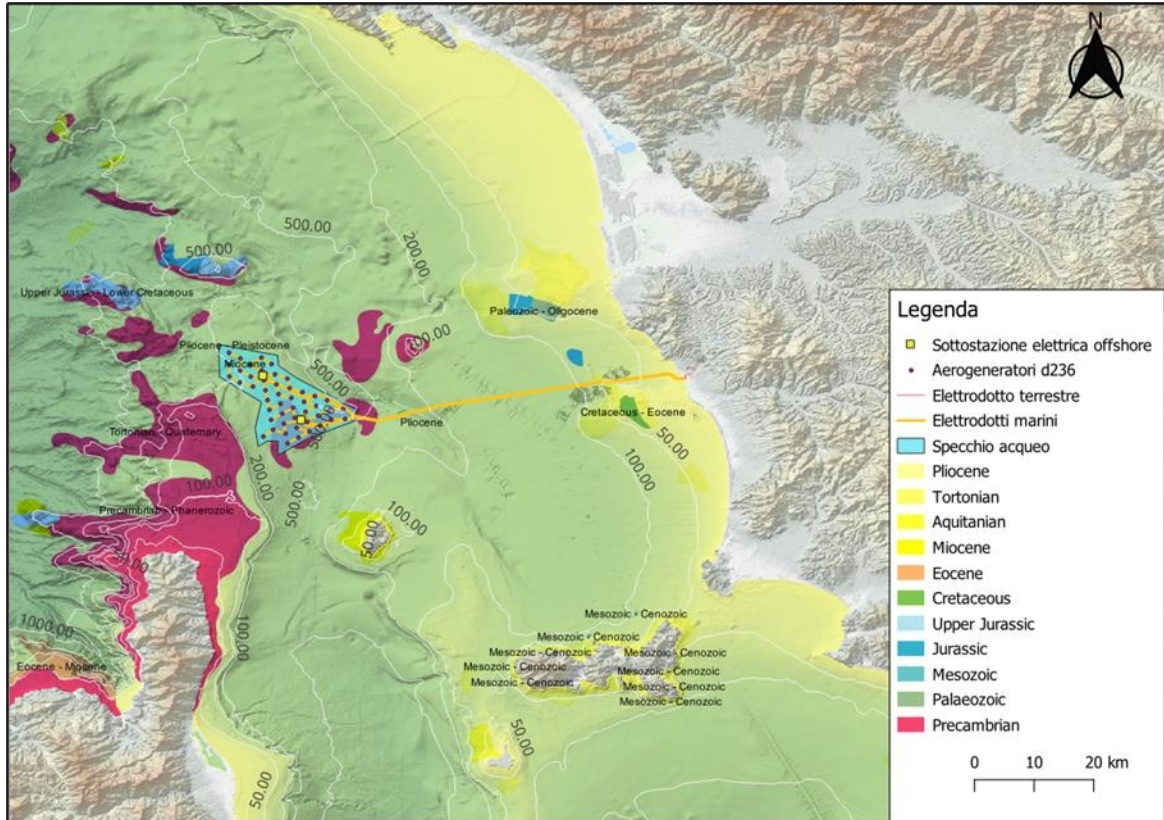


Figure 2-13 : Caractéristiques géologiques des fonds marins (source : EMODnet).

La zone se caractérise donc par la présence de roches sédimentaires dans la partie du plan d'eau concernée par le projet, de matériaux sédimentaires le long du tronçon concerné par les électrodes marines et de sédiments principalement sableux près de la côte.

2.2.2.1 Bathymétrie

Vous trouverez ci-dessous une étude réalisée sur les données bathymétriques disponibles pour les zones du projet concernées par la présence du plan d'eau du parc éolien et le tracé du câble sous-marin.

Les données bathymétriques ont été extrapolées à partir des sources disponibles (EMODnet) et un modèle a été créé. L'ensemble de données EMODnet est lui-même composé de plusieurs ensembles de données qui ont été divisés pour le modèle en une grille de 115 x 115 m (1/16 minute d'arc), voir figure 2-14. Les ensembles de données GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) les plus anciens utilisés par EMODnet sont de 355 x 355 m (zones grises dans la figure 2-14). Une taille de cellule de 115 x 115 m ou plus n'offre pas une résolution suffisante pour caractériser les détails du fond marin, limitant la description du fond marin à des caractéristiques à plus grande échelle. La partie nord de la zone d'intérêt, en particulier, a une résolution inférieure à celle de la zone environnante.

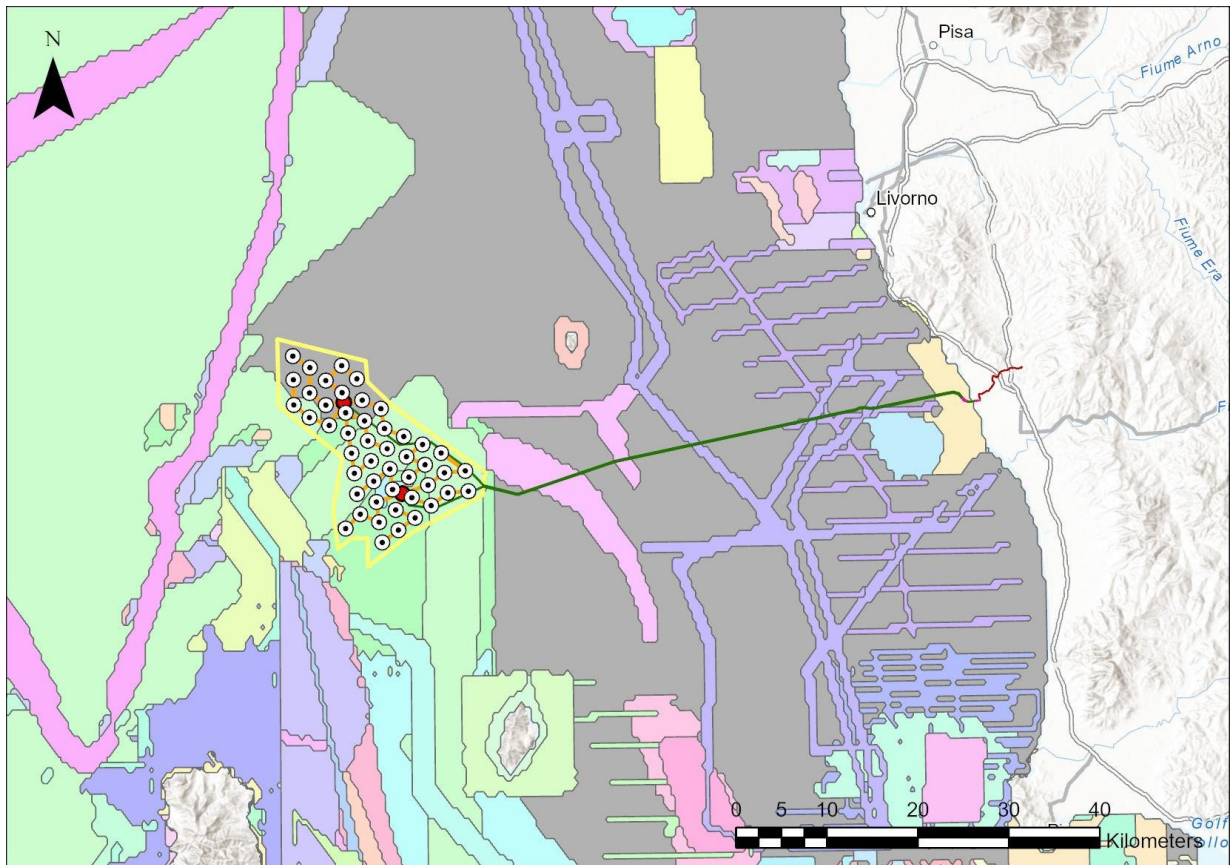


Figure 2-14 : Les différents ensembles de données bathymétriques utilisés par EMODnet, représentés par des couleurs arbitraires. La couleur grise représente les ensembles de données GEBCO les plus anciens. (Source : EMODnet).

Le parc éolien est situé à une profondeur comprise entre 250 et 630 m (figure 2-15). Les parties les plus profondes se trouvent au nord et au nord-ouest. Au sud, la zone aquatique englobe en partie une plate-forme élevée avec des pentes abruptes vers le nord et l'ouest.

Depuis le bord nord-ouest du plateau, on peut observer un canyon ou une vallée qui se termine près de la sous-station offshore nord (OSS). Au nord-est, juste à l'extérieur de la zone d'intérêt, se trouve un bord escarpé qui semble faire partie d'un canyon.

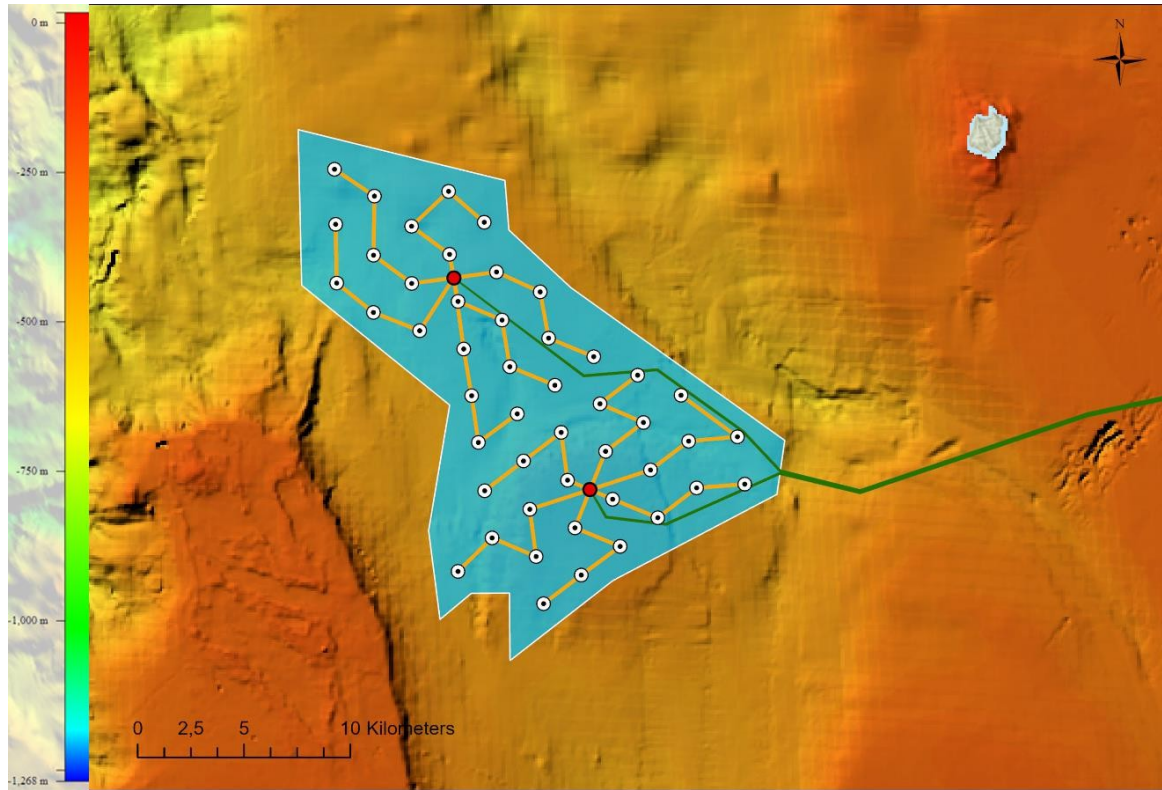


Figure 2-15 : Bathymétrie à l'Atis OWF. La qualité des données est très mauvaise dans la partie nord de la zone d'intérêt. (Source : EMODnet).

Une section N-S le long de la zone d'intérêt du plan d'eau montre une tendance générale à l'affaissement du nord et du sud vers la partie centrale du profil, voir figure 2-16. La bathymétrie le long de la section varie de 350 m à 465 m. Les pentes dans les parties les plus raides atteignent 13° et la tendance générale est de 1 à 2°.

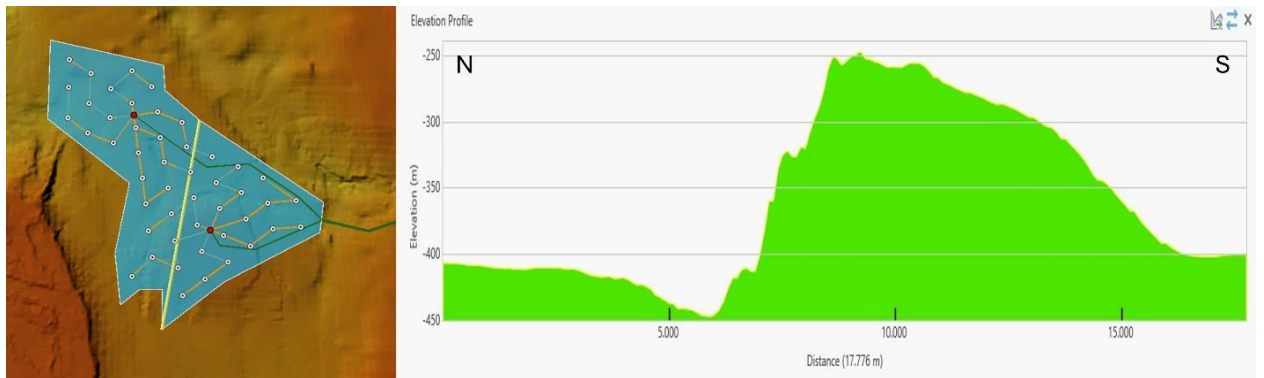


Figure 2-16 : Section transversale N-S le long de la zone d'intérêt. (Source : EMODnet).

Une coupe transversale NO-SE montre une tendance générale à la pente vers le NO, voir figure 2-17. Le long de ce profil, l'augmentation de la profondeur apparaît par paliers, avec des zones plus plates au milieu. Vers le SE, on observe la zone la moins profonde, c'est-à-dire le haut ou la plate-forme. La profondeur le long du profil varie entre 262 et 574 m.

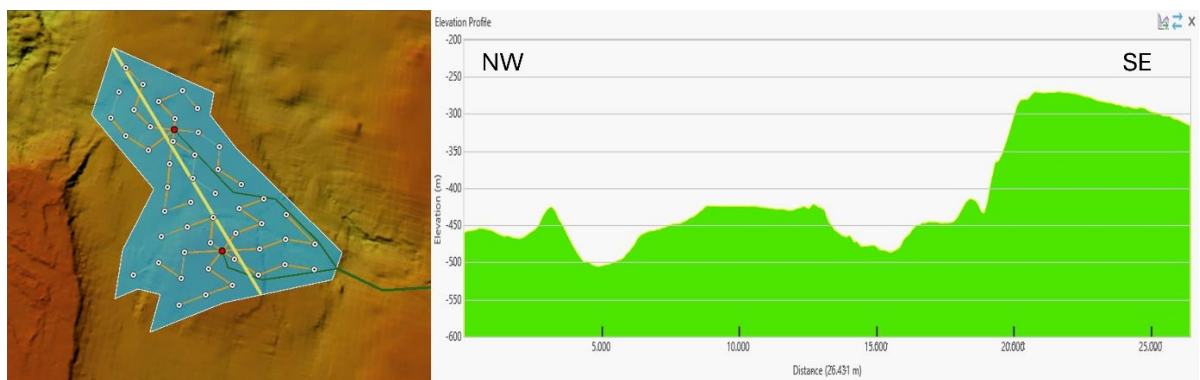


Figure 2-17 : Coupe transversale NW-SE le long de la zone d'intérêt (Source : EMODnet).

La figure 2-18 montre une carte du gradient de pente dans la zone d'étude basée sur les données bathymétriques d'EMODnet. La pente est généralement inférieure à 2°. La carte est limitée par la résolution des données bathymétriques et ne montre donc que les gradients résolus par l'ensemble de données. Il y a un canyon dans la partie centrale près de l'OSS nord avec des pentes pouvant atteindre 13° et dans la partie supérieure, il devient plus raide avec des pentes pouvant atteindre 20°. Le Haut vers le sud présente des pentes pouvant atteindre 16° le long des bords du Haut.

