

Composante T1: Analyse transfrontaliere des mesures et du suivi pour la prevision de l'evolution morphodynamique des systemes cotiers

Activité T.1.2 - Planification des plans de suivi morphosédimentologique et biologique de la bande côtière

Produit T1.2.2 - Protocole méthodologique transfrontalier

Protocole méthodologique, contenant des indicateurs communs, pour la planification des plans de monitoring morphosédimentologique et biologique de la bande côtière

- 1. Climat Météo-marine**
- 2. Hautes côtes**
- 3. Plages**
- 4. Bassins hydrographiques**
- 5. Habitats marins côtiers**

Partner Responsable: Università di Firenze

Date: Février 2018

1. Climat Météo-marine

Contribution technique du partenaire LaMMA

1. Général

L'analyse critique des systèmes de monitoring et des type de données, réalisées dans le cadre de l'activité T1.1 du projet, avec une référence particulière à la connaissance du climat météo-marin, ont mis en évidence que en général les régions des territoires de coopération transfrontalière disposent déjà d'une multitude de méthodes de mesure, de données et de compétences pouvant répondre efficacement aux besoins non seulement des plans de monitoring, mais également des activités liées à la planification et à la gestion du littoral.

Il faut dire que ce patrimoine de méthodologies, de données et de compétences ne semble pas suffisamment partagé entre les différents territoires, ni même au sein des Régions, où souvent il n'existe pas de prise de conscience complète du potentiel d'information et de connaissance des bureaux et organismes.

Cela implique également que les développements méthodologiques soient souvent laissés à la volonté individuelle des institutions (souvent des instituts de recherche et des universités), qui les réalisent dans le cadre de leurs propres activités de recherche ou de service, sans les planifier sur la base des besoins réels.

Par exemple, dans la conception des ouvrages en mer, il est toujours utilisé, dans plusieurs bureaux de l'administration publique ou dans le cadre d'études techniques commandées à l'extérieur, l'adoption d'anciennes méthodologies d'estimation de la vague qui apparaissent aujourd'hui largement obsolètes et inadéquates à fin de disposer de données fiables et représentatives sur le domaine dans lequel les travaux sont réalisés.

Dans le cadre des activités du projet, à commencer par les fiches de suivi proposées aux régions, il a été proposé d'étendre l'activité initialement limitée au «mouvement des vagues», à toutes les données océanographiques physiques, en particulier celles liées à l'état de la mer, qui sont nécessaires à la réalisation des objectifs du projet.

Par conséquent, à partir des objectifs spécifiques du projet MAREGOT, il est considéré que les exigences - définies par les organismes chargés de la gestion et de la planification des territoires, y compris la planification et les études sur l'environnement côtier – doivent être décrites afin que les données (que nous définirons comme données météo-océanographiques) répondent aux différents besoins.

Les données météo-océanographiques doivent être conformes à des spécifications techniques, car elles sont nécessaires à la réalisation de certaines activités (surveillance, planification, études environnementales, protection civile, etc.).

Ces spécifications techniques ne sont pas nécessairement liées à la méthodologie particulière utilisée pour produire les données (par exemple, observations, modèles). La méthodologie sera spécifiée en détail et appliquée dans les zones pilotes, dans la composante suivante du projet (T2.2).

D'autre part, il est important de déterminer quelles sont les caractéristiques de la qualité des données (ou leur fiabilité, en cas de données prévisionnelles), à satisfaire car elles peuvent être utilisées pour les activités mentionnées ci-dessus.

Les données produites, en grande partie grâce à des systèmes de traitement numérique convenablement intégrés aux données d'observation, en fonction des différents besoins, peuvent être utilisées telles quelles ou permettre de produire de nouvelles données grâce à des systèmes de modélisation numérique à échelle côtière.

2 Les principaux indicateurs pour le monitoring de l'état de la mer; exigences techniques

2.1. Définition des objectifs

Le type et les caractéristiques des données de monitoring physique de la mer varient en fonction des objectifs spécifiques des activités à réaliser. Ceux-ci comprennent:

- interprétation de la dynamique des sédiments et des phénomènes d'érosion (qui sera ensuite détaillée dans T2.1.2 "Méthodologie du risque d'érosion" également en relation avec ce qui est produit dans l'activité T2.2 "Méthodologie des phénomènes liés à l'équilibre sédimentaire");
- la prévision des risques à long terme (liée aux mêmes phénomènes d'érosion et aux effets du changement climatique, y compris l'élévation du niveau moyen de la mer) ;
- la planification des interventions le long de la côte;
- produits d'exploitation (prévisions) pour la gestion des risques à court terme le long des côtes (détaillé au T2.1.1 "Méthodologie des marées de tempête" également en relation avec le produit en T2.5 "Gestion des risques côtiers") ;

Par rapport aux autres actions du projet, nous pouvons donc formuler une image des données nécessaires à la préparation des plans de monitoring, en distinguant les données relatives au mouvement des vagues des autres données météo-océanographiques:

Tableau 1 - Objectifs de monitoring de l'état de la mer

<i>Actes</i>	<i>Données de vague requises</i>	<i>Autres données de physique de la mer requises</i>
T2.2 "Méthodologie du bilan sédimentaire"	<ul style="list-style-type: none"> - séries historiques de vagues (spectres et paramètres de vague intégrés), à utiliser pour les modèles de transport solide côtier; - le <i>runup</i> des vagues. 	<ul style="list-style-type: none"> - séries historiques de données sur le niveau de la mer le long de la côte; - estimation du «<i>Sea Level rise</i>»; - courants côtiers; - le vent ; - courants côtiers à l'échelle régionale (pour les études de dispersion des sédiments)
T2.3 "Hautes côtes"	<ul style="list-style-type: none"> - séries historiques des vagues côtières à utiliser pour des études d'impact sur les hautes côtes; - statistiques de forme de vague; 	
T2.4 "Habitats et écosystèmes marins et côtiers"	<ul style="list-style-type: none"> - séries historiques de vagues à l'échelle côtière, à utiliser pour étudier l'impact sur les habitats et l'interaction avec les caractéristiques biologiques et écosystémiques de la côte; 	<ul style="list-style-type: none"> - séries historiques de données sur le niveau de la mer le long de la côte (estimation de la marée) - courants côtiers
T2.5 "Gestion des risques côtiers"	<ul style="list-style-type: none"> - prévisions météo-marines concernant les paramètres d'onde intégrés et non intégrés; - statistiques de forme de vague ; - <i>runup</i> de vague 	<ul style="list-style-type: none"> - prévisions des courants côtiers et <i>rip currents</i> - données sur le niveau de la mer le long de la côte

En ce qui concerne la conception des ouvrages de défense ou des interventions le long de la côte, les données nécessaires ne diffèrent pas de ce qui précède, il est nécessaire de disposer de séries historiques cohérentes de paramètres représentatifs des conditions locales: à partir de ces données les statistiques relatives aux vagues (normalement associées à un temps de retour donné) sont déduites pour être utilisées dans le dimensionnement des œuvres.

2.2 Type de données pour le monitoring météo-océanographique de la côte: systèmes d'observation, modèles

Les données météorologiques et océanographiques relatives à la mer le long des côtes sont normalement mesurées à l'aide d'instruments d'arpentage traditionnels in situ (bouées, courantomètres, marégraphes), par radar marin et, dans certains cas, par observations satellitaires (altimètre, diffusiomètre, etc.).

Il convient de souligner que la plupart des données disponibles aujourd'hui sont produites au moyen de modèles numériques prédictifs et rétrospectifs, d'analyses et de réanalyses (modèles dans lesquels les données observées sont assimilées).

Les données mesurées sont en tout cas nécessaires au traitement des statistiques, à la vérification et à la comparaison de la qualité des modèles numériques utilisés (validation), à l'étalonnage des modèles eux-mêmes et dans certains cas à leur assimilation dans les modèles de reconstruction météo-océanographique. Dans le cas des modèles de prévision, les données sont également nécessaires pour évaluer la fiabilité des prévisions.

Régionalisation des données

Les données de surveillance météo-océanographique doivent être représentatives des conditions locales le long de la côte, puis être accompagnées d'une résolution détaillée pouvant varier en fonction des caractéristiques géomorphologiques de la côte. Il est donc important de comprendre le niveau de détail requis par les activités de monitoring le long de la côte.

À titre d'information générale, on estime que les données à l'échelle du littoral devraient permettre de décrire la variabilité à plus petite échelle ou à moins de 1 km. Le choix de la résolution doit cependant être motivé par une analyse a priori concernant:

- la conformation de la côte;
- bathymétrie;
- les caractéristiques géomorphologiques et sédimentologiques de la côte;
- la présence de structures anthropiques;
- la présence de caractéristiques naturelles à préserver;
- etc.

Estimation de l'incertitude

Il est important que les données produites, en particulier dans le cas des modèles, présentent des caractéristiques de qualité pouvant être certifiées par une analyse a priori.

- Dans le cas de données d'analyses ou de «hindcast», il convient de disposer d'une caractérisation de l'erreur permettant d'évaluer la précision des systèmes de calcul adoptés ;
- Dans le cas de données prévisionnelles, la fiabilité de la prévision doit être évaluée en fonction des observations, ce qui est particulièrement important pour définir les seuils d'alerte / alarme qui doivent tenir compte de la marge d'incertitude prévue.

Partage de données

Il est nécessaire d'indiquer le degré d'utilisation des données produites par les organismes publics responsables et de fournir les données conformément aux normes d'interopérabilité définies au niveau communautaire.

Spécifications de données par niveau d'analyse

Une façon de définir les spécifications techniques des données de monitoring météo-océanographique est de les considérer par rapport aux objectifs préétablis (paragraphe 2.1): toutes les études ne nécessitent pas les mêmes données, il n'est donc pas possible d'ordonner des données spécifiques pour les études côtières sur la base de spécifications techniques définies « à priori » de manière univoque.

Il est également jugé utile de différencier chaque type de données, sur la base de deux niveaux distincts:

- a) *Niveau de base* - il s'agit du premier niveau de données, obtenu directement par des observations sur le terrain ou par la sortie de modèles numériques; les connaissances acquises à ce niveau permettent également d'autoriser d'autres méthodes d'acquisition (par exemple, lorsque les données sont utilisées comme condition limite d'un modèle qui produit d'autres données à l'échelle de détail).
- b) *Niveau avancé* - c'est un niveau de données qui ne peut être séparé des informations acquises au niveau de base. Ces dernières sont traitées pour produire des informations de résolution / détail supplémentaires ou supérieures.

Pour certaines études, une simple analyse du climat météo-marine peut suffire, fournissant des données récapitulatives sur les vagues, telles que la hauteur des vagues, la direction et la période.

Dans le but d'utiliser ces données dans la planification ou dans les analyses de risque, il est nécessaire de disposer de longues séries historiques de données (pas moins de 20 à 30 ans de données), alors que dans d'autres cas, lorsque cela n'est pas nécessaire pour étudier les extrêmes mais les conditions "moyennes" sont plus intéressantes, une simple analyse de table peut suffire, regroupant par exemple, en ce qui concerne les vagues, les données de fréquence, d'intensité et de direction des paramètres examinés.

Tableau 2 - Paramètres de mouvement des vagues

<i>Niveau de détail</i>	<i>Type de données</i>	<i>Mode de mesure</i>	<i>Résolution spatiale</i>	<i>Résolution de temps</i>	<i>Longueur des séries historiques aux fins du traitement statistique</i>

<i>Niveau de base</i>	Hs Dp Tp Spectre d'énergie	1) <i>in situ</i> : bouées ou mesures indirectes par <i>wave radar</i> ; 2) modèles de hindcast/forecast des vagues	< 1 km	Min. 3 h.	20-30 ans
<i>Niveau avancé</i>	Hauteur des vagues au frangimento (Hb) <i>Run up</i> <i>Setup</i> de vague Courants côtiers	1. observations visuelles, webcam ; 2. modèles de mouvement de vagues côtières	50-100 m	Min. 1- 3 h.	2-5 ans

Les paramètres de la houle requis pour les études côtières sont présentés dans le tableau 2. La connaissance de ces données au niveau de base permet ensuite, à l'aide de modèles de calcul, d'obtenir des informations détaillées à l'échelle côtière (niveau avancé) grâce à des méthodologies de régionalisation des données. De cette manière, il est possible de déterminer les paramètres normalement utilisés dans les études côtières, tels que:

- la hauteur des vagues à la rupture Hb (utilisée par exemple dans de nombreuses formules " bulk" liées au transport solide potentiel côtier)
- le *runup* des vagues (augmentation maximale de la vague sur la plage)
- le *setup* des vagues (remontée du niveau moyen de la mer sur la plage)
- les courants côtiers (normalement fournis dans la composante long- shore et cross-shore)

Tableau 3 - Paramètres météo-océanographiques

<i>Niveau de détail</i>	<i>Type de données</i>	<i>Mode de mesure</i>	<i>Résolution spatiale</i>	<i>Résolution de temps</i>	<i>Longueur des séries historiques aux fins du traitement statistique</i>
<i>Niveau de base</i>	Débits de masse, énergie, élan sur la surface de la mer. Données sur le vent. Écoulement des fleuves	1a) <i>in situ</i> : stations hydro-thermo-pluviométriques, hydromètres, mesures de niveau ou de débit ; 1b) satellites	1-10 km	Min. 1 h	3-10 ans

		2) modèles <i>hindcast/forecast</i> météorologique et hydrologique			
<i>Niveau avancé</i>	Produits de l'océanographie côtière à l'échelle régionale (vagues, courants, température, niveaux, salinité)	1) Série historique de données in situ et par satellite ; 2) <i>Forecast</i> des modèles climatiques globaux	1-10 km	Min. 1 h	3-10 ans

Les paramètres météorologiques et océanographiques sont indiqués dans le tableau 3. Normalement, sauf dans le cas de l'énergie éolienne, ils n'ont pas d'intérêt pour eux-mêmes (du moins au niveau local) mais sont utilisés pour forger des modèles de circulation régionale et côtière (niveau avancé) pouvant fournir des informations utiles sur le transport des sédiments à l'échelle régionale.

Tableau 4 - Données du niveau de la mer

<i>Niveau de détail</i>	<i>Type de données</i>	<i>Mode de mesure</i>	<i>Résolution spatiale</i>	<i>Résolution de temps</i>	<i>Longueur des séries historiques aux fins du traitement statistique</i>
<i>Niveau de base</i>	Mesures de niveau Courants géostrophiques	1) in situ (marégraphes) ou satellite 2) modèles hydrodynamiques à l'échelle du bassin et de la région, y compris la description de la marée astronomique	1-10 km	Min. 1 h	5-10 ans
<i>Niveau avancé</i>	Informations climatologiques (SLR - évolution du climat météo-marin)	1) Série historique de données in situ et par satellite 2) <i>Forecast</i> des modèles climatiques	10-100 km	Min. 1 an	30-50 ans

		globaux			
--	--	---------	--	--	--

Enfin, les paramètres du niveau de la mer sont affichés dans le tableau 4. Ils peuvent être utilisés pour déduire des informations à grande échelle (structures de circulation), mais l'analyse temporelle historique peut fournir des informations importantes sur les tendances, par exemple liées à l'élévation du niveau moyen de la mer ou Sea Level Rise (SLR).

Exigences techniques des données météo-océanographiques pour le monitoring des côtes

Les données météo-océanographiques présentant un intérêt pour le monitoring côtier sont définies au niveau international. La définition de certains de ces paramètres a été actualisée au fil du temps, par exemple, le concept de hauteur de vague significative, se référant à un état de la mer caractérisé par une onde régulière unique «énergétiquement équivalente» au niveau de la mer constitué d'ondes irrégulières et multidirectionnelles, a été initialement déterminé comme la moyenne du tiers des vagues les plus hautes ($H_{1/3}$), alors que nous préférons aujourd'hui le définir sur la base du spectre d'énergie des vagues (H_{m0}). En réalité, de nombreux paramètres supplémentaires sont utilisés dans de nombreuses études sur la dynamique des côtes ou dans la conception d'ouvrages en mer, par exemple $H_{1/10}$ (moyenne du dixième de la hauteur des vagues les plus hautes), $T_{1/10}$ (moyenne du dixième de la période associée aux vagues les plus hautes), inclinaison de la vague, propagation angulaire, etc.

Par la suite, nous nous référons uniquement aux normes définies par l'Organisation météorologique mondiale (World Meteorological Organisation - WMO) <https://www.wmo-sat.info/oscar/>.

Les spécifications définies par le WMO concernent avant tout les produits issus de l'observation de la Terre (observation in situ et observation à distance), mais les caractéristiques requises pour ces mêmes paramètres peuvent être adaptées au littoral après modification des spécifications techniques requises pour les données, qui proviennent principalement de modèles de calcul correctement intégrés aux données in situ et par satellite.

Par conséquent, dans le tableau 5, les définitions de paramètres apparaissent conformément au WMO. En reprenant les trois types de données décrits dans le paragraphe précédent, nous avons défini: un niveau 1 (lié aux paramètres des vagues, qui sont normalement les plus demandés dans la zone côtière), un niveau 2 (paramètres météo-océanographiques permettant modèles hydrodynamiques régionaux et côtiers), niveau 3 (niveau de la mer). Ces niveaux ne sont pas répertoriés en fonction de leur priorité, car dans certaines

études, par exemple à l'échelle du port ou dans le lagon, les études réalisées sur le niveau de la mer mesurés par des marégraphes peuvent être plus pertinentes comparés à d'autres paramètres.

Tableau 5 - Définition des paramètres météo-océanographiques sur la base des spécifications du WMO

<i>Variable</i>	<i>Nom synthétique</i>	<i>Unité de mesure</i>	<i>Description</i>	<i>Niveau</i>
Hauteur de vague significative	H_s	m	Traditionnellement définie comme l'amplitude moyenne de la troisième des ondes les plus hautes, ou $H_{1/3}$. Au lieu de $H_{1/3}$, il est souvent préférable de le remplacer par H_{m0} qui est quatre fois la racine carrée du moment d'ordre zéro du spectre d'énergie. La différence entre $H_{1/3}$, qui exprime un concept purement statistique et H_{m0} , qui représente un équivalent énergétique, est pratiquement négligeable.	1 vagues
Direction des vagues dominante	D_p	degrés	C'est la direction de l'onde la plus énergétique du spectre, également appelée direction du pic (direction associée au pic de l'énergie de l'onde). Dans le cas du spectre multimode, il peut être utile d'associer la direction moyenne de l'onde à la direction du pic, définie comme la moyenne pondérée de toutes les directions des vagues représentant l'état de la mer.	1 vagues
Période de vague dominante	T_p	s	La période de l'onde la plus énergétique dans le spectre des ondes, également appelée période de pointe. Dans le cas du spectre multimodal, il peut être utile d'associer la période d'ondes moyenne à la période de pointe, définie comme la moyenne pondérée de toutes les périodes de vagues représentant l'état de la mer.	
Spectre d'énergie de fréquence	$S(f)$	$m^2 Hz^{-1}$	Variable 1D, souvent appelé "spectre d'onde" unidimensionnel. Décrit l'énergie de l'onde dans chaque bande de fréquences (par exemple, 25 bandes de fréquences)	

			quel que soit le sens de propagation	
Spectre d'énergie directionnel en fréquence	$S(f, \theta)$	$m^2 Hz^{-1} rad^{-1}$	Variable 2D qui est souvent appelé "spectre d'onde" directionnel. Décrit l'énergie ondulatoire se propageant dans chaque bande directionnelle $\Delta\theta$ et dans la bande de fréquence Δf (par exemple, 24 secteurs d'azimut distincts ayant chacun une largeur de 15° et 25 bandes de fréquence)	1 vagues
Intensité des précipitations à la surface	P	mm / h	Intensité de précipitation qui atteint la surface de la mer	2 météo-océan
Débit massique à la surface de la mer	SMF	mm / h	Débit massique à la surface de la mer, autrement défini comme la différence entre l'évaporation et la précipitation (E-P)	2 météo-océan
Flux thermique radiatif de surface	SHF	$W m^{-2}$	Flux thermique radiatif de surface	2 météo-océan
Salinité de la surface de la mer	SSS	psu	Salinité de l'eau de mer dans la couche superficielle (supérieure à ~ 1 m observée en MW). En pleine mer, le terme correct devrait être "alinité" en référence à la diversité des sels impliqués.	2 météo-océan
Température de surface de la mer	SST	$^\circ K$ o $^\circ C$	Température de l'eau de mer en surface La température "en vrac" se réfère à la profondeur d'environ 2 m, la température "de peau" se réfère à la couche de surface de 1 mm d'épaisseur.	2 météo-océan
Pression atmosphérique en surface	$p(0)$	hPa	Pression de la colonne d'air mesurée à 2 m au-dessus de la surface de la mer	2 météo-océan
Vent peu profond	WV	ms^{-1}	Composante horizontale (2D) du vecteur de vitesse du vent (3D) mesurée classiquement à 10 m de	2 météo-océan

			hauteur.	
Courants de surface (vector)		cm s-1	Vitesse du courant marin mesurée à la surface de la mer	2 météo-océan
Anomalie du niveau de la mer		cm	Une anomalie dans la hauteur de la surface de la mer, mesurée comme la différence entre la meilleure estimation de la hauteur de la surface de la mer observée par le satellite et la hauteur moyenne de la surface de la mer	3 niveaux
Topographie dynamique océanique		cm	Déviation du niveau de la mer par rapport au géoïde causée par les courants océaniques (après correction des effets des marées et de la pression atmosphérique)	3 niveaux

Les données de niveau 1, liées aux ondes, comprennent à la fois des paramètres d'onde «synthétiques» ou intégrés et les spectres d'énergie des vagues (1D et 2D) à partir desquels il est possible de déduire tous les autres paramètres. Notez que, en particulier pour les activités nécessitant l'utilisation de modèles à l'échelle locale, les informations spectrales sont plus correctes et complètes et doivent être spécifiées en priorité.