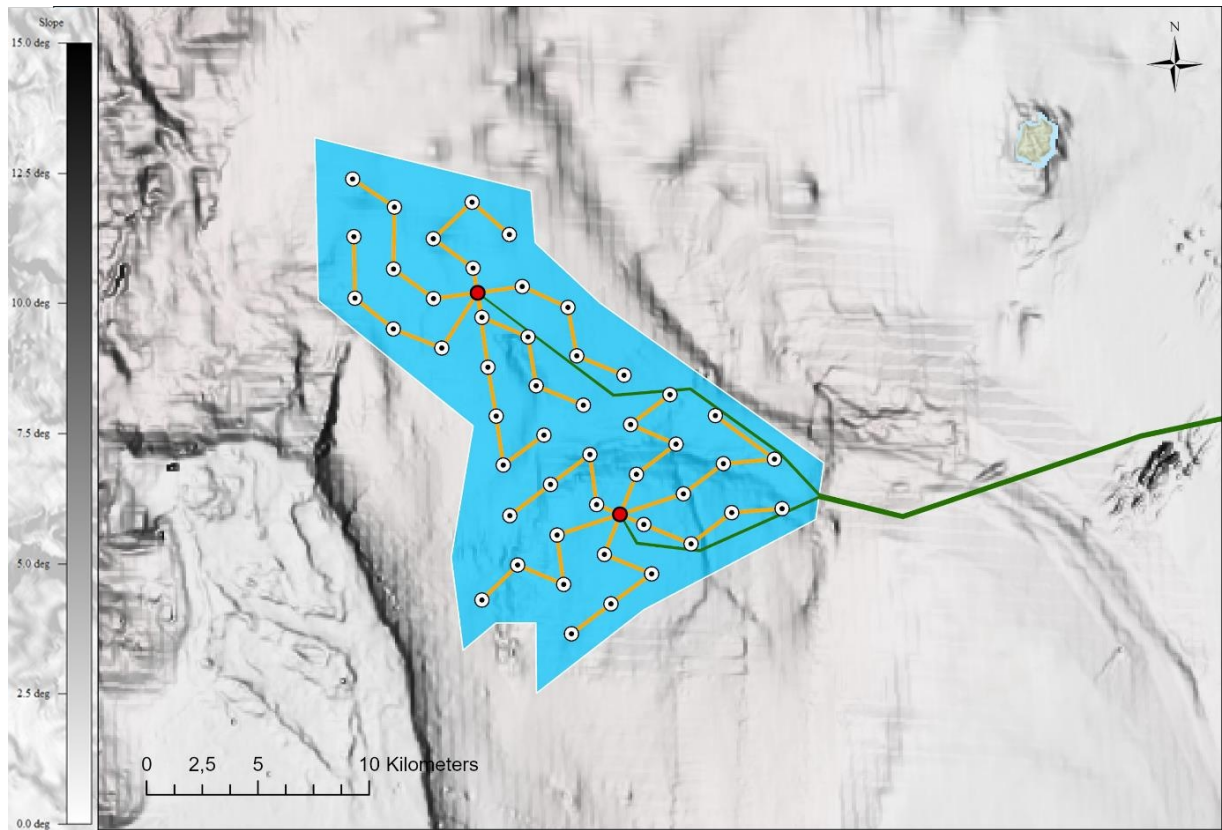


Figure 2-18 : Pente en degrés dans la zone d'intérêt (AOI). Carte basée sur les données bathymétriques fournies par EMODnet.

En ce qui concerne le tracé du conduit sous-marin, étant donné que les deux tracés des câbles d'exportation se rejoignent juste à l'extérieur de la zone maritime, ils seront décrits ensemble car ils partagent le même profil bathymétrique, voir figure 2-19.

La FOSS nord se trouve à 435 m de profondeur, où le tracé du câble traverse le bord du canyon central dans la zone d'intérêt avant de se diriger vers le sud-est, où il rejoint la limite de celle-ci et la suit vers le sud-est, où il rejoint l'autre tracé du câble. Dans cette zone, la profondeur de l'eau est comprise entre 400 et 545 m (figure 2-20).

La FOSS sud se trouve au sud, à 268 m de profondeur. Le tracé s'étend vers le sud-est, où il bifurque vers l'est-sud-est et rejoint l'autre tracé ; dans cette section, il descend de 268 à 451 m, puis remonte à 389 m, où les deux téléphériques se rejoignent (Figure 2-21).

La bibliographie consultée indique que le tracé des câbles désormais réunis traverse un canyon à 355 m de profondeur avant de remonter à 200 m sur une distance de 4 km avec une pente pouvant atteindre 3,5°, voir Figure 2-22. À partir de là, le tracé du câble monte en pente douce vers le débarcadère. Il convient toutefois de noter que les études de terrain spécifiques au site montrent que le canyon traversé est peu prononcé, avec un dénivelé de 20 à 25 m.

Les pentes les plus importantes que le câble doit franchir sont celles de la structure supérieure jusqu'à la jonction du câble de la FOSS nord. Pour une analyse plus détaillée, veuillez vous référer aux rapports d'étude réf. ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00.

Le long du tracé, on peut observer quelques petites vallées et une gorge très profonde (Figure 2-20 et Figure 2-21), mais on estime qu'il s'agit d'ouvrages réticulés, même s'il est possible qu'il y ait au maximum un relief artificiel à l'est/près de la côte. Les résultats des études de terrain spécifiques au site n'ont pas révélé la présence de petites vallées et d'une gorge profonde. Pour plus de détails, veuillez vous référer aux documents ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00.

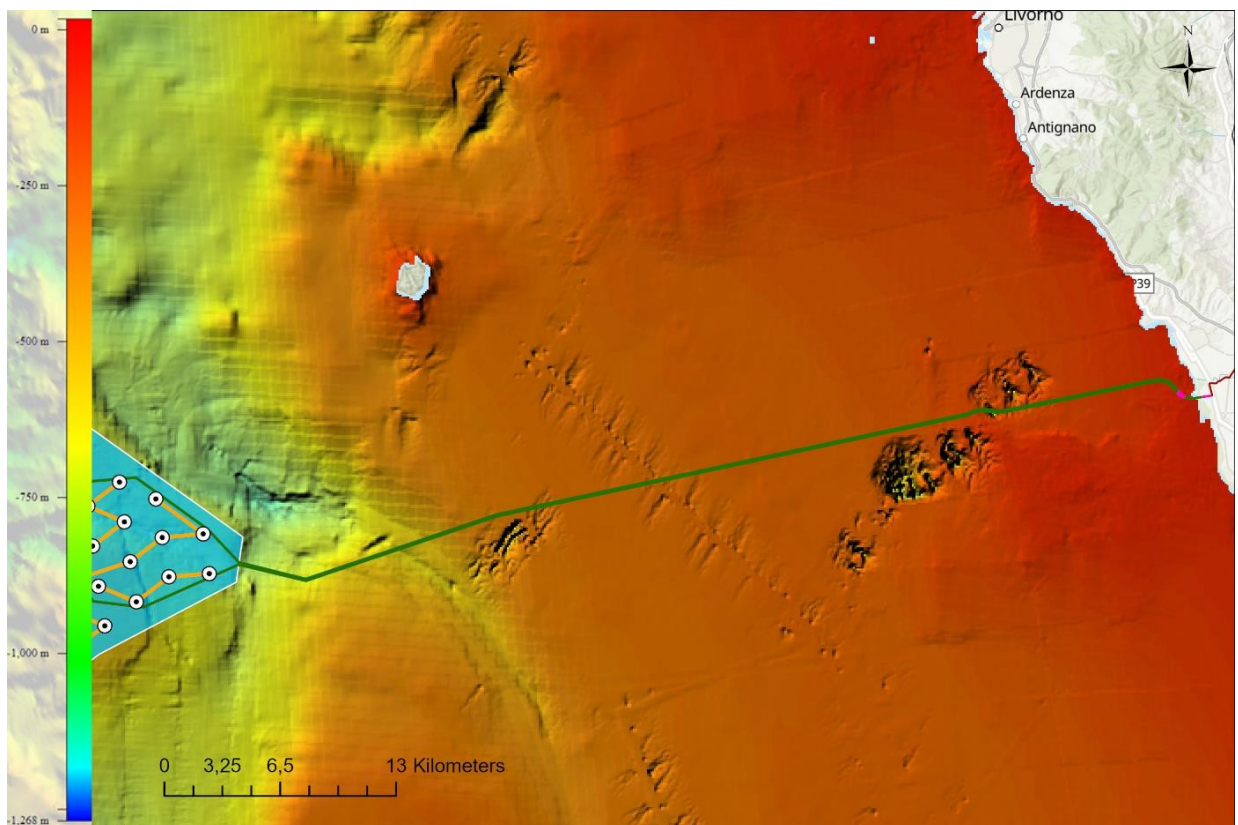


Figure 2-19 : Carte bathymétrique du conduit du projet Atis (Source : EMODnet).

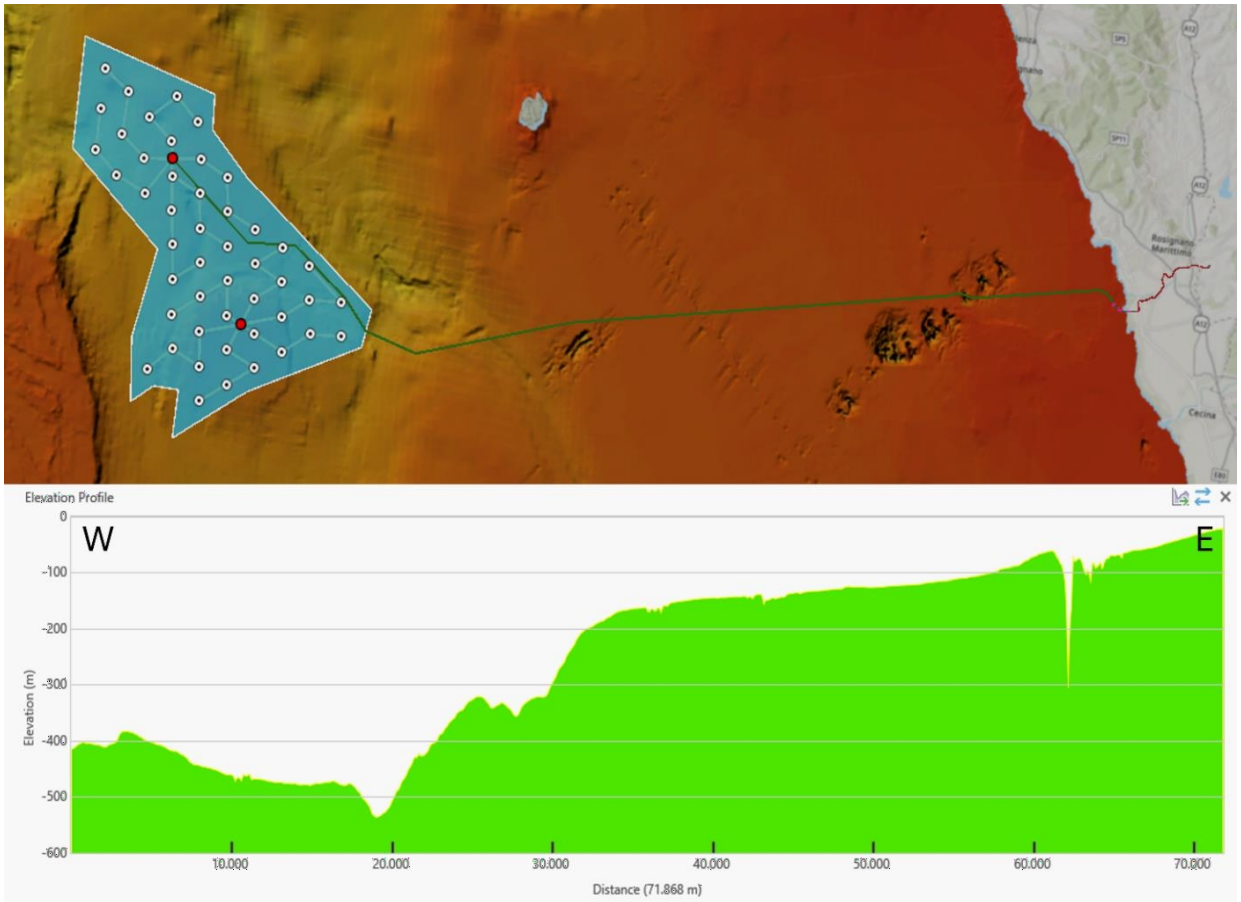


Figure 2-20 : Coupe transversale le long du tracé du câble pour la FOSS nord. (Source : EMODnet).

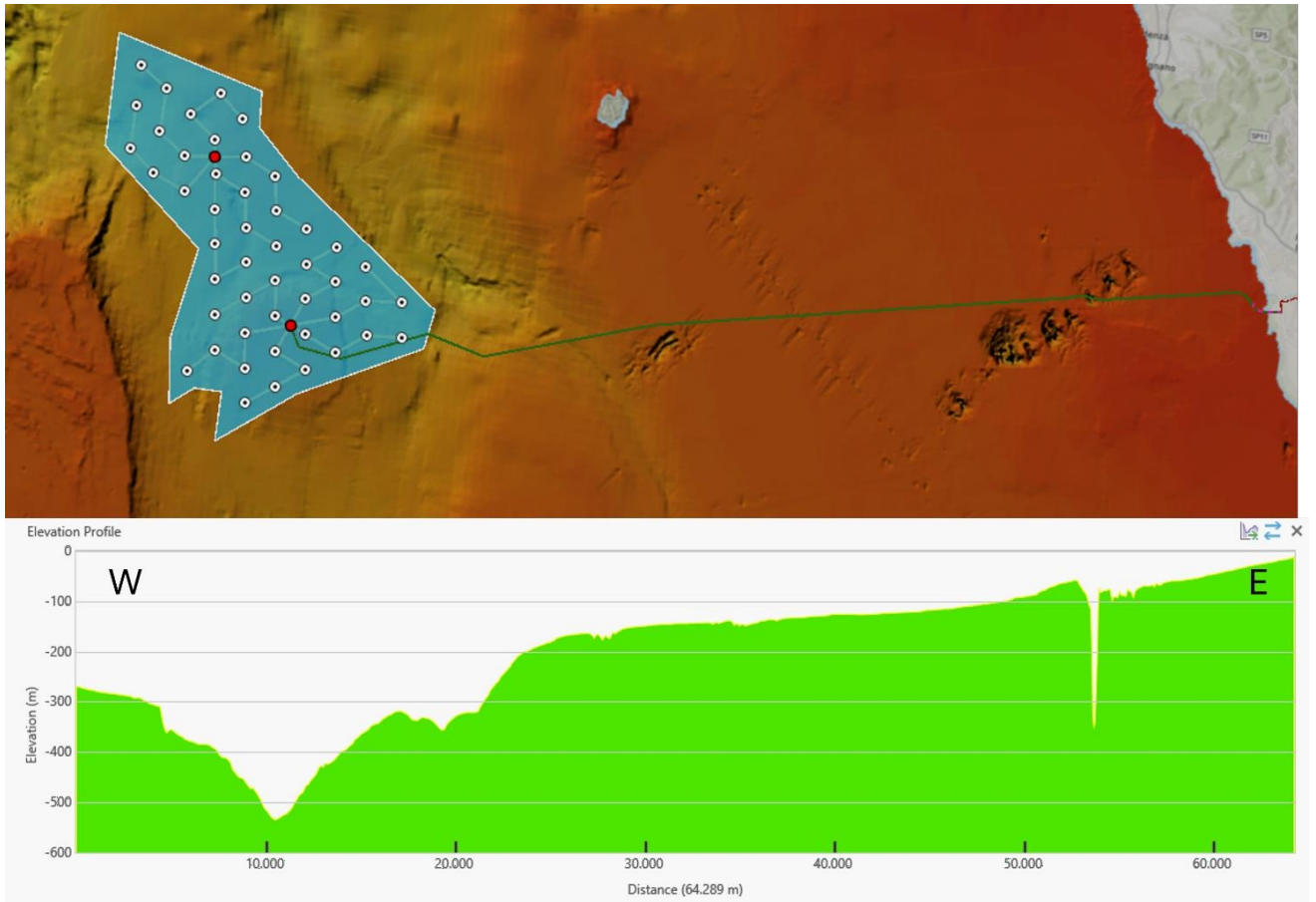


Figure 2-21 : Coupe transversale le long du tracé du câble pour le FOSS sud. (Source : EMODnet).

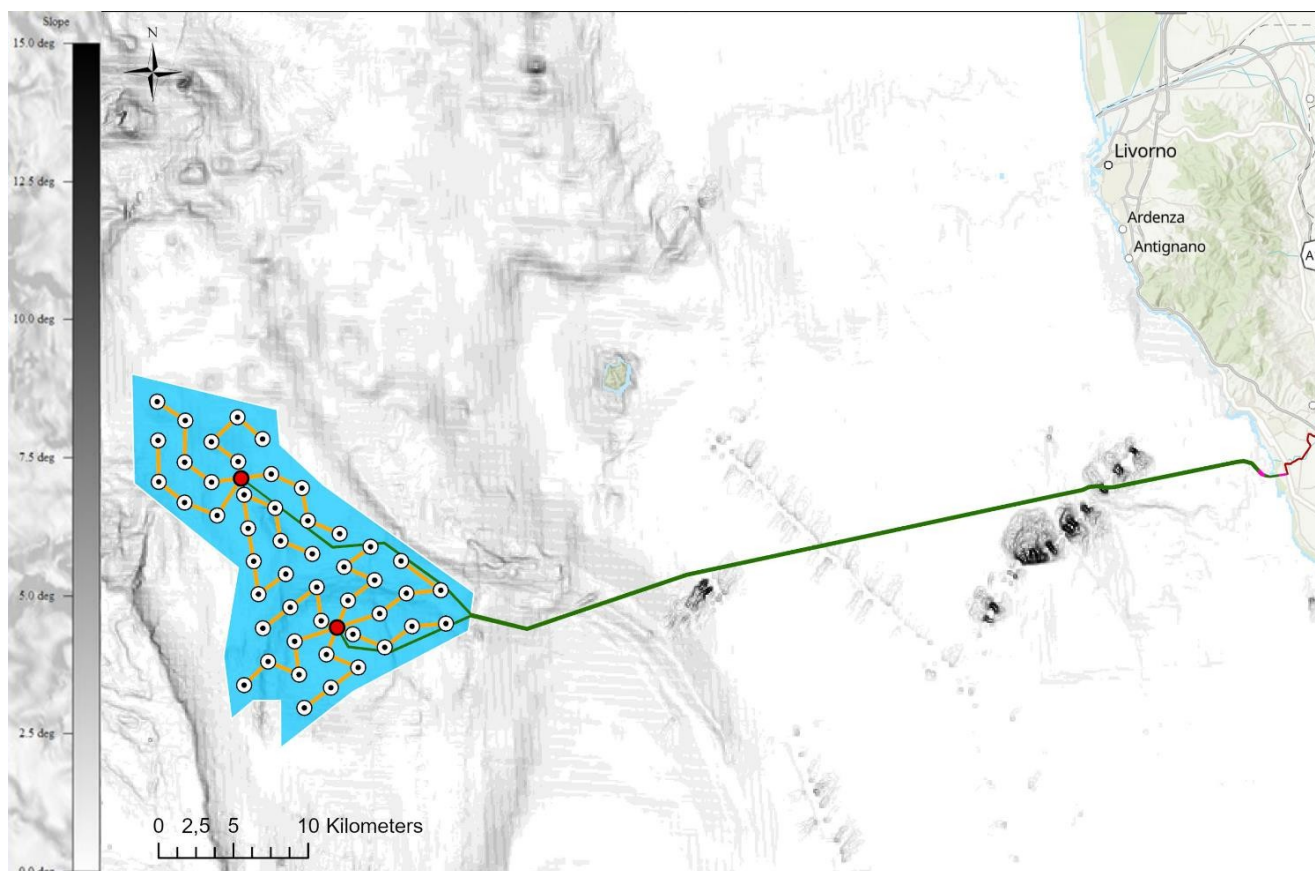


Figure 2-22 : Pente en degrés le long du tracé du câble. Carte basée sur les données bathymétriques fournies par EMODnet.

2.2.2.2 Sédiments du fond marin

Une étude a été menée sur les données relatives aux sédiments marins disponibles pour les zones du projet concernées par la présence du parc éolien et le tracé du câble sous-marin.

Selon EMODnet et le Service géologique de France (Figure 2-23), il existe au moins 3 stations d'échantillonnage à l'intérieur du plan d'eau et une juste à l'extérieur du côté ouest. Toutes sont étiquetées « carottier ». Seuls le nom de l'étude et le numéro de l'échantillon sont disponibles auprès du Service géologique de France. Un certain nombre d'échantillons EMODnet (cercles bleus) se trouvent également à proximité immédiate, mais aucune description n'est disponible.

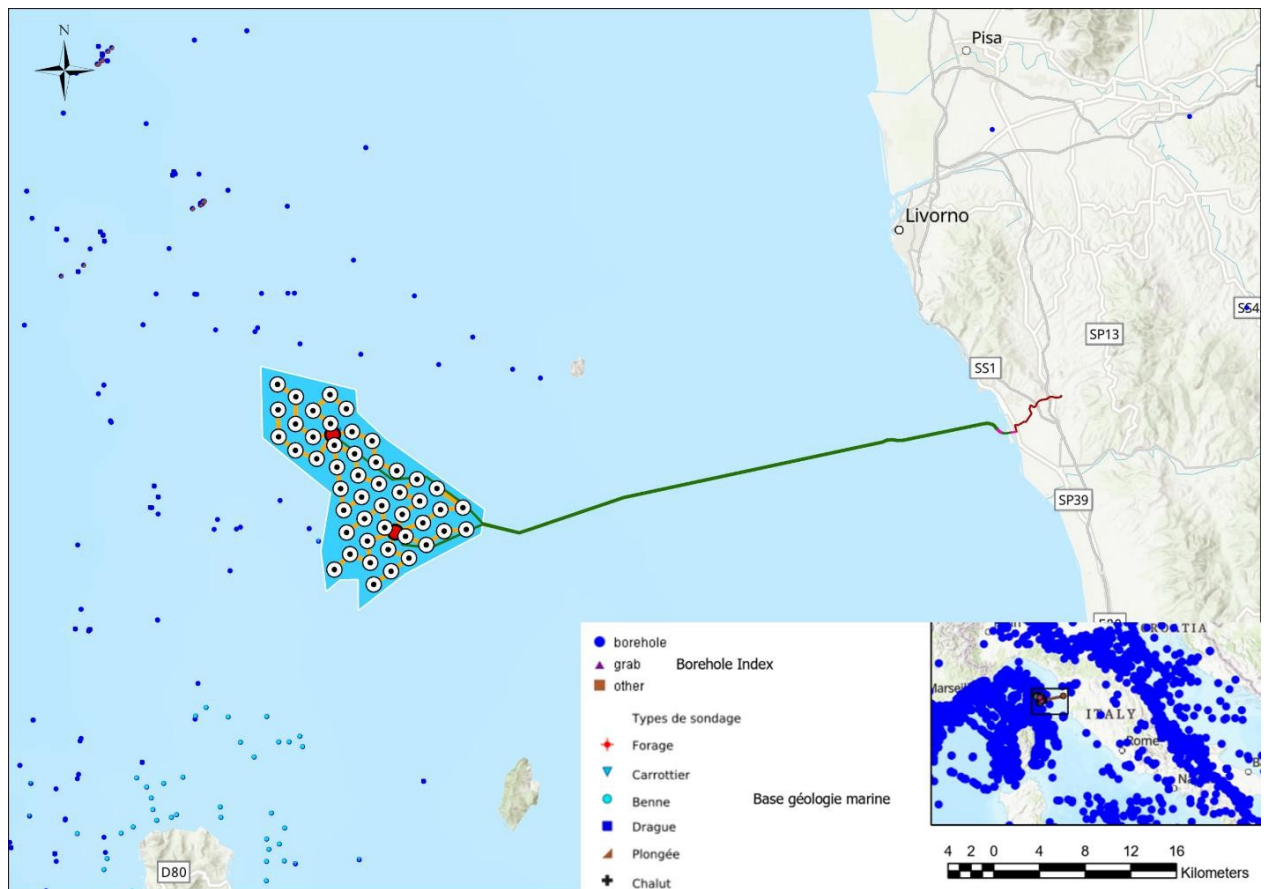


Figure 2-23 : Stations d'échantillonnage marines. (Source : Service géologique de la France et EMODnet).

En ce qui concerne la zone concernée par le tracé du câble sous-marin, la classification Folk 7 (EMODnet) montre que les fonds marins le long de la partie la plus occidentale du tracé sont constitués de « vase sableuse », qui se transforme en « sable vaseux » pour le reste du tracé. Il est très probable que la partie du câble proche de la côte traversera du sable, éventuellement avec des rochers.

Il convient toutefois de noter que les études de terrain spécifiques au site ont été achevées et que leurs résultats sont présentés dans le rapport d'étude réf. ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00), menées afin d'obtenir une évaluation complète et détaillée tant pour la zone côtière que pour la zone offshore.

La carte géologique au 1/100 000, feuille n° 111 Livourne, comporte une légende avec la description suivante des matériaux pouvant être pertinents dans la zone de débarquement.

Tableau 2.1 : Descriptions des matériaux pertinents dans la zone de débarquement (à partir de la feuille n° 111).

Code	Description du matériau	Époque
a	Plage et dunes de sable	Holocène
at	Argile lacustre avec coquillages et couches de tourbe	Holocène
qp	Sables concretionnels, rencontrés dans les puits côtiers plats	Pléistocène

2.2.2.3 Géologie du sous-sol

Selon Morelli et al (2022), la mer Ligure présente d'épaisses séquences sédimentaires datant du Miocène au Pléistocène. Les profils sismiques superficiels du bassin corse montrent que ces dépôts sont assez homogènes et laminés dans leur partie supérieure, à environ 100 m sous le fond marin, voir Figure 2-24 et Figure 2-25.

Les informations pétrographiques et les données issues des sondages et des échantillonnages concernant la géologie du sous-sol et la stratigraphie des 100 m supérieurs du fond marin sont limitées. Toutefois, les études de terrain spécifiques au site ont mis en évidence une bonne couverture sédimentaire dans la partie nord de la zone et des affleurements rocheux et semi-affleurements dans la morphologie élevée qui caractérise la partie sud du site. Pour une analyse plus détaillée, veuillez vous référer aux rapports d'enquête réf. ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00.

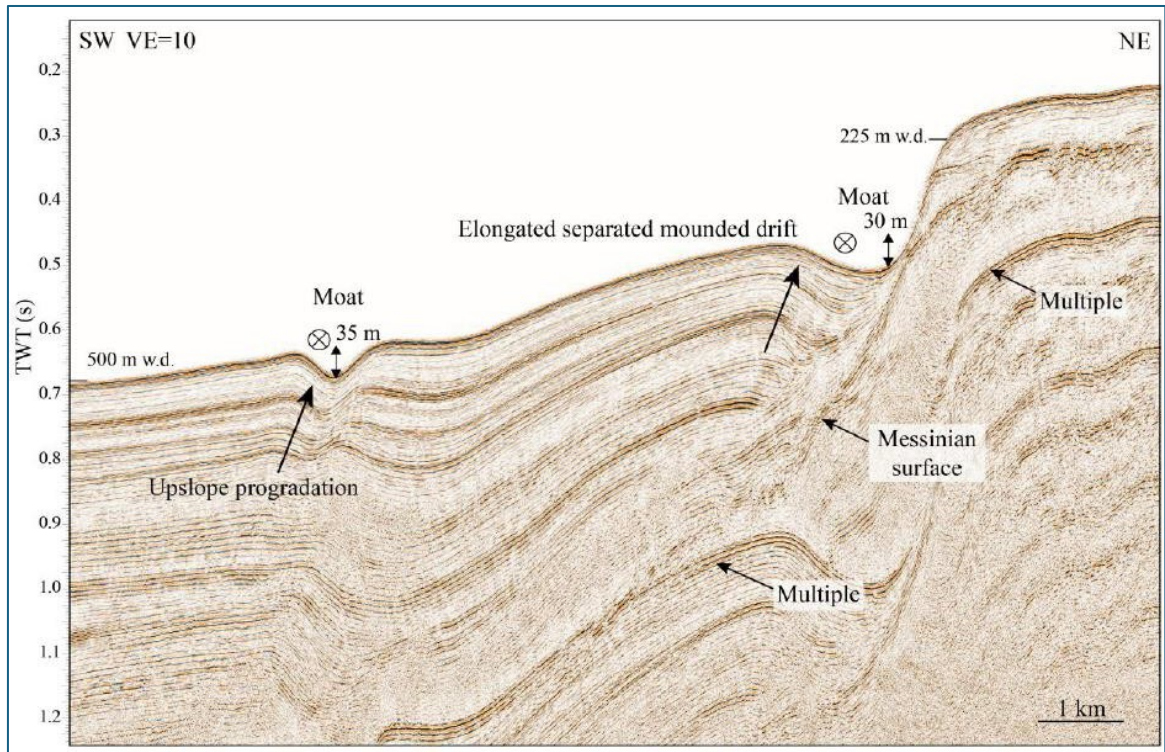


Figure 2-24 : Coupe sismique le long du talus entre le bassin corse et la plate-forme toscane (située dans la « Figure 2-14 » de la Figure 2-9 ; d'après Miramontes et al 201c).

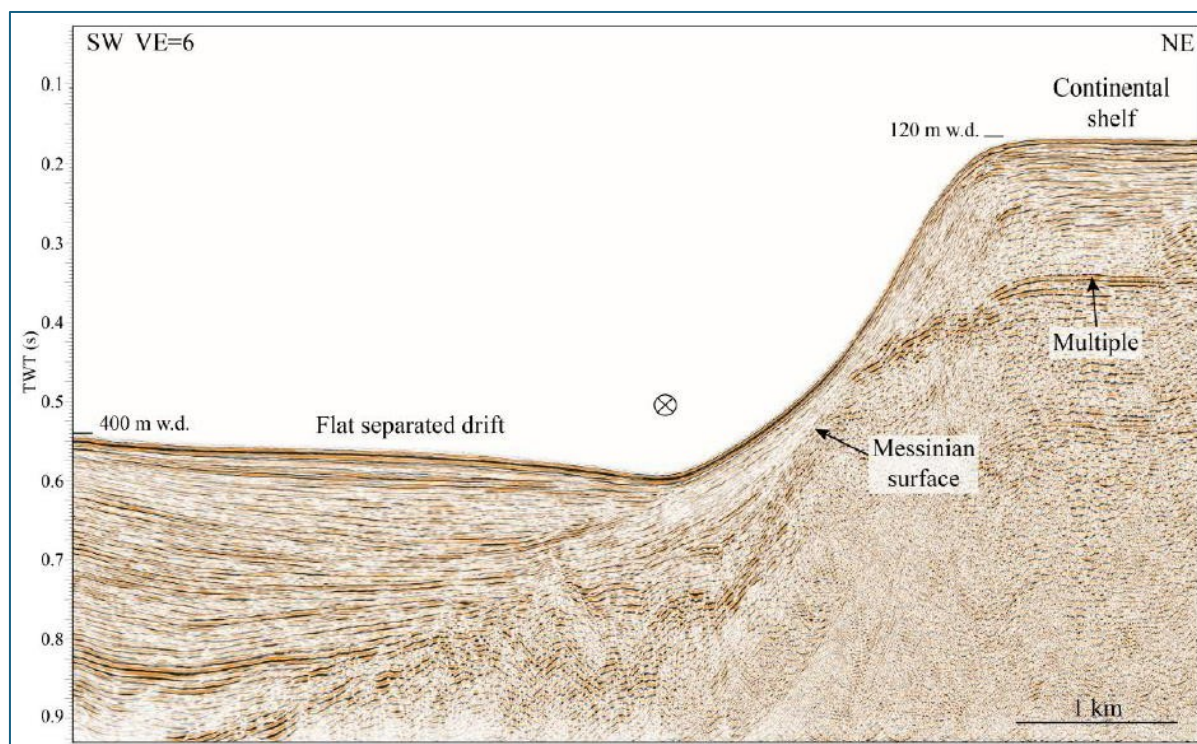


Figure 2-25 : Coupe sismique le long du talus entre le bassin corse et la plate-forme toscane (située dans la « Figure 2.2.S » de la Figure 2.2.4 ; d'après Miramontes et al 201c).

2.2.2.4 Risques géologiques

Cette section donne un bref aperçu des risques géologiques associés à la zone concernée par le plan d'eau du parc éolien et le tracé du câble sous-marin. Il est important de noter que seules les données bibliographiques publiques disponibles à ce jour ont été utilisées pour une étude préliminaire ; par conséquent, pour une description exhaustive des dangers ou risques potentiels présents, veuillez vous référer aux rapports d'enquête réf. ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00.

Par conséquent, les risques mis en évidence ne constituent pas un obstacle à l'avancement du projet, mais fournissent des informations utiles pour mieux comprendre les caractéristiques de la zone.

- *Fractures*

Il convient de signaler la présence de fractures tant dans la zone du miroir d'eau que le long du tracé du conduit sous-marin, comme le montre la figure 2-26. L'observation des profils sismiques M-10 montre clairement que cette zone est tectoniquement complexe et caractérisée par de nombreux événements tectoniques. Certaines failles tendent à s'étendre jusqu'au fond marin et pourraient encore être actives, tout comme des failles plus profondes. Selon EMODnet, les fractures à l'intérieur de la zone aquatique ne sont pas actives ou sont répertoriées comme activités indéfinies/non disponibles (nd ou n/a). Il convient toutefois de noter que les études de terrain spécifiques au site ne mettent pas en évidence de phénomènes de glissement de terrain laissant supposer une activité récente. Pour une analyse plus détaillée, veuillez vous référer aux rapports d'enquête réf. ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00.

La figure 2-26 montre les séismes enregistrés dans la zone ainsi que l'accélération maximale prévue dans les roches, indiquant une zone à faible probabilité de sismicité. Cependant, certains séismes ont été enregistrés en dehors de la zone aquatique et à proximité du conduit sous-marin, la plupart près de la côte ou à terre.

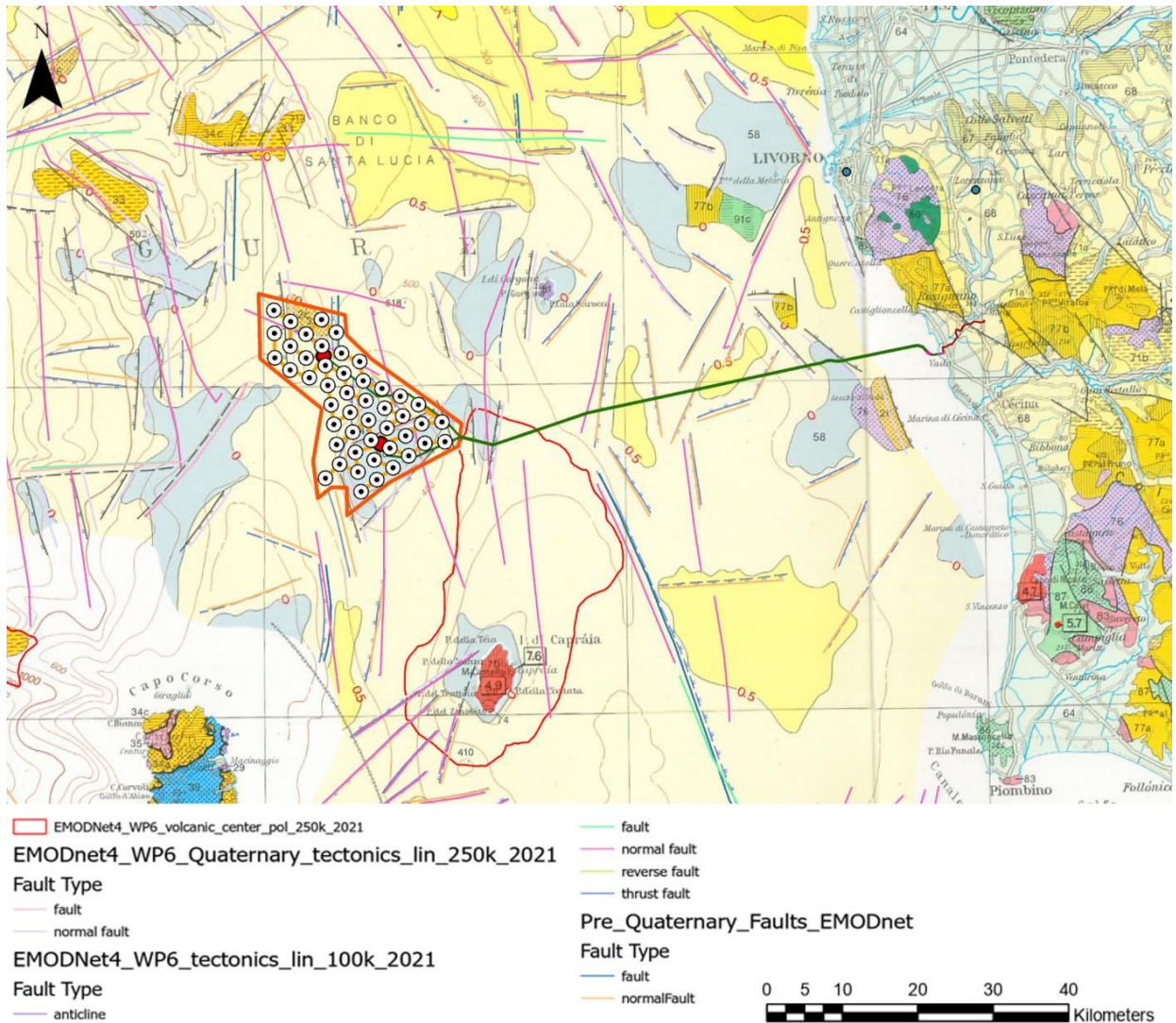


Figure 2-26 : Carte structurale montrant les failles (en magenta) superposées aux failles provenant d'EMODnet (voir légende).