Les données de niveau 2, que nous avons définies comme paramètres météo-océanographiques, comprennent des paramètres météorologiques (vent, pression, rayonnement solaire, etc.) qui peuvent être intéressants en soi, mais peuvent également être utilisés pour forger des modèles hydrodynamiques et de mouvement des vagues. Les paramètres océanographiques tels que les courants de surface, la température et la salinité sont obtenus principalement par des modèles ou par des observations de surface (par exemple, radar HF, données satellitaires, etc.). La connaissance détaillée de ces paramètres à l'échelle régionale et côtière, ainsi que d'autres paramètres non mentionnés ici (turbidité, concentration de sédiments, etc.) permettent de mener des études sur l'influence des cours d'eau terrestres dans l'alimentation des côtes.

Les données de niveau 3 (niveaux) sont requises à la fois dans le cadre d'études spécifiques le long des côtes ou pour une circulation à l'échelle régionale, et pour des études climatologiques liées à l'élévation du niveau moyen de la mer.

Les paramètres définis par le WMO sont ensuite classés en fonction d'objectifs tels que les caractéristiques techniques des données (fréquence temporelle à laquelle les données sont fournies, résolution) et la fiabilité, généralement appelée incertitude. Pour chacun de ces trois caractéristiques, des seuils sont définis.

- **Seuil d'objectif**: il s'agit de l'exigence "idéale" qui, si elle est atteinte, ne nécessiterait aucune amélioration

supplémentaire des modèles et des systèmes d'observation.

- **Seuil d'acceptabilité:** c'est le minimum requis pour garantir que les données sont utiles.

- **Seuil d'amélioration:** il s'agit d'un niveau intermédiaire entre l'objectif et le seuil d'acceptabilité. Si elle est atteinte, on peut dire qu'elle a permis une amélioration significative des procédures de production de certaines données. À certains égards, le seuil d'amélioration pourrait être considéré comme un niveau

optimal du point de vue d'une analyse coûts-avantages lors de la planification ou de la conception d'un système d'observation.

Tab. 6 - Exigences techniques des données météo-océanographiques basées sur les spécifications du WMO, modifiées en fonction des besoins des systèmes d'observation et de modélisation à l'échelle côtière.

Variable	Incertitude			Résolution horizontale:			Fréquence:		
	- cible	- seuil d'amélioration	- seuil d'acceptabilité	- cible	- seuil d'amélioration	- seuil d'acceptabilité	- cible	- seuil d'amélioration	- seuil d'acceptabilité
Hauteur de vague significative	0.1 m	0.25 m	0.50 m	0.1 km	1 km	10 km	15 min	60 min	3 h
Direction des vagues dominante ou maximale	10°	20°	30°	0.1 km	1 km	10 km	15 min	60 min	3 h
Période de vague dominante ou maximale	0.1 s	0.5 s	1 s	0.1 km	1 km	10 km	15 min	60 min	3 h
Spectre d'énergie des ondes 1D	0.1 m ² . Hz ⁻¹	0.15 m ² . Hz ⁻¹	0.2 m ² . Hz ⁻¹	1 km	10 km	25 km	15 min	60 min	3 h
Spectre directionnel d'énergie des ondes	0.1 m ² . Hz ⁻¹ . rad ⁻¹	0.15 m ² . Hz ⁻¹ . rad ⁻¹	0.2 m ² . Hz ⁻¹ . rad ⁻¹	1 km	10 km	25 km	15 min	60 min	3 h
Intensité de précipitation	0.2 m/h	0.5 mm/h	2 mm/h	1 km	5 km	25 km	30 min	3 h	12 h
Flux de chaleur total sur la surface libre	10 W/m ²	20 W/m ²	50 W/m ²	2 km	10 km	25 km	1 h	3 h	24 h
Débit massique total sur la surface libre	0.1 mm/h	0.5 mm/h	1 mm/h	2 km	10 km	25 km	1 h	3 h	24 h

Salinité de surface de la mer	0.05 psu	0.1 psu	0.2 psu	0.5 km	1 km	10 km	1 h	3 h	24 h
Température de surface de la mer	0.1 K	0.5 K	1 K	0.5 km	1 km	10 km	1 h	3 h	24 h
Pression de surface	1hPa	5 hPa	10 hPa	2 km	10 km	25 km	1 h	3 h	6 h
Vent peu profond	0.5 m/s	2 m/s	5 m/s	2 km	10 km	25 km	30 min	1 h	6 h
Courant marin de surface (vecteur)	5 cm/s	10 cm/s	20 cm/s	0.5 km	2 km	5 km	1 h	3 h	12 h
Anomalie du niveau de la mer (SSA)	0.03 m	0.07 m	0.1 m	1 km	5 km	20 km	1 h	12 h	24 h
Topographie dynamique océanique	1 cm	3 cm	10 cm	0.1 km	0.5 km	10 km	1 h	12 h	24 h

2.3. Spécifications sur les données nécessaires à la mise en œuvre de modèles à l'échelle côtière

De nombreuses applications et services côtiers reposent sur la mise en œuvre de modèles de calcul à l'échelle du littoral, qui sont normalement utilisés à diverses fins et objectifs dans le cadre général de la Gestion Intégrée des Zones Côtières. Les principaux objectifs de ces modèles sont les suivants:

- la transposition du climat des vagues (du large au littoral);
- la caractérisation de l'hydrodynamique et du mouvement des vagues à l'échelle côtière, visant le transport des sédiments, la conception et l'évaluation de l'impact environnemental des travaux en mer, les études morphodynamiques à l'échelle côtière;
- la quantification de l'impact des vagues sur la côte (runup, flooding), à des fins de gestion des risques;
- les applications de wáter quality à l'échelle côtière (pour la mise en œuvre de directives européennes telles que la directive-cadre sur l'eau, la directive sur la baignade ou la Stratégie Marine).

Les modèles requièrent, normalement, des conditions aux limites "larges" (sur le bord offshore des modèles),

qui peuvent être liées aux conditions de mouvement des vagues, de l'élévation de la surface de la mer (marée ou autre), du courant marin:

1. dans le cas des modèles de vagues à l'échelle locale, chaque fois que possible, il est préférable de utiliser les conditions aux limites fournies en tant que spectres d'énergie des vagues le long du bord.

En variante, des données synthétiques (H_s , D_p , T_p) transformées en spectres paramétriques JONSWAP peuvent être utilisées. Cependant, on estime que cette approximation n'est pas très adaptée aux applications côtières, comme par exemple dans les modèles de prévision;

2. dans le cas des modèles hydrodynamiques à l'échelle locale, la marée est normalement spécifiée à la fois comme niveau et en termes d'harmoniques fondamentales (composantes principales diurnes et semi-diurnes); le courant océanographique sur le bord offshore des modèles est souvent négligé, mais si vous préférez l'inclure il est bon que la transition d'un modèle à plus grande échelle à un modèle détaillé, ne se produit jamais en surmontant un facteur de nesting plus petit de 1: 5 ou au maximum 1: 7 (recommandé 1: 3). Cela signifie que si un ensemble de données à grande échelle disponibles, comme par le service européen Copernicus Marine Environmental and Monitoring

Service (CMEMS), sont actuellement fournis à environ 4 km de résolution dans la mer Méditerranée, des modèles à grande échelle côtières, qui par exemple nécessitant 50 m de résolution (et dans nombreuses applications cette résolution est inadéquate), ne peuvent être obtenues que par un minimum de 2-3 niveaux de nesting en cascade, ou encore par des modèles de maillage non structurés.

2. Hautes côtes

Contribution technique du partenaire UNICA

1. Introduction

La connaissance des processus d'érosion et de modification du littoral est d'une importance capitale dans la préparation des plans de monitoring des systèmes côtiers visant à la fois à protéger la santé publique et à protéger l'environnement. En outre, la préparation des interventions de sauvegarde doit être précédée ou suivie d'un monitoring attentif du système dans son ensemble.

Il s'agit donc de mettre en place une activité de planification des actions de suivi qui ne visent pas seulement à vérifier la perte du bien en termes de changements de paysage et de réduction des volumes (recul de la

falaise), mais aussi la possibilité d'intervenir de manière appropriée, respectueux de tous les composants de l'écosystème.

La compréhension des processus géologiques, qui contribuent au déclenchement de phénomènes

d'instabilité, permet d'adapter le choix des paramètres de monitoring aux conditions de l'évolution géomorphologique locale. Reconnaître les mécanismes d'évolution et comprendre leurs causes est donc la première étape dans le choix du système de monitoring le plus adapté.

Dans la littérature, pour les falaises, on fait souvent la distinction entre les glissements de terrain provoqués par des processus typiquement marins, en général l'effet des vagues pour saper à la base le long du sillon et les processus de pente, ceux qui génèrent des glissements de terrain, l'écoulement des eaux souterraines ou des eaux de ruissellement (dans le cas des côtes constituées de roches facilement érodables). Cependant, il est évident qu'il existe une forte interdépendance entre eux (la dégradation à la base produit une érosion continue mais faible du pied de la falaise, mais à long terme, elle rend instable la partie supérieure en déplaçant des volumes massifs en très peu de temps).

La variabilité des côtes permet de souligner l'extrême attention qui doit être accordée au choix du modèle évolutif sur lequel fonder une activité de contrôle continu des secteurs côtiers.