Les centres volcaniques (figure 2-26) sont représentés par un contour rouge. Il convient de noter que certaines fractures interprétées par l'ISPRA (en noir) et par l'EMODnet ne sont pas exactement alignées, mais elles sont considérées comme identiques. La carte structurale de l'ISPRA ne comporte pas de légende, mais il est probable que les zones offshore jaunes soient des bassins sédimentaires d'âges ou d'épaisseurs différents, car la plupart d'entre elles sont délimitées par des failles. Les zones bleues au large pourraient être des bassins ou des zones non sédimentaires, car une ligne de contour marquée « 0 » est présente autour des bassins, ce qui pourrait être mesuré en TWT (temps aller-retour). Les lignes de contour marron avec des chiffres indiquent la profondeur de l'eau.

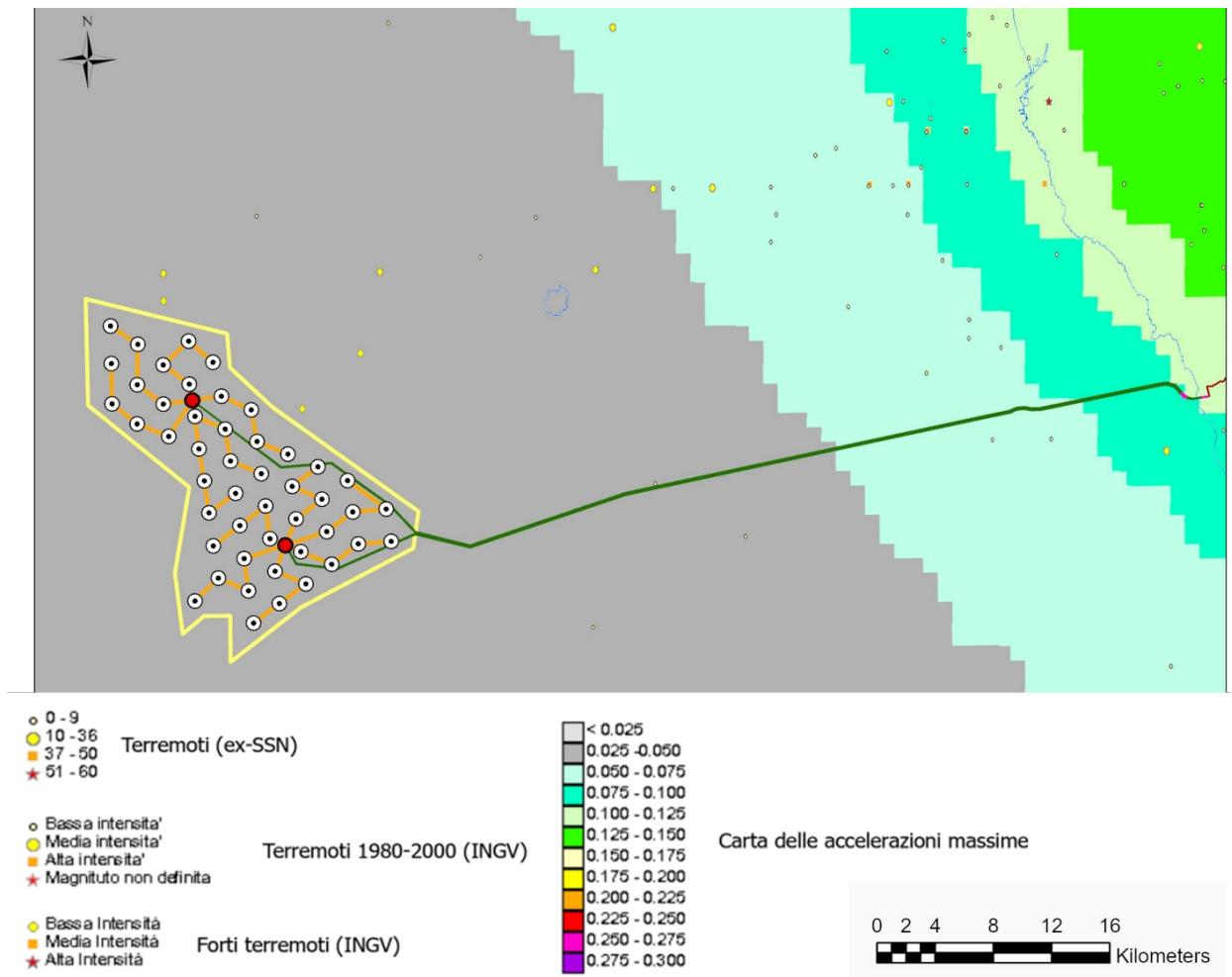


Figure 2-27 : Carte indiquant l'accélération maximale prévue (g) dans les roches en fonction de l'intensité et de la fréquence des séismes passés. Les séismes enregistrés sont également indiqués. Il convient de noter que les différents niveaux utilisent les mêmes icônes pour représenter différentes intensités. (Source : ISPRA).

- *Massi*

D'après les données disponibles, aucune présence de rochers n'a été relevée dans la zone du plan d'eau et le long du tracé du conduit sous-marin. S'ils sont présents, ils pourraient se trouver à l'intérieur de canyons et au pied de zones élevées, voir les polygones rouges dans la Figure 2-28 et la Figure 2-29. Il convient toutefois de noter que les études de terrain spécifiques au site ont également été achevées, dont les résultats sont présentés dans les rapports d'étude réf. ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00, menés afin d'obtenir une évaluation complète et détaillée de la zone offshore.

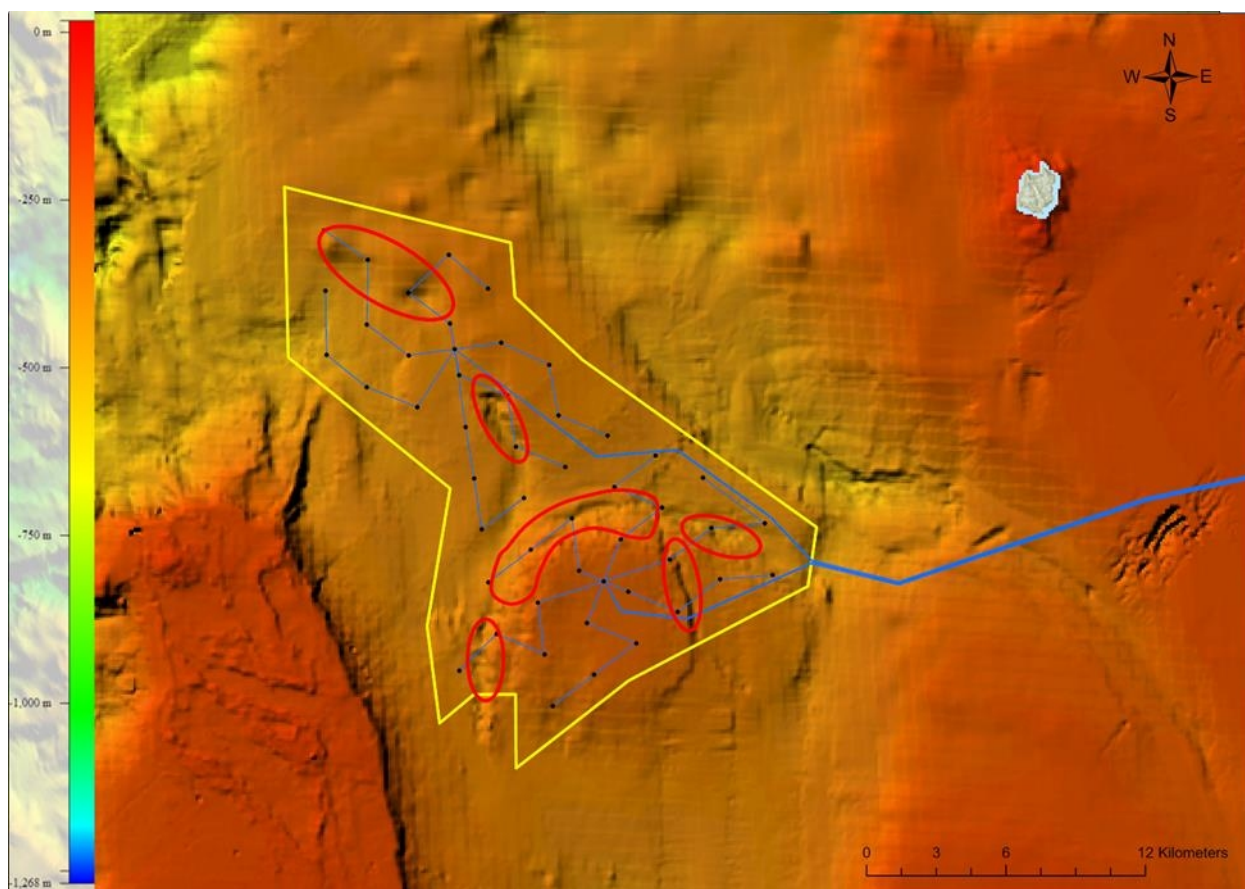


Figure 2-28 : Carte bathymétrique indiquant les zones susceptibles de contenir des rochers (polygones rouges). (Source : EMODnet).

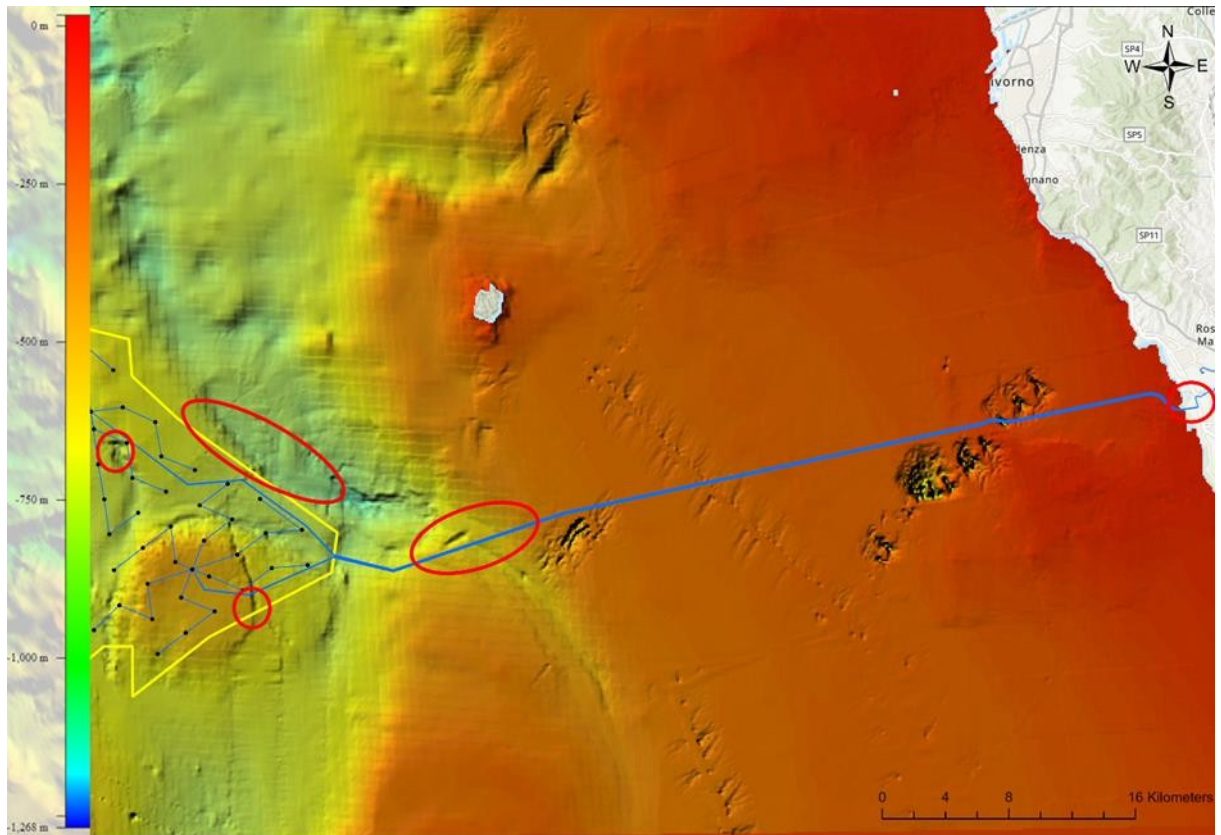


Figure 2-29 : Zones le long du tracé du câble où des rochers peuvent être présents. (Source : EMODnet).

- *Glissements de terrain sous-marins*

Les pentes abruptes et l'instabilité des sédiments peuvent provoquer des glissements de terrain sous-marins, et les tremblements de terre peuvent aggraver ce phénomène.

Un canyon sous-marin progresse le long du bord nord-est du parc éolien, ce qui pourrait provoquer une érosion et des glissements de terrain, voir figure 2-30. Dans la zone d'intérêt, des glissements de terrain peuvent se produire dans la partie sud et dans la zone du canyon dans la partie centrale, ainsi que dans la partie nord où se trouvent quelques reliefs, ce qui correspond également à la carte de susceptibilité aux glissements de terrain présentée à la figure 2-31.

Les figures 2-32 et 2-33 montrent les zones où des glissements de terrain peuvent se produire le long du tracé de la canalisation et les zones à forte susceptibilité (zones rouges), qui indiquent donc une probabilité élevée de glissements de terrain.

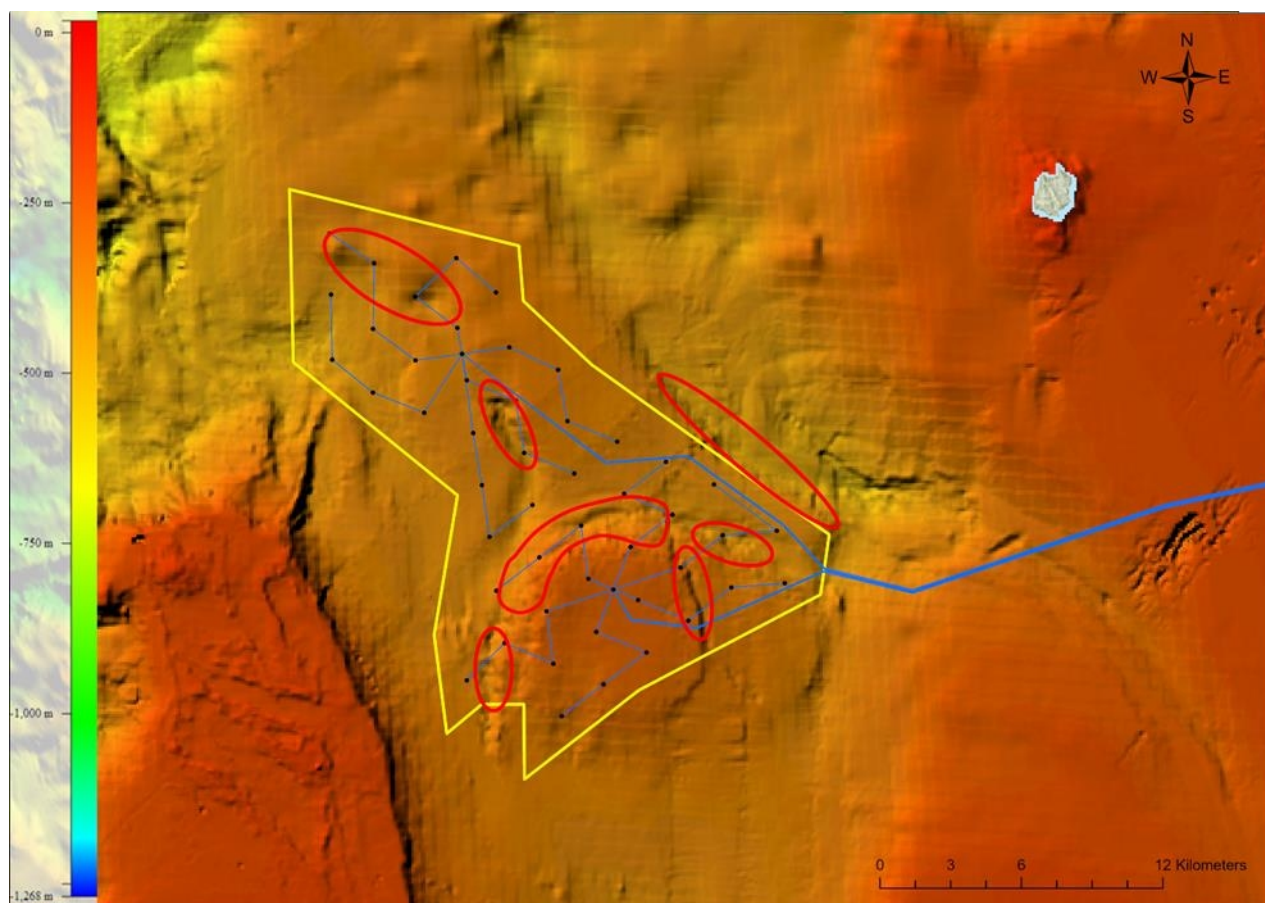


Figure 2-30 : Carte bathymétrique indiquant les zones susceptibles d'être touchées par des glissements de terrain (polygones rouges). (Source : EMODnet).

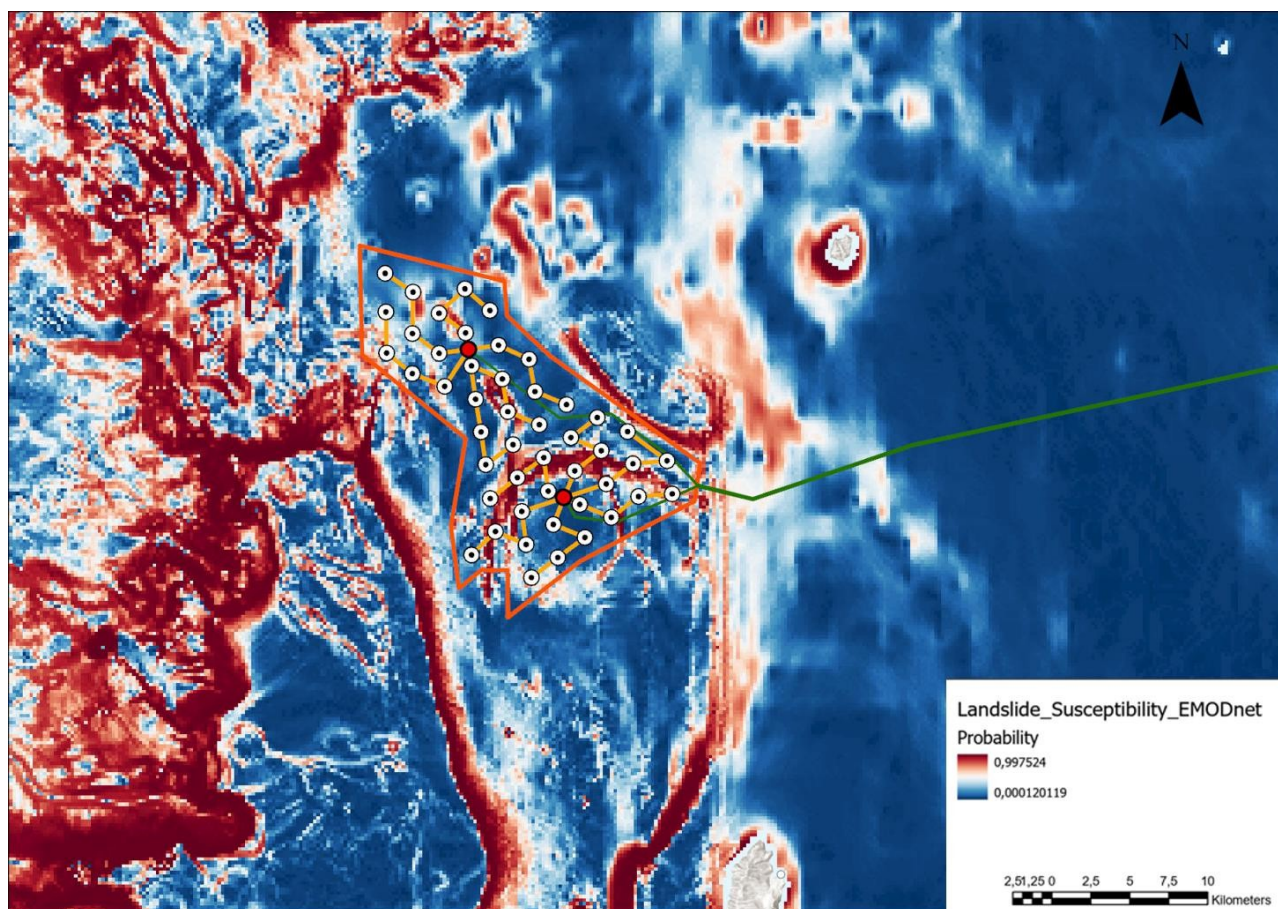


Figure 2-31 : Carte indiquant la susceptibilité aux glissements de terrain sous-marins. Les valeurs élevées de susceptibilité (rouge) indiquent une forte probabilité de glissements de terrain. La carte indique la probabilité que des glissements de terrain se produisent au fil du temps dans cette partie des fonds marins, mais elle ne mesure pas quand et à quelle fréquence un événement peut se produire, ni son ampleur potentielle. Modifié à partir d'EMODnet.

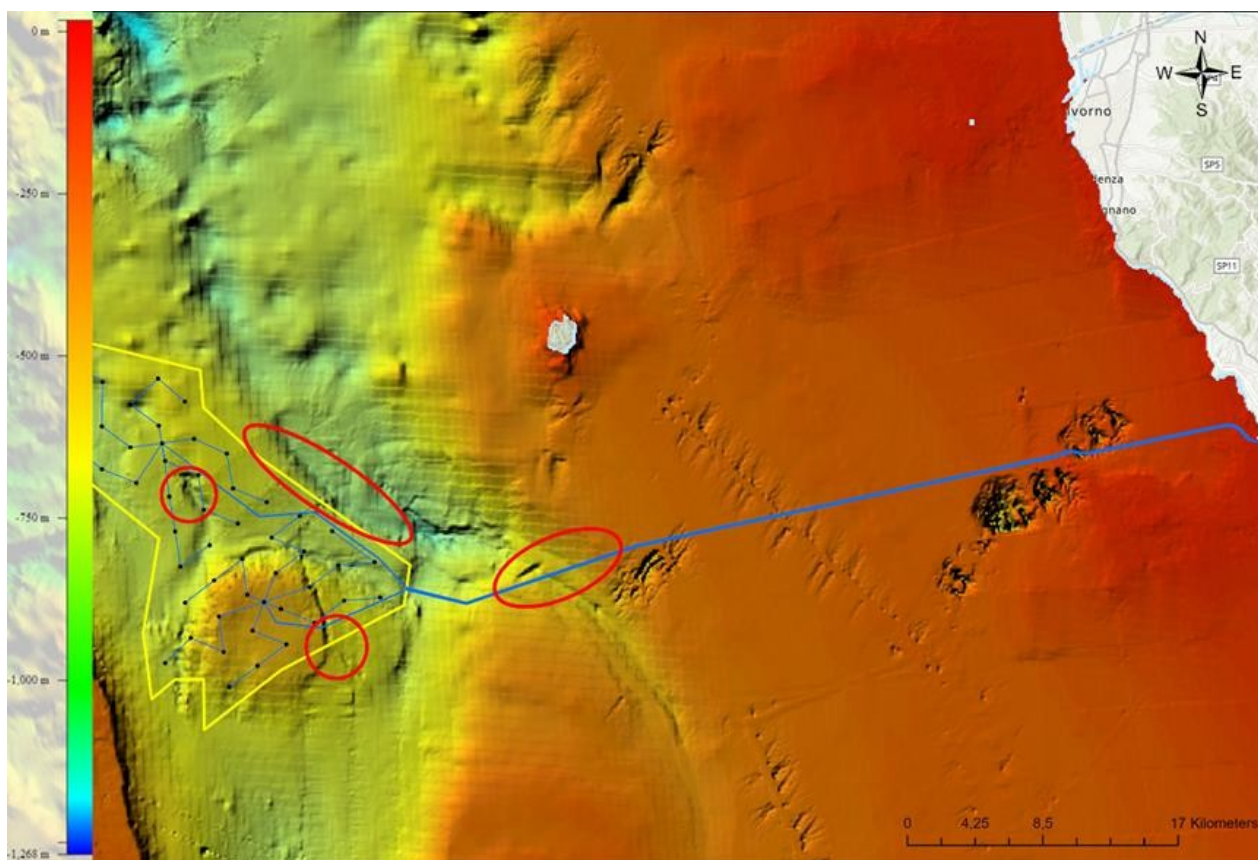


Figure 2-32 : Zones exposées au risque de glissements de terrain. (Source : EMODnet).

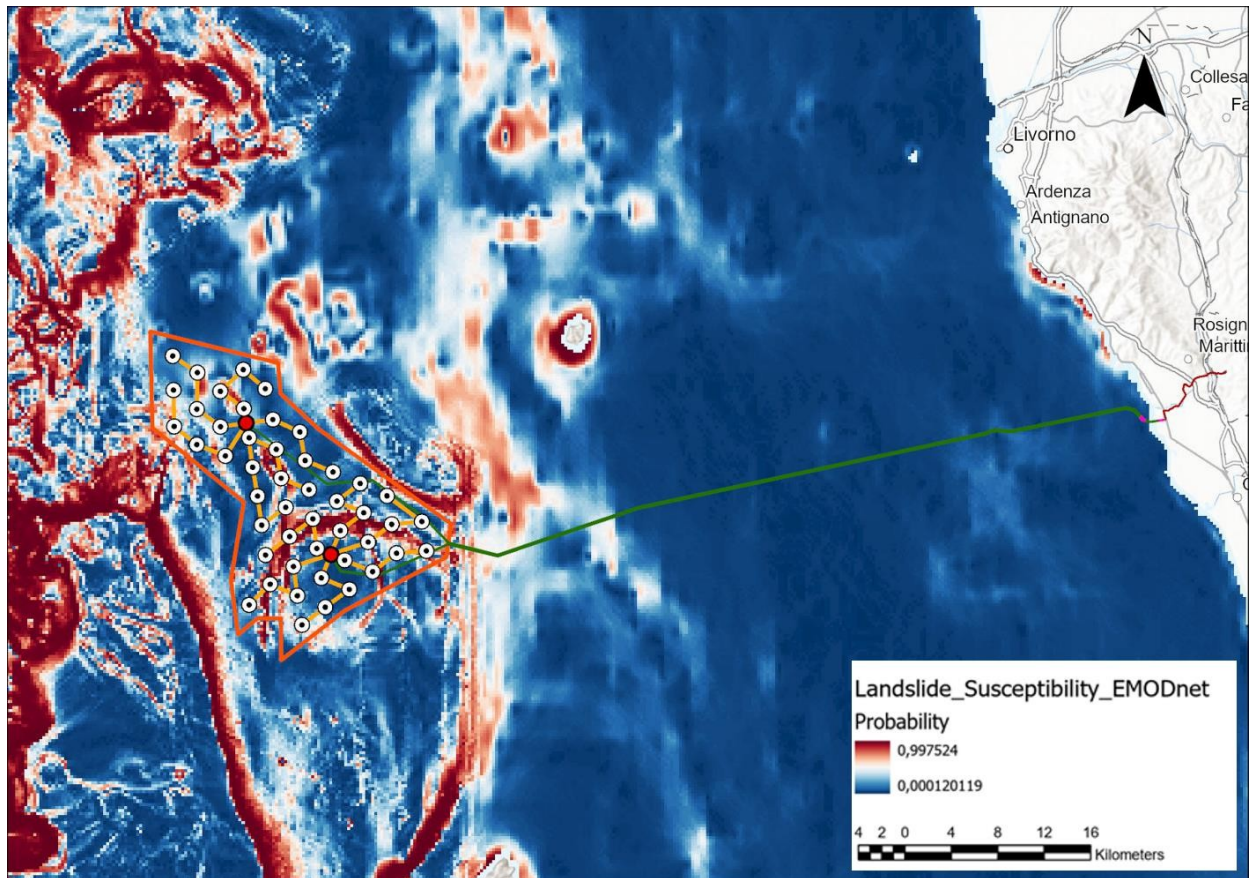


Figure 2-33 : Carte montrant la susceptibilité aux glissements sous-marins. Les valeurs élevées de susceptibilité (rouge) indiquent une probabilité élevée de glissements. La carte indique la probabilité que des glissements se produisent au fil du temps dans cette partie des fonds marins, mais elle ne mesure pas quand et à quelle fréquence un événement peut se produire, ni son ampleur possible. Modifié par EMODnet.

Toutefois, les enquêtes de terrain spécifiques au site ont été achevées et leurs résultats sont présentés dans les rapports d'enquête réf. ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00. Ces derniers ont montré qu'il n'y a pas de glissements de terrain dans les zones concernées par le projet.

- Gaz de surface

En raison du peu de données sismiques disponibles, il n'a pas été possible d'évaluer le risque de gaz de surface dans la zone. Mais comme des volcans de boue et des pockmarks ont été signalés sur le plateau continental toscan (Spatola et al., 2022), il est possible que du gaz de surface soit présent dans la zone. Ces aspects ont été approfondis lors des études spécifiques au site, comme détaillé dans les rapports ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00.

- Sédiments meubles

Aucune information n'est disponible à ce sujet, mais des sédiments meubles pourraient être présents au niveau de la surface de l'eau, car on s'attend à ce que des sédiments pélagiques/hémipélagiques se déposent dans des eaux aussi profondes.

Selon Miramontes et al., 2016, un amas de contourite se forme dans la partie orientale. Il est probable que ces sédiments soient jeunes, mobiles et, à ce titre, aient une faible force sédimentaire.

Il convient toutefois de souligner que les études de terrain spécifiques au site montrent que les accumulations de contourite sont particulièrement présentes autour de la structure supérieure et provoquent une érosion et un dépôt de sédiments le long des isobates. Pour une analyse plus détaillée, veuillez vous référer aux rapports d'enquête réf. ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00.

2.2.2.5 Géologie du sous-sol

Selon les données EMODnet, trois câbles de communication étaient présents dans la zone du parc éolien, comme illustré à la figure 2-34. Les campagnes géophysiques et environnementales ont permis de confirmer avec précision l'emplacement de deux de ces câbles, tandis que le câble signalé dans la base de données EMODnet dans la partie nord de la zone n'a pas été détecté. Pour une analyse plus détaillée, veuillez vous référer aux rapports d'étude réf. ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00.

Toujours selon les données EMODnet, en ce qui concerne les épaves, les seules détectées dans la zone d'étude se trouvent près de la côte. La présence d'un seul puits, appelé Maria 001, à 19 km au sud-est de la zone d'eau, est également signalée dans la zone, tandis qu'il n'y a pas d'installations offshore. Ces aspects ont été approfondis lors des enquêtes spécifiques au site, comme détaillé dans les rapports ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00.

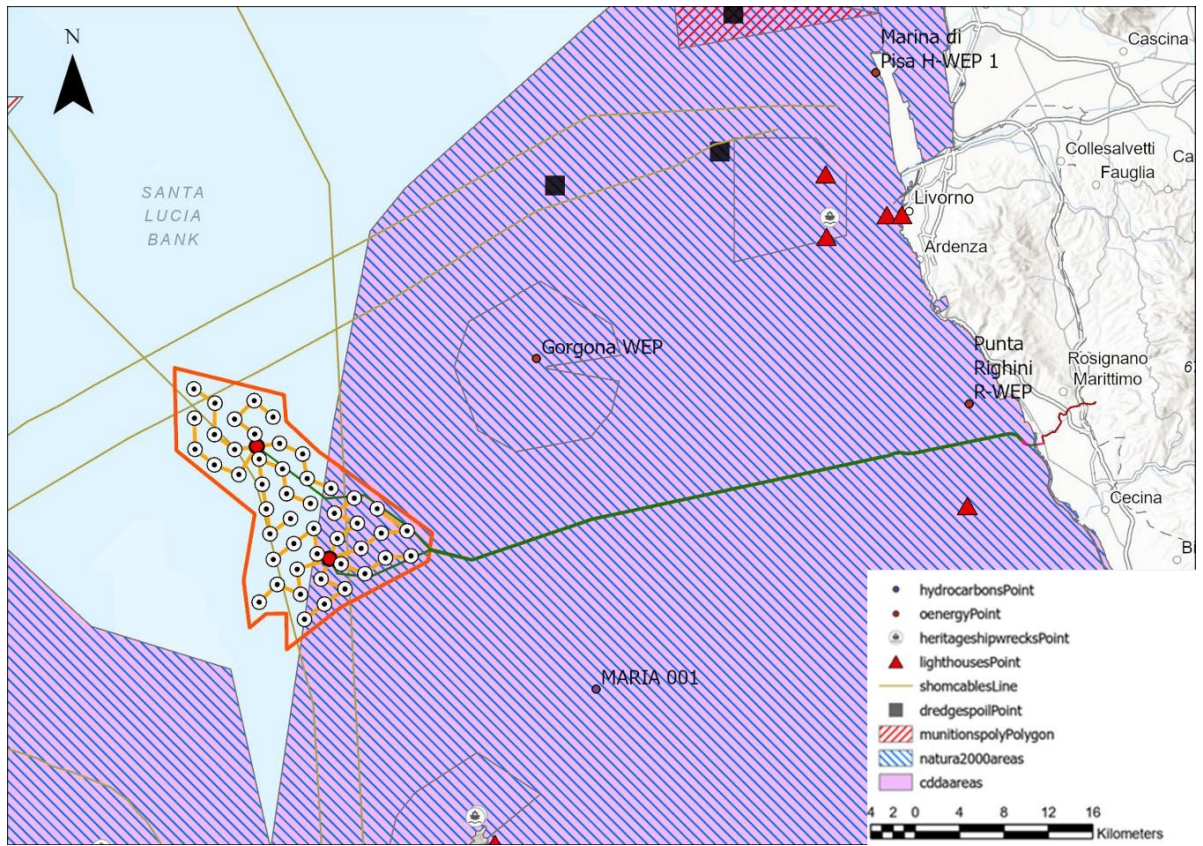


Figure 2-34 : Objets fabriqués par l'homme et autres activités humaines dans la zone d'intérêt. Modifié à partir d'EMODnet.