La zone côtière, objet des observations, est divisée en unités physiographiques subaériennes et sous-marines, ce qui implique une approche différente pour la définition des paramètres à mesurer. Une autre particularité, qui caractérise l'étude de l'instabilité des pentes côtières, est l'interaction des surfaces rocheuses avec le mouvement des vagues. La dynamique du mouvement des vagues, aussi bien dans le régime normal que dans les événements extrêmes, doit être prise en compte, à la fois comme impact sur les parois rocheuses et génératrice des courants côtiers et de la plate-forme proximale. Sur ce dernier aspect, ils sont aujourd'hui connus avant tout les expériences concernant les artefacts, alors que les interactions directes avec les pentes naturelles sont rares.

Les études multidisciplinaires au service de la caractérisation des zones d'étude sont décrites ci-après, de même que l'identification de zones instables et potentiellement instables. Ensuite, les processus et les critères pour leur suivi sont rapportés, grâce à une identification initiale des indicateurs.

2. Les principaux indicateurs de suivi des phénomènes d'instabilité des hautes côtes

2.1 Les échelles spatiales et temporelles

Il est important de définir la dimension spatiale du processus à surveiller. En effet, si, d'une part, il est nécessaire, du point de vue de la planification, d'avoir une connaissance étendue des phénomènes

d'instabilité et du potentiel d'instabilité le long des côtes, on sait que ces informations ne sont pas encore disponibles pour toutes les régions de la zone transfrontalière. Par ailleurs, une lacune a également été constatée pour les glissements de terrain qui se produisent à l'intérieur des terres, malgré des conditions logistiques moins problématiques et à partir desquelles découle la difficulté intrinsèque de définir un zonage correct du danger géomorphologique. Il devient donc très problématique de définir les zones de référence locales afin de concevoir un système de monitoring des phénomènes d'instabilité qui soit efficace et réponde aux besoins de la gestion des zones côtières. Lorsqu'il existe des phénomènes de glissement de terrain, les systèmes de monitoring les plus appropriés doivent reposer sur une analyse minutieuse des causes déclenchantes et, par conséquent, la zone d'intervention peut être très variable, du bassin hydrographique et hydrogéologique sous-tendu et de l'espace maritime en face jusqu'au seul bloc de glissement de terrain. Un autre aspect extrêmement important, puisque le monitoring est une action d'observation dans le temps, est celle de définir l'évolution temporelle des phénomènes et la nécessité de prévoir des observations répétées.

De ce point de vue, il existe différentes échelles de temps à considérer:

- a) la géologique, mentionnée au moins à la période climatique actuelle, et donc de l'ordre de 10^4 ans, et peut-être encore plus limité aux 10 000 dernières années, depuis l'ascension holocène du niveau de la mer s'est stabilisée en devenant moins raide, la configuration actuelle étant un fruit à grande échelle de cette évolution;
- b) celle de l'époque historique, en théorie observable de l'étude avec les travaux anthropiques, sur les 3 000 dernières ans dans le cas de la Sardaigne
- c) la récente, qui peut être déterminée à l'aide de photos historiques et de cartes disponibles permettant de remonter aux 70 dernières années, voire dans certains cas sur 100 ans.

Il est évident que chacune de ces échelles de temps a un sens différent, en particulier dans l'analyse des temps de retour des glissements de terrain, mais toutes sont essentielles pour la compréhension de l'évolution des hautes côtes pris en considération.

2.2 Monitoring du secteur subaérien

Les zones de référence physiographiques spécifiques sont celles des falaises et des pentes. Le choix des actions de monitoring à mettre en œuvre pour contrôler au fil du temps les indicateurs possibles pour la prédiction des glissements de terrain déclencheurs repose sur la caractérisation géologique des tronçons côtiers. Les caractéristiques lithologiques, géomorphologiques, structurelles, géotechniques, géomécaniques

et hydrogéologiques constituent les connaissances de base et doivent donc être définies de manière préliminaire selon les méthodologies proposées dans le projet MAREGOT dans le cadre de la composante T.2. et spécifiquement dans l'activité T2.3-Méthodologie d'analyse des phénomènes liés à l'évolution des hautes côtes.

Ces enquêtes sont essentielles pour la conception de systèmes de monitoring efficaces, qui prennent en compte la complexité de l'évolution naturelle des parois rocheuses pouvant entraîner le déclenchement de glissements de terrain dans les zones côtières. Synthétiquement, nous rapportons les processus connus pour jouer un rôle important dans la promotion de l'instabilité des pentes rocheuses et qui, par conséquent, en plus d'être reconnus, doivent également être quantitativement dimensionnés:

- Processus d'altération et *weathering*: karst (roches carbonatées), aloclastisme, gonflement argileux, hydrolyse des silicates (roches cristallines et volcaniques).
- Processus d'érosion: érosion de surface, zones d'érosion diffuse, zones d'érosion linéaires, érosion linéaire accélérée, érosion des calanques, tête en érosion rétrogressive.
- Processus gravitationnels: glissements de terrain d'effondrement, glissements de terrain glissants (planaires, de rotation)
- Processus de retrait des falaises: morphométrie du sillon, plates-formes côtières émergées et submergées (voir la section Monitoring du secteur sous-marin).

Suite à cette analyse, les systèmes de monitoring spécifiques peuvent être appliqués, selon les méthodologies les plus appropriées et dans plusieurs disciplines des sciences géologiques, avec des techniques de détection différentes, entre autres, mais pas uniquement: étude géologique, structurale, géomorphologique, hydrogéologique, géomécanique sur le terrain avec mesures et essais directs in situ et avec des essais en laboratoire, télédétection. Par exemple, si la présence de cinématiques de surface est détectée, elles peuvent être contrôlées par photogrammétrie et *remote sensing*, mesures topographiques (nivellement, triangulation, trilatération, mesure de distance, etc.), mesures de discontinuité, mesures déformométriques, évaluation des pressions interstitielles.

Les mesures pour soutenir les activités de détection directe sont celles qui peuvent définir la variation multitemporelle du littoral. A des fins de suivi, en fonction des processus reconnus et de leur impact, le cadre de référence territorial pour l'étude des processus d'instabilité des pentes côtières devrait être étendu, le cas échéant, au bassin hydrographique et au bassin hydrogéologique à caractériser dans ses composants

principes fondamentaux: hydrologie de surface, présence d'urgences et de points de retrait, distinction des complexes hydrogéologiques, niveau piézométrique, direction de l'écoulement, coefficient de perméabilité, conductivité et transmissivité hydraulique.

2.2.1 Outils de suivi et indicateurs

Les outils et les techniques de monitoring peuvent être multiples, en fonction des indicateurs à détecter, de la précision des mesures et de leur fréquence. Nous pouvons distinguer les mesures directes et à distance, typiques de la télédétection. Les différentes conditions géologiques des sites, mais aussi leur accessibilité, à vérifier à chaque fois, définiront le type, le nombre et la fréquence des mesures à effectuer. Ces paramètres détermineront également le type d'analyse des données.

Parmi les mesures directes, le détail nécessaire pour étudier le potentiel d'instabilité du front rocheux est associé à:

- caractérisation géotechnique (angle de frottement, cohésion, poids volumique, teneur en eau, Limites d'Atterberg, analyses granulométriques, pressions neutres, perméabilité);
- monitoring de l'état de discontinuité avec des mesures directes et des échantillons de laboratoire (position, espacement, ouverture, altération, JRC, conditions hydrauliques, RMR, résistance à la compression uniaxiale, résistance à la traction, résistance à la flexion, module d'élasticité, etc.)
- le monitoring des conditions physiques du front dans ses composants d'instabilité par le contrôle avec des instruments (jauges de contrainte, distance-mètres, clinomètres, fissures, cellules de charge) alloués, et avec un réseau de capteurs sans fil (SEED), mesures avec tachéomètre laser, clous et plaques pour mesures micrométriques multitemporelles, chevilles métriques, relevés topographiques DGPS;
- le monitoring des composants hydrogéologiques, y compris les mesures piézométriques, le débit des sources et la qualité des eaux souterraines.

Les techniques de télédétection, de par leur nature, offrent la possibilité de surveiller le territoire à l'aide de capteurs capables de détecter des informations même difficiles à acquérir directement. De plus, la possibilité de répéter les mesures selon les protocoles d'acquisition standard et avec les mêmes caractéristiques

instrumentales, permet de planifier les activités de monitoring les plus appropriées pour les intégrer directement ou avec différents outils. Les outils de télédétection peuvent donc être utilisés spécifiquement dans ce contexte en utilisant à la fois des données acquises à partir d'aéronefs et de satellites (photos aériennes, images optiques et radar) mais aussi les technologies de *proximal sensing* qui permettent, par

acquisition par UAV, de détecter en détail les parois rocheuses. Ces appareils peuvent être équipés de capteurs optiques, de *laser scanner*, caméras thermiques et sont donc les outils les plus efficaces à la fois pour la caractérisation et le suivi des processus basés sur la détection d'anomalies sur des séries multitemporelles (*change detection*). Sur la base de ces acquisitions, ils deviennent des indicateurs de prédiction du déclenchement de glissements de terrain:

- les variations de forme de la face rocheuse extraites de la modélisation 3D, des relevés morphométriques des morphoscultures, des reliefs multi-temporels des surfaces de dénudation (mesures en mètres carrés / an à convertir avec des mesures directes dans les mesures de mobilisation sédiments / blocs);
- le retrait du bord des reliefs des levés aériens ou satellitaires à très haute résolution (mesures en mètres / an) et mesure possible des temps de récurrence des processus actifs.

2.3 Monitoring du secteur sous-marin

La portée physiographique est celle qui va de la base du mur immergé vers le plateau continental. Les mesures concernent donc la variation du fond marin, dans ses différentes articulations. Dans cet espace, des phénomènes d'accumulation, de transport et d'érosion des sédiments générés par les glissements de terrain sont développés, avec des dynamiques parfois différentes de celles du secteur émergent. En ce sens, l'étude géomorphologique sous-marine détaillée dans la phase de caractérisation revêt une importance particulière, précisément parce que la variation des morphologies immergées devient un élément fondamental du monitoring. La géomorphologie sous-marine de la bande péricostée et du pied des falaises permettra de vérifier les hypothèses interprétatives en mer.

2.3.1 Les outils de suivi du secteur sous-marin et les indicateurs

Les techniques d'acquisition de données morphobatimétriques permettent d'atteindre un détail de métrique à centimétrique, permettant ainsi d'évaluer les variations morphologiques et volumétriques des sédiments au fond. En particulier, ils doivent être reconstruits:

- morpho-bathymétrie interpolée de la bande péricostée: avec relief bathymétrique *single beam* avec tolérance centimétrique;
- morpho-bathymétrie du périmètre de surface continu: avec détection *multibeam* de haute résolution;
- la morphologie sonar de la bande péricostée: avec détection *side scan sonar: sss de remorquage, sss de coque*.

Ces données, associées à la détection directe en plongée au pied de la falaise et à l'échantillonnage des produits d'effondrement/glislements de terrain côtiers, permettent de contrôler les changements intervenus entre campagnes d'enquête successives, intégrées à la comparaison multi-temporelle entre sections topographiques pour évaluer les variations volumétriques de roches/sédiments et la comparaison multi-temporelle des sonogrammes. Sur la base de la cartographie des structures sédimentaires, des indications sont données sur la dynamique des courants de fond sous-jacents.

2.4 Monitoring des vagues et instruments de mesure

Comme mentionné dans l'introduction, les phénomènes d'instabilité le long des côtes sont fortement influencés par l'impact et le travail continu des vagues sur les parois rocheuses. Différents modèles peuvent être appliqués pour évaluer l'effet du mouvement des ondes et sur la base du modèle le plus approprié pour chaque contexte physiographique, l'activité de monitoring peut être programmée pour collecter les informations nécessaires. La possibilité et l'éventuelle efficacité d'appliquer des modèles naturels aux modèles étudiés pour évaluer l'effet des ondes sur des structures artificielles feront l'objet d'une activité T2.3 et constituent donc un élément qui n'est pas encore complètement définissable dans cette phase.

2.4.1 Analyse des événements extrêmes

A partir des données d'onde mesurées par une bouée ondométrique ou reconstituées avec des modèles de *hindcasting* à un point largement représentatif de la zone d'intérêt, des analyses d'événements extrêmes seront effectuées pour identifier les tendances climatiques et leurs conséquences éventuelles en termes d'augmentation des sollicitations sur des structures côtières. Des séries chronologiques de données homogènes seront considérées par secteur de provenance, afin de mettre en évidence différents comportements statistiques.

Spécifiquement, l'analyse voudrait évaluer le niveau d'adaptation des différentes fonctions de probabilité, en plus de celles (Gumbel et Weibull) les plus utilisées dans le domaine maritime. Pour chaque distribution de probabilité, différentes méthodes d'estimation des paramètres (par exemple la méthode des moments, la méthode des moindres carrés, la méthode du maximum de vraisemblance, etc.) seront également prises en compte. Les critères de choix des distributions (Sulis et al., 2017) seront ceux utilisés par Goda, selon

lesquels la distribution qui correspond le mieux aux valeurs de l'échantillon est celle qui présente le coefficient de corrélation le plus élevé et le test du Khi-carré selon la méthode Fangiun et al. (2012). La comparaison avec des analyses antérieures d'événements extrêmes sur des séries de données plus courtes permettra de mettre en évidence les changements des valeurs estimées des paramètres des distributions considérées (et donc de leur forme) correspondant aux différentes valeurs attendues des longueurs d'onde

pour des temps de retour fixes.

2.4.2 Analyse du climat ordinaire

Les séries de données historiques en termes de:

1. hauteur significative (Hs),
2. période moyenne (T01),
3. direction moyenne (MWD)

offshore, seront utilisés comme conditions limites des modèles pour leur transfert sous la côte afin de fournir des champs à partir desquels extraire les valeurs dans les points d'intérêt. Des travaux antérieurs peuvent être utilisés pour la comparaison de la propagation des ondes du large au rivage entre des modèles analytiques simplifiés et des modèles numériques commerciaux aux volumes finis sur des mailles non structurées, du type spectral de troisième génération. Le transfert du climat des vagues à la côte nous permettra de représenter le climat des vagues sous forme de tableaux bivariés et roses et d'analyser la contribution énergétique due au mouvement des vagues.

2.4.3 Instruments de monitoring du mouvement des vagues et indicateurs

Les analyses ci-dessus, et en particulier le modèle de transfert climatique des vagues, pourraient être complétées par des mesures effectuées avec une bouée ondométrique, équipée d'un capteur météo et d'un compteur ADCP, et située à une courte distance de la côte sur un point d'intérêt représentatif de l'acquisition continue de paramètres météo-marins, sur des mesures à haute fréquence et à long terme et sur la transmission de données sur le terrain en temps réel.

Les données sont fournies à un modèle spectral de mouvement d'onde pour le transfert sous la côte et à l'extraction des paramètres de hauteur et de période significatives dans la bande de rupture. Les paramètres

sont utiles pour calculer la contrainte ponctuelle exercée par le mouvement de l'onde sur le tronçon de côte étudié.

Les paramètres mesurés sont:

- Hauteur significative spectrale du mouvement des vagues (mesurée en m);
- Période de pointe (mesurée en sec);
- Période moyenne (mesurée en sec);
- Direction d'origine moyenne du mouvement de l'onde (mesurée en ° N);
- Hauteur de pluie (mm).
- Température de la surface de la mer (mesurée en ° C);

- Vitesse actuelle (m / s);
- Direction actuelle (° N);
- Direction du vent (° N);
- Vitesse du vent (m / s),
- Pression atmosphérique (hPa);
- Humidité relative (%).

2.5 Monitoring du climat

Ce paragraphe fait référence à la nécessité de prévoir dans le temps des scénarios possibles de risque directement liés aux événements météorologiques, ordinaires et extrêmes, caractérisés par des valeurs pluviométriques supérieures à la moyenne (inondations et précipitations cumulées continues).

Le monitoring des conditions météorologiques est fondamentale pour corrélérer le dépassement des seuils de précipitations avec le déclenchement de phénomènes d'instabilité locale. Les paramètres météorologiques influencent aussi directement les processus d'altération liés aux agents atmosphériques. Il est donc très utile de surveiller tous les paramètres susceptibles d'influencer directement ou indirectement les conditions de stabilité d'une zone. Les principaux paramètres météorologiques sont les suivants: précipitations (quantité, intensité horaire, distribution cumulée dans le temps), température, humidité (air et sol), vent (direction, vitesse), rayonnement solaire, évapotranspiration, etc.

Les mesures seront donc effectuées directement par des stations météorologiques sur site ou à proximité immédiate, équipées de datalogger permettant l'enregistrement continu de tous les paramètres nécessaires. Les données météorologiques recueillies, ainsi que les séries chronologiques, seront également utiles pour déterminer les indicateurs de risque pluviométrique pour chaque domaine d'étude. Les seuils pluviométriques indiquent une certaine correspondance entre le temps de retour des précipitations avec les précédents critiques et les précédents non critiques, pour les niveaux de criticité moyens et élevés (durées 1, 3, 6, 12, 24 heures et pour différents temps de retour à la fois sur un niveau précis et sur une zone).

3. Plages

Contribution technique du partenaire de l'UNIGE

3.1 Général

En référence au rapport T1.1, rédigé lors de la phase précédente, un cadre varié est apparu sur l'approche et les méthodologies pour l'étude des basses côtes. Les premières inhomogénéités concernent les organes responsables des activités d'analyse et de suivi; deuxièmement, le calendrier d'exécution de ces activités, où, dans certains cas seulement il semble être systématique, alors que la plupart des données collectées se rapportent à l'étude de secteurs spécifiques et à petite échelle.

L'étude des phénomènes érosifs et de la dynamique des littoraux des basses côtes se développe à travers l'identification de la morphologie caractérisante, c'est-à-dire la reconnaissance des principales formes qui composent la plage; cet élément est étroitement lié à la morphologie, à la sédimentologie et à l'hydrodynamisme. Un autre facteur qui suppose un rôle fondamental est sans aucun doute l'impact anthropic; cet élément détermine, dans de nombreux cas, une modification substantielle des processus naturels qui caractérisent la plage. Le suivi de ces éléments doit être effectué par des méthodes directes (enquêtes de terrain, analyses de laboratoire, vidéosurveillance) et / ou indirectes (analyse statistique, modélisation côtière, modèles analytiques). Ces deux méthodes peuvent être utilisées en fonction des critiques mises en évidence dans l'étude et en charge. De plus, les conditions logistiques pour une mise en œuvre correcte du protocole de monitoring doivent être analysées.

Considerant ce qui a émergé, il est évident l'utilisation d'une méthodologie commune et productive capable de fournir l'information du tronçon côtier examiné, en soulignant les tendances évolutives, les principales formes, les caractéristiques hydrodynamiques et les effets de toute structure anthropique.

Cette approche, compte tenu de la complexité évidente, nécessite l'utilisation de paramètres et de méthodologies applicables par tous les partenaires. Dans les paragraphes suivants, une schématisation de cette proposition sera présentée, en tenant compte des caractéristiques morphologiques et hydrodynamiques des parties basses des régions respectives, sans négliger les lignes directrices nationales pour les régions italiennes et les lignes directrices élaborées par le BRGM et le CEREMA pour les régions françaises.

3.2 Paramètres de monitoring des côtes basses

3.2.1 Définition des objectifs

Les principaux objectifs de cette activité sont identifiables dans:

- ✓ détermination de l'évolution de la côte;
- ✓ définition de la structure dynamique du littoral sédimentaire;
- ✓ évaluation du bilan sédimentaire;
- ✓ évaluation de l'efficacité des travaux de défense et de leur impact

Ces études devront être réalisées en synergie avec les autres activités du projet, notamment avec "climat météo-marin" et "côtes rocheuses hautes". En outre, une partie des enquêtes menées sera utilisée pour des études relatives à d'autres activités du projet, telles que «climat météo-marin», «biocénose marine» et «risque côtier». Le diagramme suivant montre précisément les interactions avec les différentes activités.

<i>Actes</i>	<i>Données demandées</i>	<i>Données fournies</i>
T2.1 "Climat Météo-marin"	- séries historiques de mouvement des vagues (spectres et paramètres d'onde intégrés), à utiliser pour les modèles de transport solide côtier; - le runup des vagues; - estimation du Sea level Rise.	- Levés bathymétriques pour la construction de plans d'ondes et de courants induits par le mouvement des vagues ci-dessous.
T2.3 "Hautes côtes"	Input sédimentaire provenant de l'érosion de la falaise;	
T2.4 "Habitats et écosystèmes marins et côtiers"	Distribution des biocénoses côtières pour la planification correcte des interventions;	Levés bathymétriques et informations sur l'hydrodynamisme de la côte pour la construction de modèles prévisionnels sur la distribution des biocénoses côtières.
T2.5 "Gestion des risques"		Levés bathymétriques de la

côtiers”		plage immergée et reliefs topographiques de la plage émergée pour l'évaluation du run up; - données texturales des sédiments pour la détermination des modèles hydrodynamiques; - prévision et détermination des courants côtiers et des rip currents.
----------	--	--

3.2.2 Type de données pour le suivi du bilan sédimentaire: recherche bibliographiques, arpentages, modèles

Les études sur la dynamique sédimentaire des côtes sont généralement menées à travers quatre phases distinctes:

- ✓ extension du suivi
- ✓ enquête historique;
- ✓ activités sur le terrain;
- ✓ traitement des données et mise en œuvre de modèles mathématiques.