3 Géomorphologie

3.1 Aspects géomorphologiques de la zone du projet - onshore

La zone d'intérêt, située dans la plaine côtière au sud de Castiglioncello, présente des formations quaternaires extrêmement stables et une pente très douce. Cette zone est principalement plate dans les dépôts alluviaux les plus récents (holocènes), tandis que le long de la côte, on observe une légère pente croissante vers l'intérieur, due à la présence de terrasses successives.

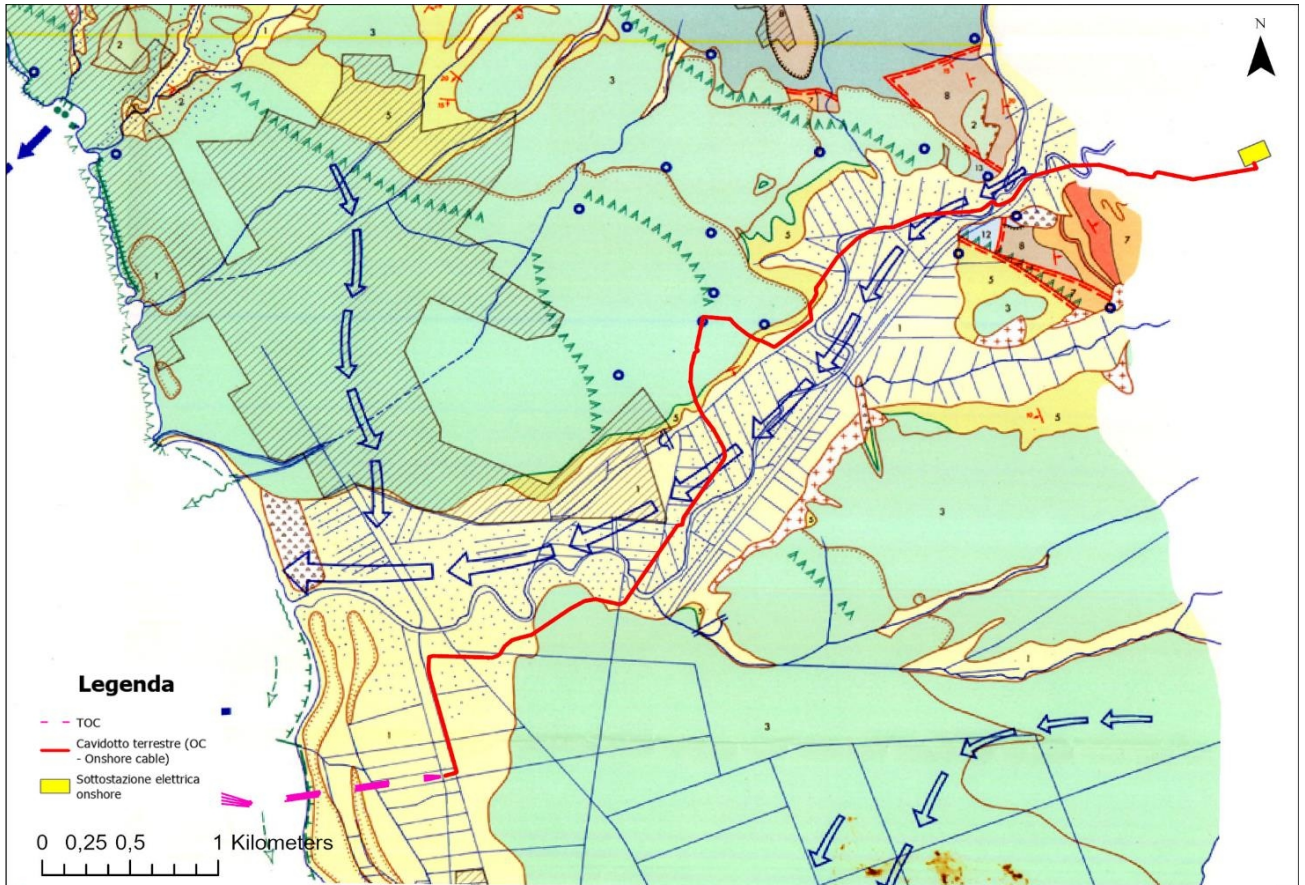
La configuration plate, combinée à la lithologie des formations présentes, constitue la condition préalable à la stabilité globale de la zone du projet en termes géomorphologiques. La carte géomorphologique de la commune de Rosignano Marittimo (Figure 3-1) montre que la zone onshore concernée par le projet « Atis » traverse différents éléments géomorphologiques.

En particulier, la ligne côtière, principalement concernée par le passage des électrodes marines, a montré une avancée jusqu'en 1976 et traverse des portions de systèmes dunaires et/ou de sédiments en partie d'origine éolienne. Cette zone, compte tenu de ses faibles gradients, est classée comme stable du point de vue de l'instabilité des pentes et se caractérise par des formes et/ou des sédiments d'origine alluviale et des zones assainies.

Enfin, en se dirigeant vers l'intérieur des terres, où seront installés les conduits terrestres et la sous-station électrique onshore, le territoire concerné par les interventions est caractérisé par des zones potentiellement sujettes aux inondations, en particulier à proximité immédiate de la rivière Fine.

Cette zone est notamment identifiée sur la carte géomorphologique comme un « lit enfoui », relevant de la « classe 3 », c'est-à-dire caractérisée par des sables et des grès calcaires afférents à des formes en terrasses, caractérisées par l'absence d'instabilité des pentes.

D'après la carte géomorphologique de la commune de Castellina Marittima, on observe dans la figure 3-2 que la zone côtière concernée est principalement caractérisée par des dépôts alluviaux de fond de vallée et ne traverse pas d'éléments géomorphologiques critiques.



CLASSI DI STABILITÀ DEI VERSANTI

1	Alluvioni e aree bonificate Possibilità di piccoli cedimenti Aree inondabili	8	Calcarei e calcari sabbiosi Versanti stabili
2	Conglomerati dei terrazzi Versanti stabili	9	Formazioni conglomeratiche Versanti con pericolo di crolli e smottamenti quando a pendio ripido
3	Sabbie e arenarie calcaree dei terrazzi Versanti stabili	10	Formazioni tipo flysch, breccie. Versanti tendenzialmente instabili, possibilità di frane circoscritte
4	Argille Versanti mediamente stabili con tendenza a elevata degradabilità	11	Prevalenza di argilloscisti con piccole intercalazioni calcareo-marnose e arenacee Versanti di scarsa stabilità
5	Sabbie e calcari sabbiosi Versanti stabili	12	Alternanza di argilloscisti con calcari, arenarie quarzose ecc. Versanti tendenzialmente instabili, sviluppo di numerose frane circoscritte o su interi versanti
6	Gessi Versanti mediamente stabili, possibilità di notevoli variazioni di franosità a seconda della tessitura della roccia	13	Rocce magmatiche (ofioliti) Versanti stabili
7	Marne argillose lastriformi Versanti mediamente stabili, possibilità di frane circoscritte		

Figure 3-1 : Extrait de la carte géomorphologique de la commune de Rosignano Marittimo à l'échelle 1:25 000 (modifiée).

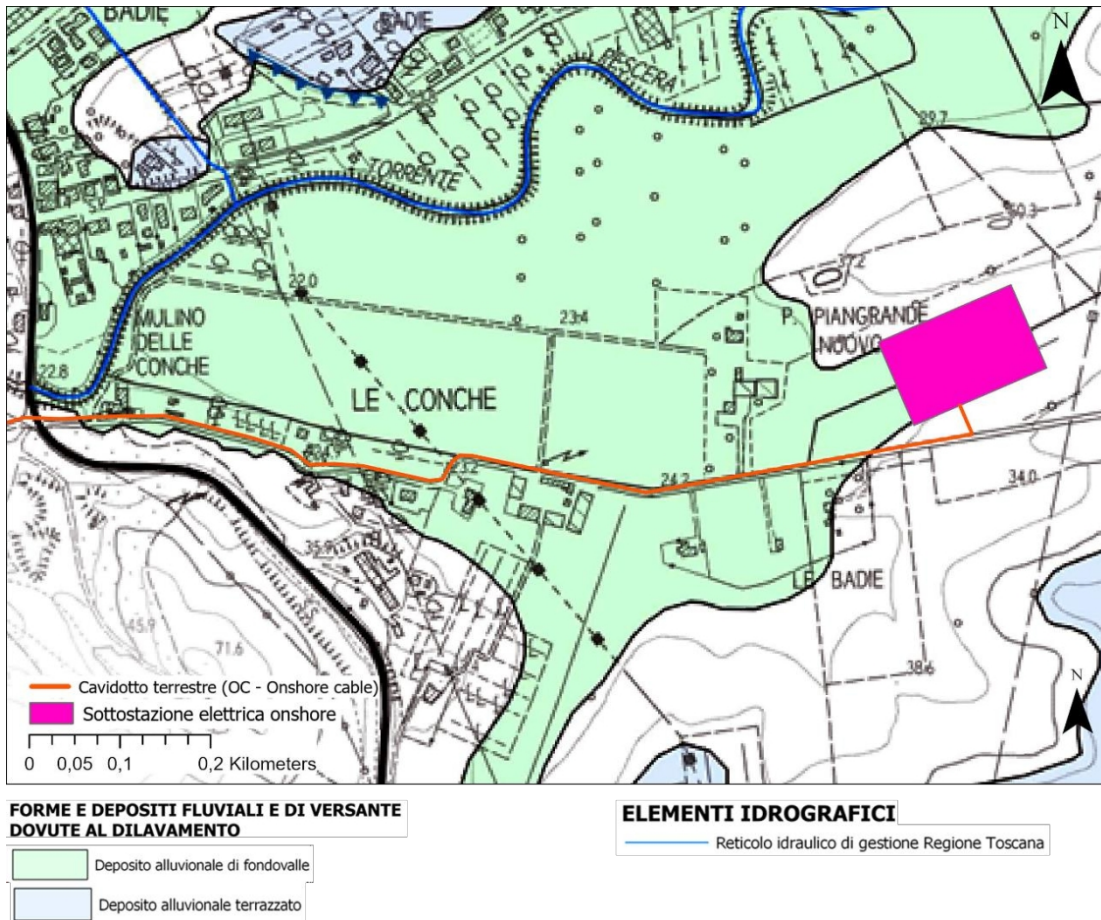


Figure 3-2 : Extrait de la carte géomorphologique de la commune de Castellina Marittima à l'échelle 1:10 000

3.2 Aspects géomorphologiques de la zone du projet - offshore

D'un point de vue géomorphologique, les fonds marins de la mer Tyrrhénienne septentrionale présentent une série de caractéristiques importantes, résultat d'une interaction complexe entre les processus géologiques, climatiques et océanographiques.

La bathymétrie de la zone d'intérêt montre une prédominance de fonds marins peu profonds, avec des profondeurs relativement limitées. En particulier, la zone occupée par le plan d'eau atteint une profondeur d'environ 630 mètres. L'analyse de la carte géomorphologique de la figure 3-3, fournie par EMODnet, fait apparaître plusieurs caractéristiques géomorphologiques.

En particulier, dans la partie orientale du plan d'eau, nous nous trouvons à la limite d'un « bassin intraslope », un bassin situé sur la marge continentale dans la pente sous-marine. La zone d'intérêt borde l'extrémité orientale de ce bassin, s'étendant sur environ 130 km vers le nord. Malgré cela, la bathymétrie ne révèle pas de variations significatives de profondeur dans le plan d'eau.

L'analyse bibliographique montre qu'en se dirigeant vers la côte et en suivant le tracé des câbles sous-marins, on observe une variation de profondeur pouvant atteindre environ 200 mètres, où le tracé croise un canyon sous-marin d'environ 26 km de long et 3 km de large. Il convient toutefois de noter que les études de terrain spécifiques au site ont révélé des pentes d'environ 3 km de largeur et de quelques dizaines de mètres de dénivélé, et non des valeurs aussi prononcées que celles indiquées dans les données bibliographiques de référence. En outre, l'étude offshore menée a mis en évidence une légère interférence avec le canyon qui n'est pas critique pour la pose du câble. Pour une analyse plus détaillée, veuillez vous référer aux rapports d'étude réf. ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00. Ce canyon est essentiellement une vallée creusée par des flux de sédiments, des courants marins ou d'autres processus érosifs, et se caractérise par sa profondeur d'environ 200 mètres et ses dépôts sédimentaires.

À environ 20 km au sud du plan d'eau se trouve une importante zone volcanique correspondant à l'île de Capraia. Capraia est la seule île de l'archipel toscan d'origine volcanique, résultat d'une activité volcanique remontant à environ 7,6-4,7 millions d'années. Cette activité volcanique a été générée pendant la phase de détente continentale du Miocène, qui a conduit à la formation de l'île comme vestige d'un ancien édifice volcanique.

Enfin, à environ 17 km au nord-est de la mer se trouve l'île de Gorgona, la plus petite de l'archipel, formée de roches ophiolitiques qui représentent les vestiges de l'ancienne croûte océanique crétacée, métamorphosées au cours des événements tectoniques ultérieurs. Cette île est un exemple de la phase tectonique la plus ancienne, celle de compression, qui a façonné la géologie de la région.

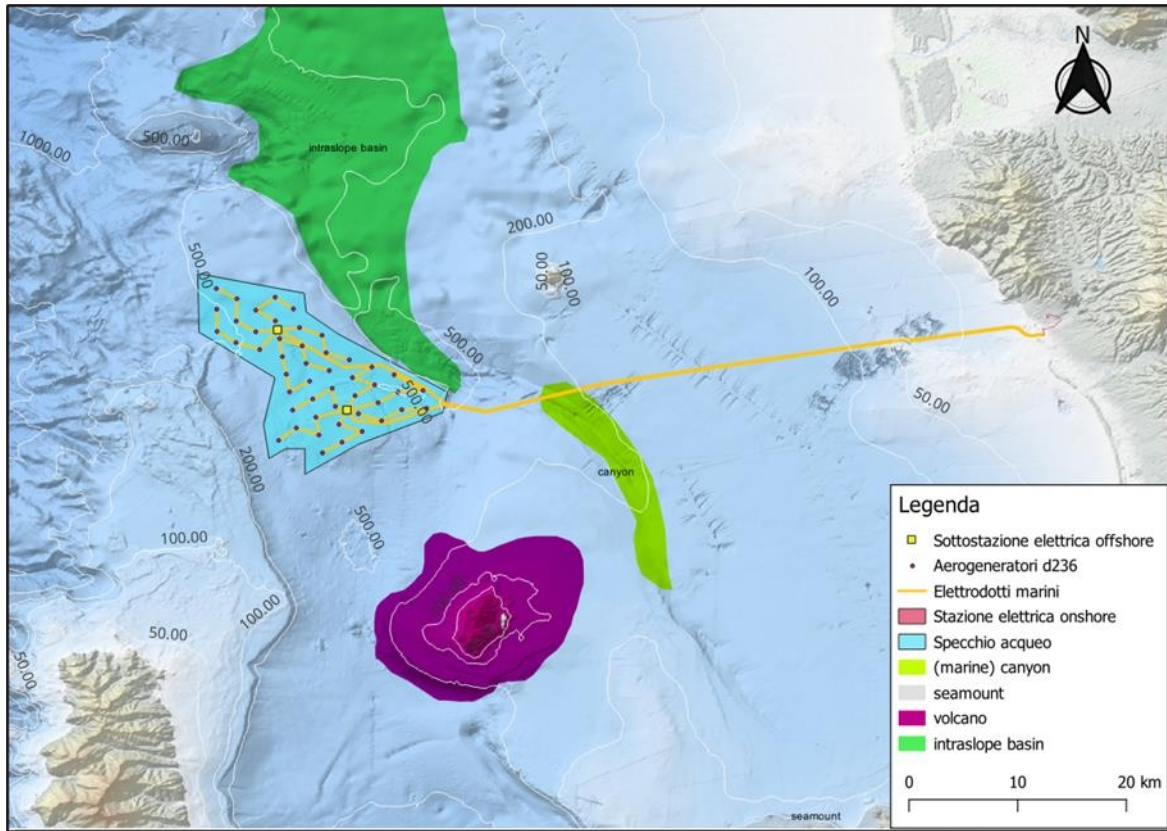


Figure 3-3 : Carte géomorphologique de la zone du projet offshore (source : EMODnet).

4 Hydrogéologie

Le territoire côtier toscan, défini dans le Plan 2021/2027, fait l'objet d'une nouvelle configuration territoriale, résultat d'une restructuration par rapport aux plans précédents. Cette reconfiguration comprend plusieurs entités, telles que les bassins des fleuves Arno, Serchio et Magra, ainsi que ceux de la Ligurie et de la Toscane.

Le district hydrographique des Apennins septentrionaux, qui s'étend sur une superficie d'environ 24 300 km², comprend un large éventail de bassins hydrographiques présentant des caractéristiques physiographiques, géologiques et morphologiques différentes ; ce district est situé géographiquement dans le système des chaînes alpines de la Méditerranée centrale, avec la mer Ligure et la mer Tyrrhénienne comme principaux récepteurs finaux.

L'hydrogéologie du territoire du district reflète cette complexité, mettant en évidence diverses unités hydrogéologiques (figure 4-1). Parmi celles-ci, les plaines alluviales (AV) et les dépressions quaternaires (DQ) prédominent dans les plaines alluviales, caractérisées par des aquifères phréatiques de plaine et des formations alluviales péri-tyrrhéniennes et apennines.