Extension du monitoring

Extension de zone

Le littoral est un système dynamique en recherche constante d'un équilibre stable par rapport aux conditions limites contingentes. Les variations de ces conditions initiales conduisent donc à des changements dans la structure côtière, non seulement dans le secteur susceptible de changer, mais également dans les secteurs adjacents, à condition que ceux-ci aient un échange sédimentaire. L'enquête devrait donc impliquer l'ensemble de "l'unité physiographique", c'est-à-dire le secteur de la côte où les processus sédimentaires dynamiques ne sont pas influencés par les secteurs adjacents. Dans certains cas, la zone d'investigation peut être réduite à un tronçon côtier plus limité si l'influence des zones adjacentes est jugée peu significative.

Extension temporelle

L'extension temporelle des investigations devra être planifiée en fonction de l'objectif à atteindre. Si vous envisagez de réaliser une étude de base visant à comprendre les mécanismes qui régissent le tronçon de côte étudié, on peut supposer qu'elle ne réalisera qu'une seule campagne d'enquête. Si vous souhaitez surveiller, par exemple pour évaluer les effets d'une intervention côtière ou pour vérifier l'état d'une côte, vous devrez procéder à une série de campagnes répétées selon un calendrier prédéterminé. Selon l'objectif, les études, qui seront décrites plus loin, peuvent être répétées ou omises car elles ne sont pas significatives pour l'évaluation correcte des phénomènes.

Enquête historique

Il constitue la base initiale sur laquelle développer toutes les élaborations ultérieures pour la définition de la tendance évolutive, de la structure dynamique sédimentaire et enfin pour atteindre l'équilibre sédimentaire de la côte. Les données à collecter sont essentiellement de nature morpho-sédimentologique, mais il ne faut pas négliger d'autres informations concernant les transformations sur le waterfront, telles que l'occupation des plages, les ouvrages de défense et autres modifications naturelles ou anthropiques. L'extension temporelle de l'enquête devra être à l'échelle historique, la plus large possible en fonction de la disponibilité des informations. Une attention particulière doit être accordée à la qualité des données et évaluer l'erreur de mesure lorsque cela est possible.

Le tableau suivant présente les informations les plus utiles pour la reconstitution historique de l'évolution du littoral.

Donné	Informations demandées	Autre
Ligne de rivage	- année d'enquête; - méthodes d'exécution (photos aériennes, satellite; cartes historiques, etc.).	- exactitude de la mesure
Levés planoaltimétriques (Bathymétrie et topographie plage émergée)	- année d'enquête; - méthodes d'exécution.	- exactitude de la mesure
Travaux de défense	- année de construction; - méthodes de construction; - variantes successives	- modifications et / ou maintenance
Autres structures	- année de construction; - méthodes de construction; - variantes successives.	- modifications et / ou maintenance
Nourriture des plages (et recharges ultérieures)	- année de l'intervention - volumes entrés	- caractéristiques texturales - méthodes de recharge

Activité sur le terrain

Les activités sur le terrain dans l'étude des côtes sont essentiellement orientées vers la caractérisation morphologique et sédimentologique des plages émergées et submergées. Cette distinction est nécessaire car les techniques d'enquête pour les deux secteurs sont différentes. Les relevés sur la plage émergée visent à déterminer la topographie de la surface et à identifier, le cas échéant, les principales structures morphosédimentologiques (pied de la dune, berme de la tempête, berme ordinaire, etc.). Dans le passé, cette enquête a été réalisée à l'aide de profils altimétriques d'espacement différent à partir de points de référence fixes géoréférencés. Les techniques topographiques actuelles (laser scanner, Dgps, remote sensing) ont désormais dépassé, en termes de précision et de rapidité d'exécution, ces modes de mesure et sont donc préférables, du moins en morphologie irrégulière. Les mesures liées aux structures morphosédimentologiques de la plage émergée ont une utilité limitée dans les activités de planification, mais ont encore une importance considérable pour la compréhension des mécanismes dynamique sédimentaire et pour l'étalonnage de modèles mathématiques morpho-hydrodynamiques.

De manière similaire à ce qui a été rapporté pour la plage émergée, le levé bathymétrique est souvent réalisé en utilisant des profils bathymétriques placés en coïncidence avec les repères géoréférencés mentionnés précédemment. Cette méthodologie présente évidemment des limites évidentes, en particulier en présence de côtes constituées de morphologies sous-marines irrégulières, et ne permet pas une évaluation spatiale correcte de l'évolution du fond marin. Les techniques d'enquête actuelles, qui utilisent la technologie multibeam, sont certainement préférables à la technologie singlebeam et doivent être considérées comme essentielles, en particulier dans les activités de monitoring pour l'évaluation de l'efficacité des interventions de défense côtière. De plus, cette technique, fournissant un maillage de points plus denses, permet de déterminer avec précision leurs variations et par conséquent les différences volumétriques qui ont affecté le fond. Ce dernier est un paramètre fondamental pour la détermination correcte du bilan sédimentaire.

La ligne de rivage est le paramètre le plus utilisé dans l'évaluation de la tendance évolutive du littoral. Ce paramètre s'avère certainement très utile dans les analyses à long terme, alors qu'il est peu significatif dans les évaluations à court terme, car il est influencé par les conditions météomarine contingentes. Les méthodes de détermination de la ligne de rivage à long terme ont déjà été décrites dans le paragraphe "*enquête historique*". Lorsqu'on opère sur des plages de faible extension ou qu'il faut surveiller des portions limitées de littoral au lieu de topographies, il est préférable d'utiliser des systèmes de monitoring tels que

web-cam qui, en enregistrant l'état de plage continu, fournissent des informations plus détaillées et surtout liées à l'état de la mer.

Des études sédimentologiques sont effectuées tant sur la plage émergée que sur la plage immergée. Celles-ci doivent permettre la collecte d'échantillons de sédiments en des points significatifs de la côte. Sur la plage

émergée les points de prélèvement peuvent être identifiés dans le littoral et en correspondance avec les structures sédimentaires (bermes); en l'absence de ceux-ci, on peut s'attendre à un échantillonnage dans la portion médiane et dans la partie supérieure de la plage. Il est préférable d'effectuer le plan d'échantillonnage de la plage immergée après le relevé bathymétrique afin de positionner correctement les points d'échantillonnage et éviter ainsi des échantillons peu significatifs. Dans ce cas également, les structures sédimentaires telles que les barres ou la zone de rupture des vagues sont préférées. Les échantillons, si possible, doivent être disposés selon des profils perpendiculaires à la ligne de rivage. La position des transects doit prendre en compte toutes les zones significatives du littoral, à la fois naturelles (falaises de cuspides) et anthropiques (ouvrages de défense).

Les analyses à effectuer sur les échantillons prélevés portent principalement sur la caractérisation texturale des sédiments. Les analyses granulométriques sont effectuées en utilisant l'échelle de Wenworth à $\frac{1}{2} \phi$. Outre la classification granulométrique à échelle verbale, il convient de définir les principaux indices texturaux: les paramètres de la tendance centrale (mode, moyenne et médiane), la classification et l'asymétrie. Ces mesures présentent un intérêt particulier pour la compréhension des mécanismes de sédimentation dynamique qui régissent la côte et pour la conception des interventions de nourritures. Les autres analyses qui ne sont pas strictement nécessaires mais toujours recommandables sont celles de composition et de colorimétrie. Les premiers visent la caractérisation minéro-pétrographique des sédiments constituant la plage pour une définition des sources de nourriture et des flux sédimentaires, ces derniers permettant de définir quantitativement la couleur. Les deux sont utiles pour choisir le matériau le plus approprié pour les interventions de nourritures, en particulier dans les situations à haute valeur naturaliste.

Traitement de données et implémentation de modèles mathématiques

Les données obtenues des activités précédentes sont élaborées afin de rassembler toutes les informations nécessaires à la planification et à la gestion correctes du système de plages. Pour le développement correct de ces calculs, des enquêtes provenant d'autres activités sont également nécessaires. À ce stade, les objectifs énoncés ci-dessus doivent donc être poursuivis:

- détermination de la tendance évolutive de la côte
- définition de la structure dynamique sédimentaire de la côte;
- évaluation du bilan sédimentaire.

La comparaison des lignes de rivage est certainement le premier paramètre à analyser. Il nous

fournit une estimation de l'état du système et de ses tendances évolutives. Dans le cas de variations limitées ou de comparaisons étroites, ce paramètre peut ne pas être significatif; il est donc opportun de l'évaluer avec d'autres paramètres, tels que les variations du fond marin. Ce second paramètre est fondamental dans les activités de surveillance et dans la détermination du bilan sédimentaire. Dans les études de base, une interprétation correcte des changements survenus sur le littoral peut être très importante, non seulement pour la reconstruction évolutive, mais aussi pour obtenir des informations utiles sur la structure dynamique sédimentaire du secteur côtier. Enfin, l'étude doit fournir toutes les informations nécessaires pour comprendre les mécanismes qui ont déterminé la structure côtière actuelle, identifier les causes qui ont provoqué les phases d'érosion et / ou de progradation de la plage et enfin évaluer la tendance évolutionnaire à laquelle la côte est soumise. La détermination de la structure sédimentaire dynamique ne peut être séparée des informations recueillies lors de l'activité concernant l'étude du «climat météo-marin». La connaissance correcte du mouvement des vagues intéressant le secteur étudié constitue non seulement le point de départ de l'étude de la dérive des côtes, mais aussi la condition fondamentale de toute modélisation ultérieure qui doit être effectuée principalement dans les études de base. Grâce à l'utilisation de modèles mathématiques, tous les paramètres utiles à la compréhension de la structure sédimentaire dynamique doivent être définis et quantifiés. La description quali-quantitatif du mouvement des ondes sous-jacentes et des courants induits par celui-ci doit viser à déterminer les directions de transport, les trajectoires des courants côtiers, le pouvoir de pénétration du mouvement des vagues sur la plage (run up) et la définition de la profondeur de fermeture. Différents scénarios doivent être prévus avec des agitations de vagues d'intensité différente, par exemple avec des temps de retour de 1, 10 et 50 ans et des directions d'origine différentes, par rapport aux secteurs de traversée principaux et secondaires. D'autres études visant à comprendre la dynamique sédimentaire sont celles liées aux études sédimentologiques. La réalisation de cartes thématiques des différents paramètres texturaux fournit des informations utiles pour la compréhension des mécanismes sédimentaires dynamiques. La comparaison entre les différents

paramètres, par exemple en utilisant la méthodologie proposée par Gao et Collins¹, permet de déterminer les principales directions de transport. Une analyse approfondie de la morphologie de la plage, émergée et submergée, aide à comprendre la dynamique du littoral et fournit également des données utiles pour l'étalonnage des modèles mathématiques. En particulier, ce type d'analyse est fondamental dans l'évaluation des interventions de défense, afin de vérifier la qualité des choix de conception, en particulier si elles sont identifiées sur la base des résultats des modèles mathématiques.