Les formations détritiques (DET), représentées par les cônes de déjection montagneux et les plages des Apennins, sont principalement constituées de la formation « sables jaunes », témoignage d'anciens cônes de déjection alluviaux incorporés dans le soulèvement des Apennins.

Les aquifères locaux (LOC), situés principalement dans la partie montagneuse du territoire, comprennent ceux associés aux grès d'Avanfossa et à la formation marneuse-sableuse, qui concernent la partie apennine du district. La partie onshore du projet se situe dans la partie des aquifères locaux.

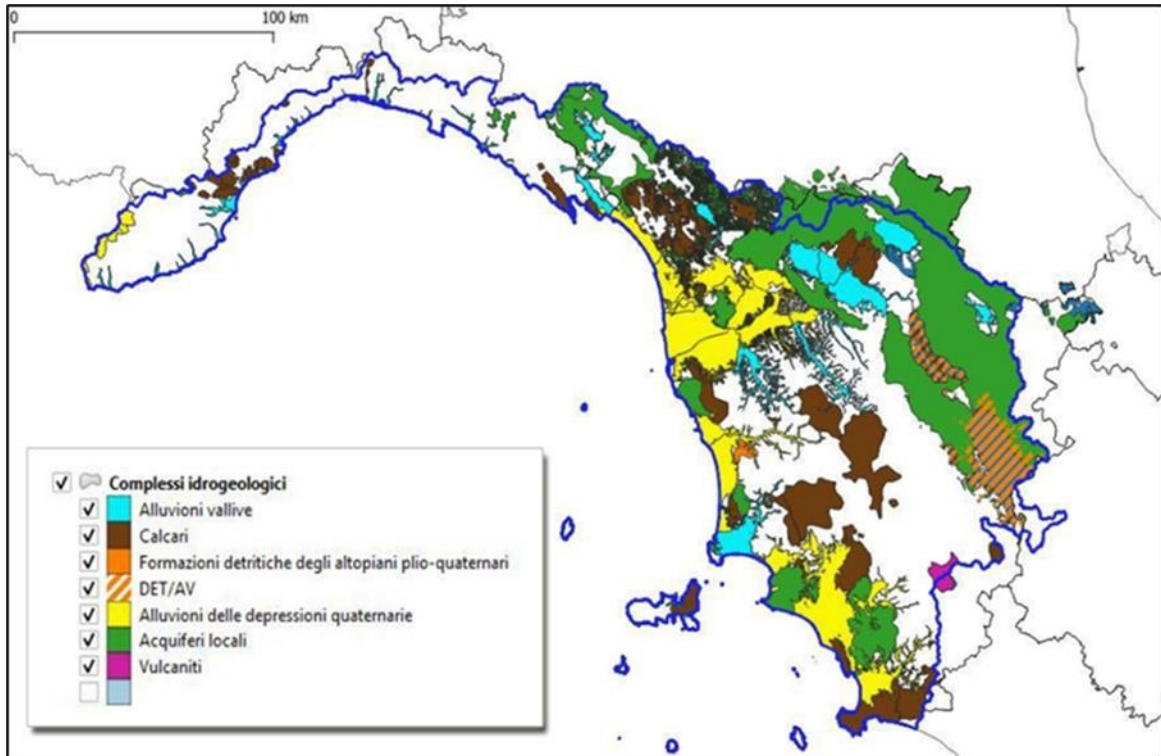


Figure 4-1 : Caractéristiques hydrogéologiques du district (source : Plan 2021/2027 du district des Apennins septentrionaux).

Comme le montre la figure 4-2, le district des Apennins septentrionaux est divisé en complexes hydrogéologiques, et la zone en question fait partie des « complexes alluviaux de remplissage des bassins péri-tyrrhéniens », qui représentent une composante importante de l'hydrogéologie de la zone côtière toscane.

Ces complexes sont constitués de dépôts sédimentaires alluviaux qui se sont accumulés au fil du temps dans les bassins péri-tyrrhéniens, c'est-à-dire ceux situés dans les zones côtières adjacentes à la mer Tyrrhénienne. La formation de ces dépôts est le résultat de processus fluviaux et marins qui ont conduit au transport et au dépôt de sédiments provenant des montagnes environnantes et des plateaux continentaux.

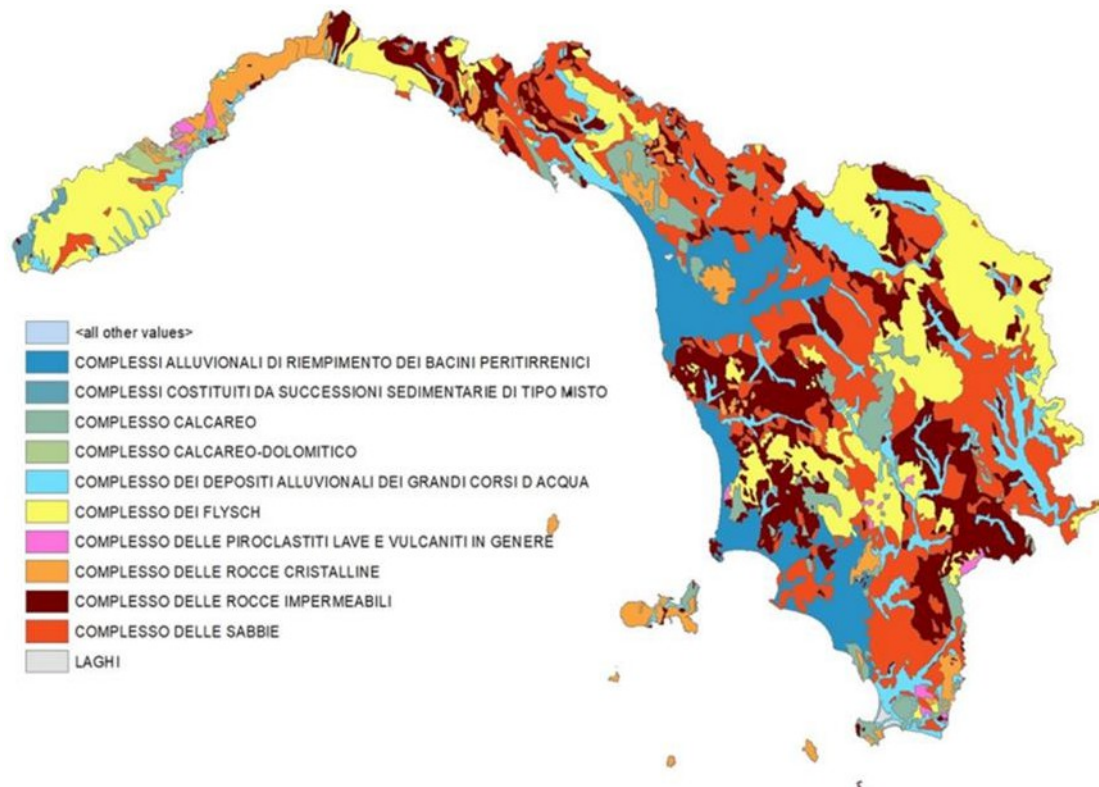


Figure 4-2 : Complexes hydrogéologiques du district des Apennins septentrionaux (source : Plan 2021/2027 du district des Apennins septentrionaux).

Les études et observations menées sur le territoire depuis 1974 fournissent une connaissance détaillée de la structure hydrogéologique de la zone d'étude, qui comprend toute la plaine côtière et la vallée alluviale du fleuve Fine.

Selon les recherches menées (Bartoletti E. et al. 1985 ; Squarci P et al. 1986), la zone présente deux systèmes aquifères distincts : un système multicouche, situé dans les sédiments détritiques grossiers perméables du Pléistocène marin, tant au nord qu'au sud de la plaine alluviale du fleuve Fine, et un autre présent dans les graviers à la base des sédiments fluviaux de remplissage de la paléo-vallée du fleuve Fine.

Le niveau de base des deux systèmes est constitué par les argiles marines imperméables du Pléistocène inférieur, qui forment un horizon continu sous la plaine de Rosignano Solvay et de Vada. La configuration du toit de cet horizon imperméable a une influence significative sur l'équilibre hydrogéologique de toute la zone étudiée.

Du point de vue de l'hydrographie de surface, le principal cours d'eau de la zone est le fleuve Fine, qui reçoit de nombreux affluents tant sur la rive droite que sur la rive gauche. Dans le passé, avant l'intervention humaine, les eaux de ruissellement se répandaient librement sur de vastes surfaces.

Cependant, les interventions anthropiques ont radicalement modifié ce scénario, en canalisant les eaux dans des « botri » artificiels afin d'améliorer leur écoulement et de garantir une gestion plus efficace des ressources hydriques.

Pour plus d'informations sur l'hydrogéologie de la région, consultez le « Rapport hydrogéologique et hydraulique ATI-ING-VIA-RELIDR-R03-00 », un document qui fournit un aperçu détaillé des caractéristiques hydrogéologiques, de l'utilisation des ressources en eau et des problèmes potentiels liés à la gestion de l'eau dans la région considérée.

Titre du document	Date	Auteur	Contrôlé par	Statut	Page65 sur 75	 atis
ATI-ING-VIA-RELGEO-R02-00	30/09/2024	Montana	Eni Plenitude	Final		

5 Analyse des contraintes

5.1 Risques géomorphologiques

Les délibérations du Conseil régional de janvier 2005 ont donné naissance aux Plans d'aménagement hydrogéologique (PAI) pour les anciens bassins régionaux toscans, tels que le bassin de la Toscane nord, le bassin de l'Ombrone et le bassin de la Toscane côtière. Ces plans sont toujours en vigueur et, depuis février 2017, la responsabilité qui en découle a été transférée à l'Autorité du bassin du nord des Apennins, conformément au décret ministériel de 2016.

La cohérence entre les normes des plans des différents bassins régionaux est remarquable, avec un impact particulier sur les zones classées comme présentant un risque PFE (risque d'érosion) et PFME (risque morphologique évolué) dans la cartographie des risques géomorphologiques.

Dans le cadre défini par l'autorité du bassin de l'Apennin septentrional, le Plan de bassin du district hydrographique offre une vision globale de la gestion des risques liés aux déséquilibres géomorphologiques. Cette initiative, le PAI, se présente comme une réponse stratégique à la nécessité de comprendre et d'atténuer les dangers associés à ces phénomènes dans la zone de compétence.

La Toscane, qui prédomine dans le district, occupe environ 83 % de la superficie, tandis que l'Ombrie n'y contribue que de manière marginale, ne représentant que 0,6 % de la partie orientale du bassin de l'Arno. En outre, une partie de l'ancien bassin interrégional du Magra, partagé avec la Ligurie, est incluse dans le territoire toscan. En décembre 2019, le projet de plan PAI a été approuvé, axé principalement sur les bassins de l'Arno et du Serchio, ainsi que sur les anciens bassins régionaux toscans.

Ce projet couvre environ 80 % de l'ensemble du territoire du district et 97 % des territoires toscans du district, à l'exception des communes du bassin du Magra. Ces plans PAI définissent les différentes classes de dangerosité pour les risques géomorphologiques, avec une attention particulière aux glissements de terrain, tant actifs que dormants, et à d'autres formes de risques non actifs. Conformément à la nouvelle définition du district hydrographique des Apennins septentrionaux, qui comprend les bassins hydrographiques de l'Arno, du Serchio et du Magra, ainsi que les bassins régionaux de la Ligurie et de la Toscane, des critères méthodologiques ont été établis pour évaluer les risques et adopter des mesures préventives et de gestion des risques.

À cet égard, la zone concernée par le projet « Atis » ne se trouve pas dans une zone à risque, comme le montre la figure 5-1. Toutefois, pour être complet, il convient de signaler que le long de la rive nord du fleuve Fine, une zone caractérisée par un danger très élevé (P4) et un risque modéré (R1) et moyen (R2) se trouve à une distance minimale d'environ 25 m du tracé de la canalisation, au niveau de la Via per Rosignano (Figure 5-1 et Figure 5-2, encadré n° 2) et une zone caractérisée par un danger élevé de type a (P3a) et un risque élevé (R3), moyen (R2) et modéré (R1) qui longe la canalisation terrestre à environ 1,5 km de distance maximale de la station électrique onshore (Figure 5-1 et Figure 5-2, encadré n° 3).

Bien que le reste du tracé du conduit et la sous-station électrique terrestre soient à l'abri de ces phénomènes, la zone reste ponctuellement exposée à des risques importants de déséquilibres géomorphologiques, ce qui nécessite une attention constante et des mesures préventives adéquates pour garantir la sécurité des personnes et des biens dans la zone concernée.

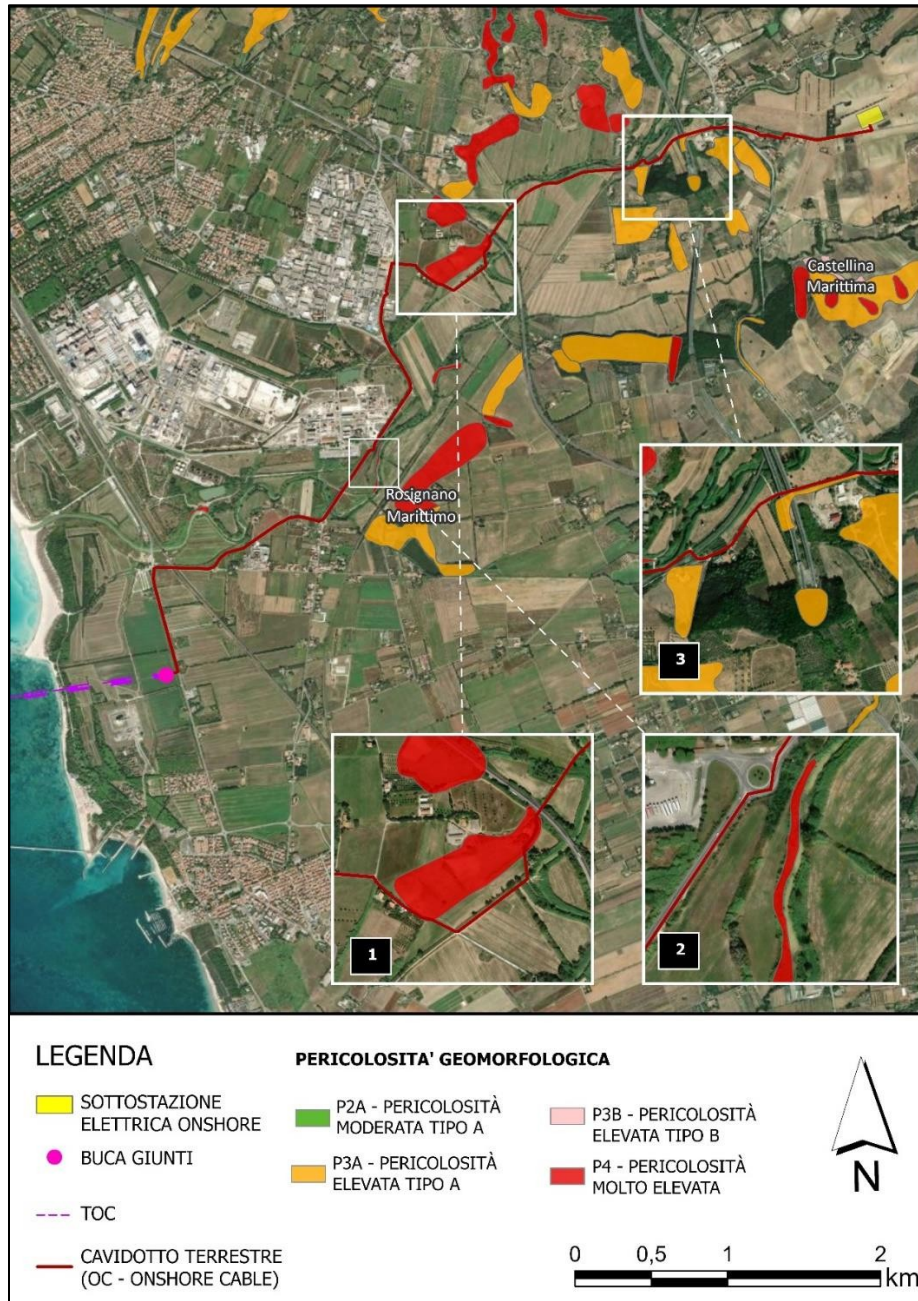


Figure 5-1 : Carte des risques géomorphologiques de l'Autorité du bassin du district nord.

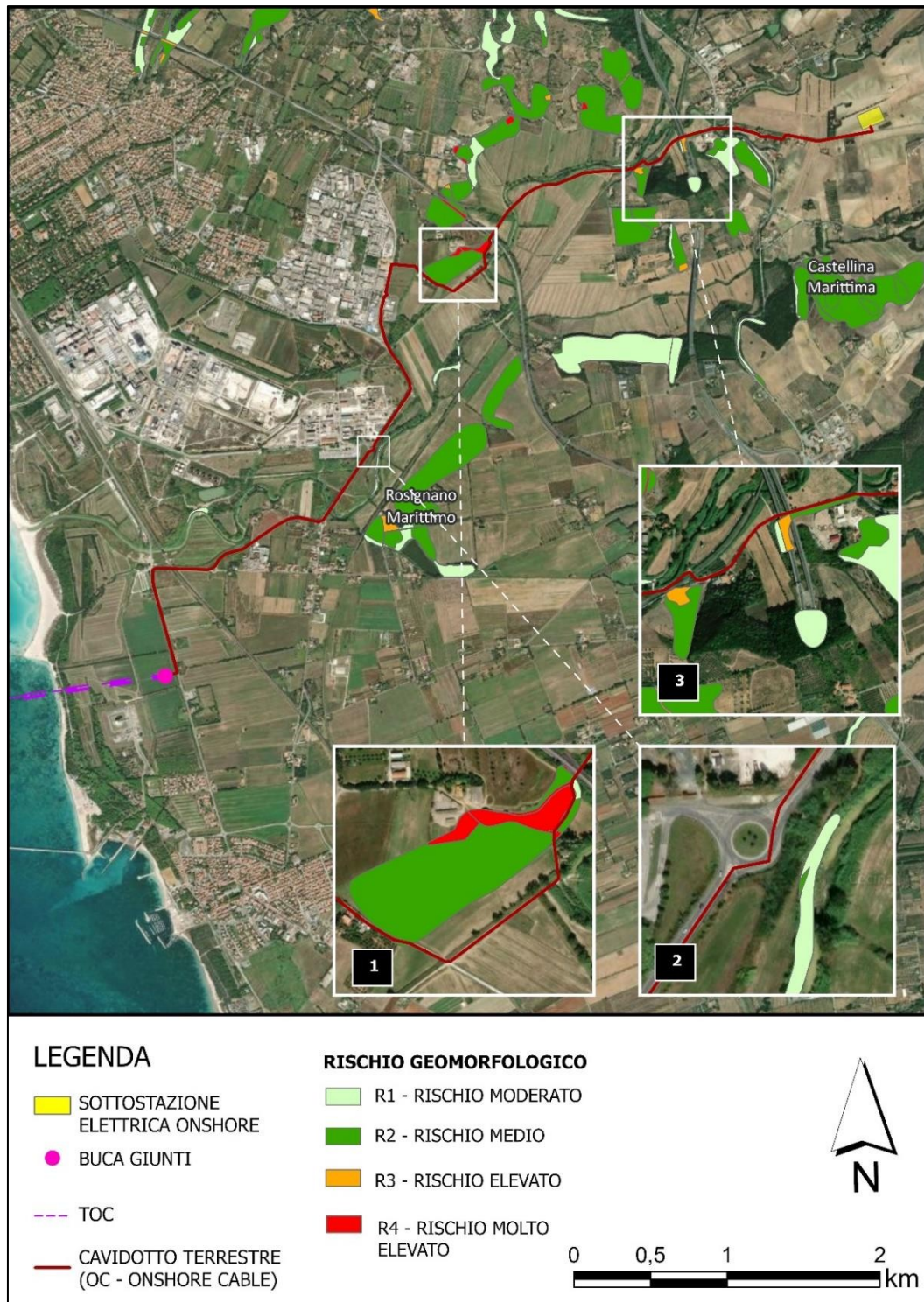


Figure 5-2 Zones à risque géomorphologique dans la zone du conduit terrestre (Source : PAI « Instabilités géomorphologiques »)

6 Risque sismique

Le Document d'information sur les risques sismiques - 2016 (DCRS2016), adopté par la délibération G.R.T. 1271/2016, a introduit, pour la première fois en Toscane, une méthodologie rapide pour l'évaluation des risques sismiques à l'échelle territoriale.

Cette méthodologie prévoit la subdivision des communes en quatre classes de risque sismique, ainsi que la carte correspondante. Les détails de la méthodologie sont décrits au paragraphe 1.1.2 du DCRS2016, qui constitue l'annexe 2 de la délibération G.R.T. 1271/2016.

Dans le cadre de l'approbation des plans opérationnels et de leurs variantes générales, la Toscane se distingue comme le premier cas en Italie à avoir réglementé les directives et les critères pour l'identification des classes de risque sismique dans les zones urbanisées. Cela a été fait selon la méthodologie développée par le Secteur Sismique - Prévention Sismique de la Région Toscane, transposée dans le Règlement 5/R du 30 janvier 2020, acte d'application de l'article 104 de la loi régionale 65/2014. Les détails de cette méthodologie sont inclus dans l'annexe technique 1 de la délibération n° 31/2020.

Le Plan de classification des risques sismiques (PCM) n° 3519/2006 a divisé le territoire national en quatre zones sismiques, en se basant sur la valeur de l'accélération horizontale maximale (a_g) sur un sol rigide ou plat, avec une probabilité de 10 % d'être dépassée en 50 ans. Les critères de mise à jour de la carte des risques sismiques ont été définis dans l'ordonnance n° 3519 (tableau 6.1).

Tableau 6.1 : Classification des zones sismiques

Zone sismique	Description	Accélération avec une probabilité de dépassement de 10 % en 50 ans [a_g]	Accélération horizontale maximale conventionnelle (normes techniques) [a_g]
1	Indique la zone la plus dangereuse, où peuvent se produire de très forts tremblements de terre.	$0,25 < a_g \leq 0,35$ g	0,35 g
2	Zone où peuvent se produire de forts tremblements de terre.	$0,15 < a_g \leq 0,25$ g	0,25 g
3	Zone pouvant être soumise à de forts séismes, mais rares.	$0,05 < a_g \leq 0,15$ g	0,15 g
4	Il s'agit de la zone la moins dangereuse, où les tremblements de terre sont rares et où les régions ont la faculté d'imposer l'obligation de conception antisismique.	$a_g \leq 0,05$ g	0,05 g

Dans le cadre de la classification sismique, les communes de Rosignano Marittimo et Castellina Marittima relèvent de la zone 3, caractérisée par un risque sismique moyen à faible. Cette classification se base à la fois sur la classification sismique nationale (ordonnance du PCM n° 3519/2006) et sur la classification sismique régionale (délibération GRT n° 421 du 26/05/2014).

En cas de séisme probable, l'accélération maximale attendue du sol, avec une probabilité de dépassement de 10 % en 50 ans, est comprise entre 0,75 g et 0,10 g. Figure 6-1.

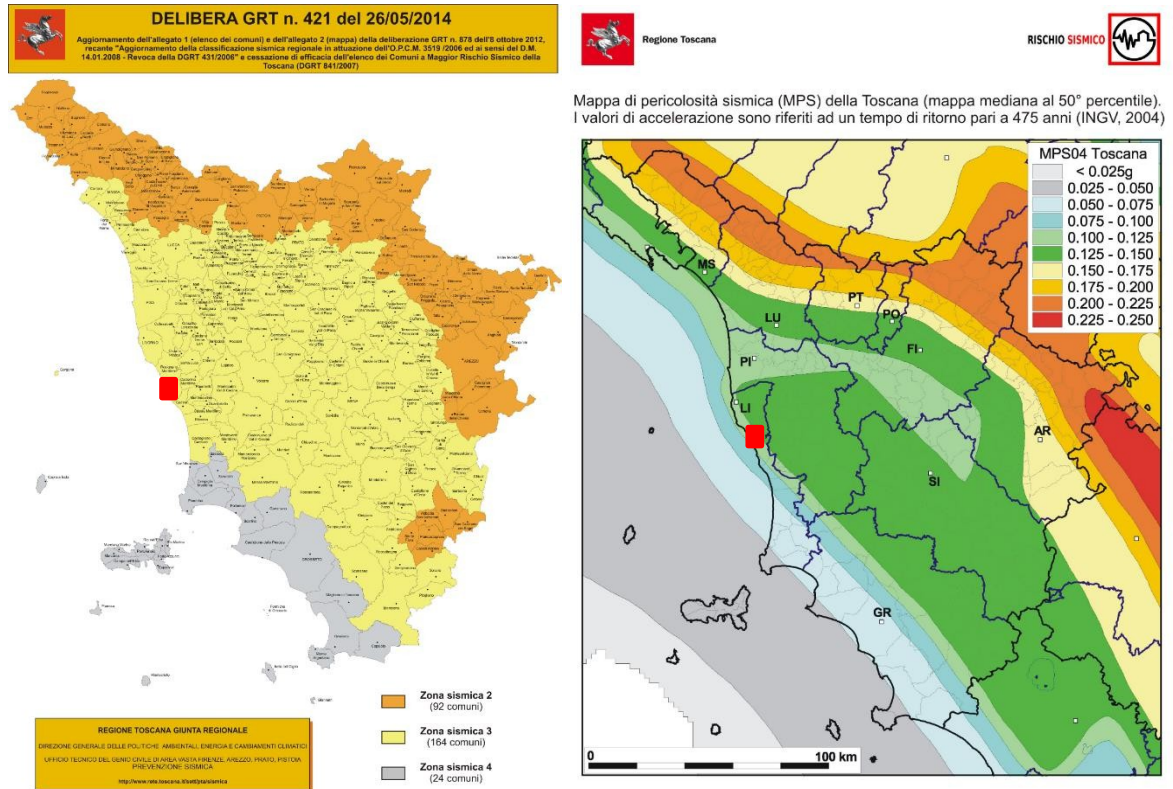


Figure 6-1 : Classification sismique de la région Toscane (à gauche) et carte de la dangerosité sismique (à gauche).

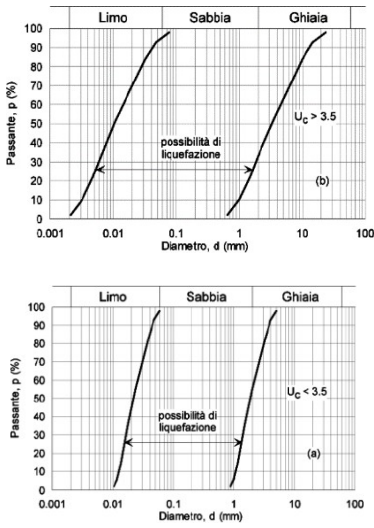
6.1 Phénomènes de liquéfaction

La liquéfaction est la condition dans laquelle un sol perd presque complètement sa résistance au cisaillement et adopte un comportement similaire à celui d'un liquide. Ce phénomène se produit principalement dans les sols meubles, tels que le sable fin, situés dans la nappe phréatique et dans les quinze premiers mètres de profondeur. Dans des conditions normales, en l'absence d'événements sismiques, un sol meuble situé à une certaine profondeur par rapport au niveau du sol n'est soumis qu'à la pression lithostatique résultant du poids des sols sus-jacents.

Lors d'un tremblement de terre, le sol meuble subit des contraintes de cisaillement cycliques dues à la propagation des ondes sismiques vers la surface, tandis que la pression lithostatique reste constante. En outre, le sous-sol peut déjà être soumis à des contraintes de cisaillement statiques en raison de surcharges appliquées à la surface (telles que des constructions) ou en raison de sa position dans la morphologie locale (au pied ou le long d'un versant).

La probabilité d'une liquéfaction dépend non seulement des caractéristiques du séisme, mais aussi de l'interaction entre les contraintes de cisaillement induites par le séisme et celles déjà existantes. La liquéfaction dépend également des conditions de compactage du sol, de ses caractéristiques granulométriques, des conditions de drainage et de son histoire géologique et sismique. La vérification de la liquéfaction peut être omise lorsqu'au moins une des circonstances illustrées dans le tableau 6.2 est vérifiée.

Tableau 6.2 : Vérification d'exclusion de la liquéfaction

Condition	État de vérification
<p>Accélérations maximales attendues au niveau du sol en l'absence de constructions (conditions de champ libre) inférieures à 0,1 g (ag).</p>	<p>VÉRIFIÉ</p>
<p>Profondeur moyenne saisonnière de la nappe phréatique supérieure à 15 m par rapport au niveau du sol, pour un niveau du sol subhorizontal et des structures avec fondations superficielles (mesure se référant à la valeur moyenne saisonnière).</p>	<p>-</p>
<p>Dépôts constitués de sables propres avec une résistance pénétrométrique normalisée $(N1)60 > 30$ ou $qc1N > 180$ où $(N1)60$ est la valeur de la résistance déterminée lors d'essais pénétrométriques dynamiques (Standard Penetration Test) normalisée à une tension effective verticale de 100 kPa et $qc1N$ est la valeur de la résistance déterminée lors d'essais pénétrométriques statiques (Cone Penetration Test) normalisée à une contrainte effective verticale de 100 kPa.</p>	<p>-</p>
<p>Distribution granulométrique en dehors des zones indiquées dans la figure 6-2(a) des NTC 2018 ci-dessous dans le cas de sols avec un coefficient d'uniformité $U_c < 3,5$ et dans la figure 6-2(b) dans le cas de sols avec un coefficient d'uniformité $U_c > 3,5$.</p> <p>(a) (b)</p>  <p>Figure 6-2 : Distribution granulométrique</p>	<p>-</p>

À la lumière de ce qui précède, étant donné que le sous-sol étudié se caractérise par la présence de sols meubles uniquement dans les tout premiers mètres, il est possible d'exclure la survenue de conditions favorables à la liquéfaction sur le site en question (paragraphe 7.11.3.4.2 – NTC 2018). Sur la base de ces caractéristiques, on peut exclure la possibilité de phénomènes de liquéfaction dans la zone en question.

Titre du document	Date	Auteur	Contrôlé par	Statut	Page72 sur 75	 atis
ATI-ING-VIA-RELGEO-R02-00	30/09/2024	Montana	Eni Plenitude	Final		

7 Conclusions

Le présent document constitue le rapport géologique du projet de parc éolien offshore flottant dénommé « Atis » situé dans la mer Ligure.

L'objectif principal était de fournir une analyse aussi détaillée que possible des caractéristiques géologiques, de la composition lithologique et des caractéristiques géomorphologiques et sismiques de la zone d'intérêt, afin de soutenir le développement du projet.

D'un point de vue géologique et lithostratigraphique, la zone onshore, tant en ce qui concerne le tracé des câbles que la station électrique, est principalement constituée de sols à texture sableuse granuleuse, caractérisés par des degrés de compactage variables. D'autre part, la zone offshore concernée par le projet est caractérisée par des dépôts sédimentaires. On observe notamment des sédiments boueux-sableux avec des zones limitées de roches semi-affleurantes ou affleurantes. Ces sédiments ont tendance à être principalement sableux près de la côte.

L'analyse de la cartographie disponible montre que la zone onshore n'est pas exposée à des risques importants liés aux glissements de terrain. En ce qui concerne la sismicité, la zone est classée en zone 3, caractérisée par un risque sismique moyen à faible. En outre, en ce qui concerne la partie onshore du projet, il a été possible d'exclure à titre préliminaire la vérification de phénomènes de liquéfaction.

En ce qui concerne les zones offshore du projet, les analyses menées montrent que :

- il existe de nombreuses fractures transversales à la surface de l'eau du parc éolien et au tracé du câble sous-marin ;
- la sismicité est faible, mais quelques tremblements de terre ont été enregistrés à proximité des zones du projet, la plupart près de la côte ou à terre ;
- d'après les données disponibles, il n'y a pas de présence de rochers, mais s'il y en avait, ils pourraient se trouver dans les canyons, au pied des zones élevées et dans la zone d'accostage ;
- une érosion et des glissements de terrain pourraient se produire le long du bord nord-est du plan d'eau, en raison de l'avancée d'un canyon, ainsi que des glissements de terrain le long du bord de l'Alto dans la partie sud du parc éolien, dans le canyon dans la partie centrale et dans la partie nord où se trouvent quelques reliefs ;
- en raison du peu de données sismiques disponibles, il n'a pas été possible d'évaluer le risque de gaz superficiel dans la zone, mais comme des volcans de boue et des pockmarks ont été signalés sur le plateau continental toscan, il est possible que du gaz peu profond soit présent dans la zone. Pour une analyse plus détaillée, veuillez vous référer aux rapports d'étude réf. ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00. ;
- Il pourrait y avoir des sédiments meubles dans la zone d'intérêt du plan d'eau et on signale un amoncellement de contourite dans la partie orientale de la zone ; il est probable que ces sédiments soient récents, mobiles et, à ce titre, qu'ils aient une faible force sédimentaire.

Les aspects susmentionnés ont été approfondis lors des enquêtes spécifiques au site, comme détaillé dans les rapports ATI-AMB-VIA-RILOFF-R17-00 et ATI-AMB-VIA-RILNRS-R18-00 ; par conséquent, des mesures d'atténuation appropriées seront prises lors de la planification et de la mise en œuvre du projet afin de gérer efficacement les risques identifiés.

Au cours de la phase de conception définitive et/ou exécutive, des études géognostiques spécifiques seront réalisées afin de caractériser les propriétés géologiques et géotechniques des terrains concernés par les travaux du projet, telles que (à titre d'exemple et sans que cette liste soit exhaustive) :

- des sondages géognostiques à carottage continu et prélèvement d'échantillons pour la réalisation d'analyses géotechniques en laboratoire ;
- enquêtes pénétrométriques sur site (par exemple CPT, DPSH, etc.) ;
- installation de piézomètres et relevés hydrogéologiques ;
- études géophysiques visant à définir le paramètre Vseq des terrains concernés par les travaux (MASW, HVSR, etc.).

En conclusion, le présent document, rédigé conformément aux normes techniques de construction (NTC 2018), a permis d'approfondir les connaissances sur les particularités géologiques, lithostratigraphiques, géomorphologiques et sismiques de la zone du projet, tant en ce qui concerne la partie offshore que la partie onshore, permettant ainsi d'en déterminer la faisabilité conformément à la réglementation en vigueur.

8 Bibliographie

Bulletin de la Société géologique italienne, 125 (2006), fasc. 3 273-291, 6-ff ;

Réseau européen d'observation et de données du milieu marin EMODnet : <https://emodnet.ec.europa.eu/en> ;

Landers Marine Institute (2023). Maritime Boundaries Geodatabase: Territorial Seas (12NM), version 4. Disponible en ligne à l'adresse <https://www.marineregions.org/>. <https://doi.org/10.14284/633> ;

MaGIC (Marine Geohazards along the Italian Coasts) : <https://github.com/pcm-dpc/MaGIC> ;

Portail cartographique ISPRA : <https://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/cartella-progetti-in-corso/suolo-e-territorio-1/progetto-carg-cartografia-geologica-e-geotematica/index> ;

Titre du document	Date	Auteur	Contrôlé par	Statut	
ATI-ING-VIA-RELGEO-R02-00	30/09/2024	Montana	Eni Plenitude	Final	Page 75 sur 75 