L'état de santé d'un littoral est une conséquence directe de son équilibre sédimentaire. Il est donc essentiel de pouvoir évaluer ce paramètre aussi précisément que possible. L'équilibre sédimentaire est donné par les inputs, c'est-à-dire les sédiments introduits dans le système (apports des cours d'eau, détritiation des falaises, apports artificiels), et par les outputs, c'est-à-dire les sédiments retirés du système, donc théoriquement dans une unité physiographique, les pertes de sédiments devraient être dues à la seule usure des sédiments et à leur dispersion conséquente au large des côtes. Cependant, au sein de la même unité physiographique, en raison de changements dans la structure côtière, on peut avoir des variations qui créent des déséquilibres par rapport à la situation initiale. Par conséquent, un calcul fiable de l'équilibre sédimentaire devrait d'abord être appliqué au niveau de l'unité physiographique et ensuite extrapolé à une échelle inférieure. La méthode de calcul la plus simple est la comparaison des levés topo - bathymétriques du littoral. La différence volumétrique constitue l'équilibre sédimentaire de la plage. Cependant, identifier ce paramètre avec précision est une tâche très complexe et difficile. Malgré que les techniques de mesure actuelles aient atteint une grande précision, l'erreur encore présente peut entraîner des différences volumétriques très importantes. Par exemple, dans une plage avec une pente de 3% et une profondeur de 6 mètres, la seule erreur instrumentale d'environ 1 cm entraîne une différence de volume de 2 m³ par mètre linéaire de plage. Cependant, la seule différence de volume n'est pas suffisante pour comprendre le bilan sédimentaire, ou plutôt pour identifier la valeur des outputs et des inputs sédimentaires. En ce qui concerne l'évaluation des déficits sédimentaires, ces études

¹ Gao S., Collins M. (1992) – Net sediment transport patterns inferred from grain size trends, based upon definition of “transport vectors”. *Sedimentary Geology*, 81, 47 -60.

doivent évidemment s'appuyer sur les informations obtenues à partir de l'hydrodynamique et de l'analyse sédimentaire, évaluant les pertes sédimentaires causées par la dérive côtière, notamment du type cross - shore (rip currents) capable de disperser les sédiments au large des côtes, au-delà de la profondeur de fermeture, en les soustrayant du système de côte. Ces aspects sont difficiles à estimer quantitativement. Enfin, les input sédimentaires qui, comme mentionné précédemment, sont identifiables dans les apports des cours d'eau et la rétention des falaises, dont le calcul des quantités introduites n'est pas à l'abri des erreurs non seulement de mesure mais aussi de variabilité temporelle à laquelle ces phénomènes sont soumis. Il est donc extrêmement difficile d'arriver à une mesure exacte de l'équilibre sédimentaire, et il est parfois plus approprié d'en faire une évaluation semi-quantitative.

3.2.3 Autres considérations

La méthodologie proposée envisage toutes les études et les enquêtes qu'il est approprié d'effectuer pour une activité de monitoring complète des côtes déposées. Bien entendu, cependant, il doit être adapté aux besoins éventuels et à l'objectif à atteindre. Par conséquent, les activités décrites précédemment peuvent être réalisées totalement ou partiellement. À cet égard, il convient d'introduire une distinction de fond liée aux enquêtes qui ont lieu sur la côte. Comme déjà mentionné ci-dessus, deux types d'études différentes peuvent être distingués en ce qui concerne les activités de contrôle côtier:

- études de base de la côte;
- monitoring de la côte.

Des études de base sont effectuées essentiellement pour comprendre les mécanismes qui régissent le système côtier. Ils constituent la base de toute planification et / ou action de gestion ultérieure qui sera entreprise sur la côte. Par conséquent, l'enquête devra être effectuée au niveau de l'unité physiographique, mais à une échelle détaillée (1:5 000 à 1:10 000).

Les enquêtes couvriront tous les points traités précédemment et devront fournir une image complète du littoral. En ce qui concerne les enquêtes de campagne, ils ne doivent pas être répétées, sauf pour approfondir certains aspects particuliers apparus au cours des enquêtes. Il peut être utile d'effectuer des contrôles continus, par exemple en utilisant des web-cam dédiées, à la fois pour

étudier les variations saisonnières et pour obtenir des informations utiles pour l'étalonnage de modèles mathématiques qui constituent l'une des étapes fondamentales des activités ultérieures de gouvernance. Le monitoring côtier, destiné à contrôler l'évolution du système prolongé dans le temps, est une pratique utilisée dans les cas où l'on veut évaluer les effets des interventions sur la côte ou simplement observer une partie de la côte. L'étendue de l'enquête dans ce cas peut être limitée au domaine de l'enquête ou à la zone d'influence de toute œuvre achevée. Les enquêtes seront effectuées à une échelle de 1: 5 000 ou moins. Coïncidant avec les structures, l'enquête doit avoir une précision supérieure, même 1: 1000. Dans ces études, les activités sont essentiellement réduites à des enquêtes sur le terrain répétées selon une périodicité préétablie et la comparaison ultérieure entre les différentes campagnes. Bien que les enquêtes à effectuer soient facilement normalisables et coïncident avec celles décrites ci-dessus, le calendrier des tâches est plus complexe. De manière générale, le monitoring a une durée d'au moins 5 ans et une fréquence de deux ans (1, 3, 5 ans) pour les enquêtes topo-bathymétriques et sédimentologiques, mais dans certains cas, pour mieux comprendre les conditions de la plage dans ses conditions de haute et basse énergie, on peut procéder avec une cadence saisonnière. En ce qui concerne le monitoring de la ligne de rivage, la fréquence des relevés peut être annuelle et réalisée avec des techniques topographiques. Cependant, ce paramètre ayant une forte variabilité intrinsèque, il peut parfois être peu significatif, notamment lors de relevés rapprochés dans le temps, à l'exception des cas où il existe d'intenses phénomènes d'érosion ou de progradation.

En présence d'un domaine d'enquête d'extension limitée, il est préférable d'utiliser des systèmes de monitoring en continu tels que les web-cams qui, comme mentionné précédemment, en plus de fournir des informations sur les variations à court terme, permettent de mieux corrélérer les déplacements de la ligne de rivage avec les événements météo-marins qui les ont déterminés.

Sur la base de ces dernières considérations, il est considéré, et donc proposé, que dans la réalisation des plans de suivi, liés à l'activité T2.2, nous tenons compte de ces deux types différents et nous créons deux plans distincts avec des activités spécifiques pour chacun d'eux.

4. Bassin versant

Contribution technique du partenaire Arpas

4.1 Introduction et considérations générales

L'analyse développée dans le cadre de l'activité T1.2 est résumée dans le rapport T.1.1. "L'analyse critique des systèmes de monitoring et le type de données suivies avec l'évaluation coûts-bénéfiques des méthodologies utilisées" en référence aux aspects spécifiques "bassins fluviaux et transport solide fluvial vers les foyers", a mis en évidence, pour les raisons déjà représentées, une pénurie et un manque de données et d'informations sur les apports sédimentaires aux bouches.

Comme déjà mentionné dans le document susmentionné, les systèmes fluviaux représentent le principal réseau naturel à travers lequel les sédiments sont transférés des zones de production situées sur les pentes vers les zones de stockage telles que les plaines inondables et, enfin, les foyers et les côtes. La quantité de sédiments sableux libérés à l'embouchure d'une rivière résulte de phénomènes naturels, géomorphologiques, hydrologiques et hydrauliques complexes qui interagissent et qui, à leur tour, sont directement ou indirectement influencés par diverses activités anthropiques.

La compréhension de ces phénomènes est donc une condition essentielle, ainsi que pour la prévention de l'instabilité hydrogéologique, y compris pour toute activité de gestion côtière.

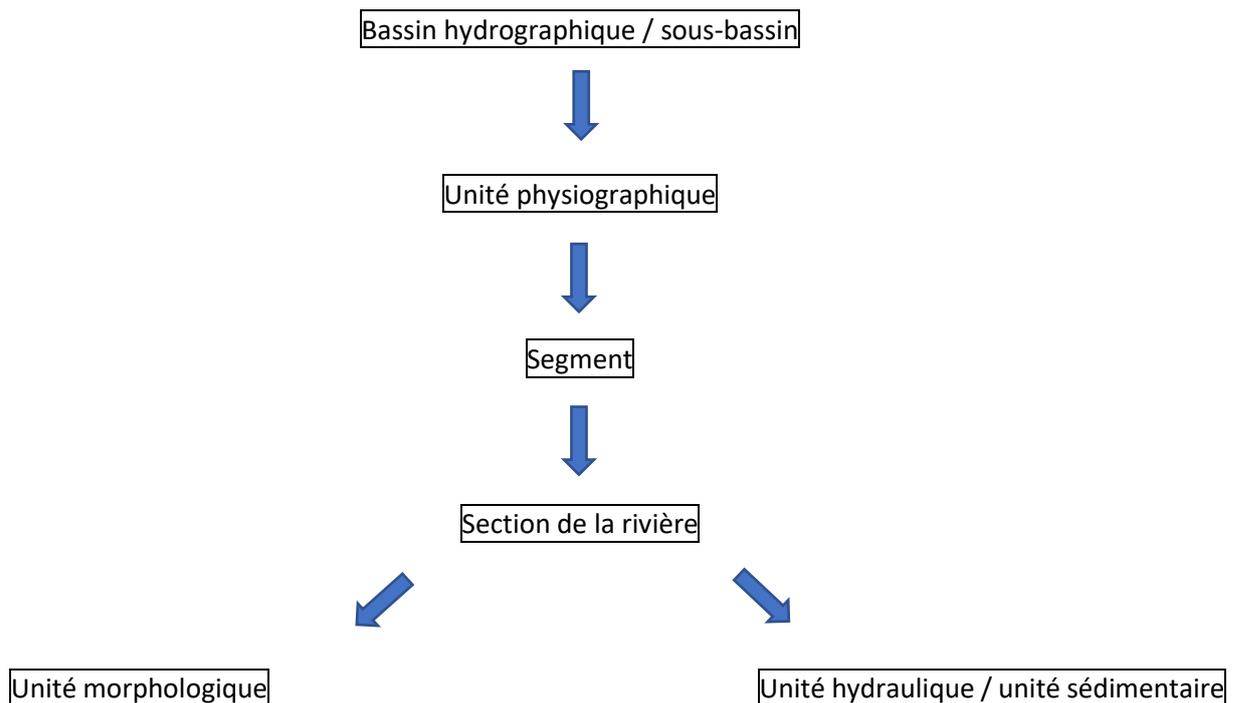
Ce dernier objectif ne peut être poursuivi de manière exhaustive que par une connaissance adéquate de la quantité (et de la qualité) et de la répartition dans l'espace et le temps des bilans sédimentaires, puis avant tout des apports des cours d'eau. À cette fin, il est nécessaire de disposer d'un cadre cognitif du système (bassin hydrographique) et d'instruments d'analyse et d'évaluation, directs et indirects, du transport fluvial. Il est donc considéré comme stratégique, à l'instar de ce qui est fait pour le "transport côtier solide" sur les plages, d'élaborer un protocole méthodologique comprenant des indicateurs et des paramètres communs utiles pour la préparation d'un "plan de monitoring des principaux éléments hydromorphologiques fluviaux". Ce qui permet d'évaluer les tendances évolutives du cours d'eau, de comprendre la dynamique morphologique à travers laquelle on arrive à définir la dynamique de transport vers la côte et la quantification des sédiments qui y arrivent, comme apport sédimentaire aux unités physiographiques / sédimentaires de zone côtière à étudier.

La première étape méthodologique consiste à proposer un ensemble d'indicateurs et de paramètres utiles pour effectuer le monitoring morpho-sédimentologique du bassin en se référant particulièrement aux processus et tendances évolutives du cours d'eau qui alimente le secteur côtier qui sous-tend le bassin.

4.2 Les principaux indicateurs de suivi morphosédimentologique

4.2.1 Les échelles spatiales et temporelles

Le protocole proposé se réfère aux échelles spatiales et temporelles décrites et schématisées ci-dessous; en ce qui concerne les échelles d'analyse spatiale, une approche de subdivision est adoptée selon l'ordre hiérarchique descendant schématisé suivant:



Le schéma comprend une analyse à grande échelle (1: 25.000 / 1: 10.000) sur le bassin / sous-bassin et une analyse détaillée (pas moins de 1: 2.000) pour les autres unités hiérarchiquement inférieures (section, Um, nous, etc.).

Les échelles de temps de l'analyse, en général, comprendront:

Échelle géologique ($10^4 \div 10^6$ ans): géologie et physiologie du bassin et évolution du réseau hydrographique à long terme (p. Ex. Captures de rivières, phénomènes de surexposition).

Échelle historique ($10^2 \div 10^3$ ans): morphologie des cours d'eau à l'époque historique, type d'hébergement et autres types de contrôles anthropiques auxquels ils ont été soumis.

Échelle de temps moyenne (100 à 150 dernières années): l'échelle la plus importante pour identifier et comprendre la forme actuelle des cours d'eau, en fonction des variations morphologiques planimétriques (lit de rivière étroit ou élargi) ou altimétriques (lit de rivière incisé ou dégradé). C'est l'échelle de plus grand

intérêt pour les études de nature applicative (parfois appelée échelle de gestion). À l'intérieur, on peut encore distinguer:

- échelle des 10 ÷ 15 dernières années, soit l'échelle la plus appropriée pour définir les tendances actuelles (lit de rivière en incision, en sédimentation ou en équilibre dynamique).
- échelle annuelle / saisonnière, qui n'est pas une échelle significative pour l'interprétation des formes et des processus évolutifs mais, inversement, peut avoir un effet temporaire sur les caractéristiques granulométriques et / ou végétales locales, en fonction des événements survenus lors du dernier cycle saisonnier.

4.2.2 Monitoring morphologique du réseau hydrographique, du lit principal et du secteur focal

Après l'analyse et la caractérisation du système fluvial, il est prévu d'évaluer les tendances futures grâce au suivi morphologique du réseau hydrographique, du lit principal et du secteur de concentration (classification et subdivision du réseau hydrographique, caractérisation et évaluation des conditions actuelles et passées du réseau hydrographique; étude morphométrique selon les paramètres morphométriques les plus connus. cfr. Horton R.E., 1932; Horton R.E., 1945; Strahler A.N., 1952; Strahler A.N., 1964; Gupta et alii, 1980; Rodriguez-Iturbe I. & Escobar I.A., 1982; Gupta et alii, 1984).

Cette phase s'applique à l'échelle d'étirement choisie en fonction de critères de représentativité ou de criticité. Les indicateurs pouvant être contrôlés sont au total 31, dont 17 se réfèrent au système naturel, 12 aux éléments du système artificiel et 2 sont classés comme "éléments supplémentaires de surveillance".

4.2.2.1 Monitoring des éléments morphologiques naturels

En ce qui concerne les aspects morphologiques naturels, les indicateurs et les paramètres pouvant être utiles pour leur suivi sont résumés dans le tableau ci-dessous, qui met en évidence l'échelle de temps d'analyse.

Élément morphologique	Méthode de enquête/ mesure et échelle spatiale relative
<i>Indicateurs et paramètres planimétriques</i>	
1. Indice de sinuosité	Télé-détection (tronçon) - Mesure de terrain (site uniquement)
2. Index entrelacé	Télé-détection (tronçon) - Mesure de terrain (site uniquement)
3. Index de l' <i>anabranching</i>	Télé-détection (tronçon) - Mesure de terrain (site uniquement)
4. Longueur des côtés en retrait et taux de retraite	Télé-détection (tronçon)

5. Amplitude et continuité plate inondable	Téledétection (tronçon)
<i>Profil longitudinal</i>	
6. Pente du fond	Profil de fond de relief, éventuellement étendu du site à la section
7. Changement de la part du fonds	Profil de fond en relief étendu du site à l'ensemble du tronçon
<i>Profil croisé</i>	
8. Largeur de la rivière	Téledétection (section) - Sections d'arpentage (site)
9. Profondeur du lit de la rivière	Relief de sections: 2 ou 3 sections sur le site (de préférence fin de montagne, vallée, centre)
10. Rapport largeur / profondeur	À partir de valeurs mesurées basées sur des sections de relief (site)
<i>Sédiments de fond</i>	
11. Dimensions granulométriques des sédiments	Mesure granulométrique (unité sédimentaire)
12. Structure du fonds: degré d'armure et de colmatage	Evaluation qualitative (site), mesures granulométriques (unité sédimentaire) uniquement en cas de blindage très accentué
<i>Matériau boisé</i>	
13. Abondance de gros matériel boisé	Compter sur le terrain (site) Téledétection (site)
<i>Végétation de la bande périfluviale</i>	
14. Largeur des formations fonctionnelles présentes dans la bande périfluviale	Téledétection (tractus)
15. Extension linéaire des formations fonctionnelles présentes dans la bande périfluviale	Téledétection (tractus)
<i>Détection des indices des unités morphologiques</i>	
16. Indices S.U.M.	Enquête sur la terre et / ou la téledétection (sous-tractée)
<i>Paramètres hydrologiques</i>	
17. Écoulement liquide	Mesures hydrométriques sur des stations de mesure existantes (en continu)

4.2.2.2 Monitoring d'éléments artificiels

Vous trouverez ci-dessous une liste des travaux susceptibles d'intéresser pour le monitoring morphologique dont l'échelle de temps d'analyse est de cinq ans / saisonnière / événementielle:

- barrages ;
- autres travaux d'altération des débits liquides et / ou solides (canaux de dérivation et de drainage, dérivations, traverses, siphons, clés, vases d'expansion, desabbiatori, etc.);
- travaux de régulation transversale (brides, brosses à aboyer, etc.) et murs de défense longitudinaux (bardage en béton, rochers, gabions, matelas, etc.) ;
- œuvres pour le passage;
- *remblayages*;
- remblais ;
- surplombs d'arginal ;

- variations ou changements des formes fluviales dans la plaine (correction, ajustements, etc.) ;
- variations dans la zone de la ceinture érodable ;
- revêtements de fond;
- Gestion et enlèvement des sédiments et / ou rééquilibrage du lit de la rivière;
- Enlèvement de matière ligneuse dans le lit de la rivière;
- coupe de végétation de la ceinture péri fluviale.

4.2.2.3 Autres éléments d'analyse et de monitoring: débits solides et utilisation du terrain

Les apports solides

Les apports solides peuvent être mesurés ou estimés par des méthodes directes ou indirectes:

- avec des méthodes directes en correspondance de sections et de sections significatives mesurées dans un intervalle de temps prédéfini; (méthodes instrumentales et / ou géomorphologiques) ;
- avec des méthodes indirectes et à l'aide de la modélisation, des estimations de la capacité de transport solide sont obtenues. Dans ce cas, les indicateurs principaux et nécessaires pour la construction des modèles sont:
 - indices morphométriques fluviales (longueur, pentes, altitudes, rugosité, indice ou densité de la hiérarchie ; cfr. Strahler, Horton, etc.) ;
 - indices hydrologiques et hydrauliques;
 - indices thermo-pluviométriques;
 - indices géolithologiques;
 - indices d'érosion.

Utilisation du terrain

Un autre indicateur fondamental à surveiller est l'utilisation du sol, en particulier lors de l'exploitation à l'échelle du bassin, car ses variations ont des effets importants sur les débits tant solides que liquides (évidemment, net de toute introduction récente de règles visant à respecter le principe d'invariance hydraulique). Pour cette raison, il serait nécessaire de prévoir des relevés périodiques d'au moins cinq ans, surtout dans les zones les plus sensibles et les plus sujettes au développement anthropique et aux changements fréquents d'utilisation.

5. Habitats côtiers marins

Contribution technique du partenaire Arpas

5.1 Introduction et considérations générales

La détermination des conditions des habitats marins doit avoir les objectifs suivants:

- accroître les connaissances environnementales sur les habitats à toutes les fins de la planification côtière;
- conditionner la planification des interventions côtières en vue de contribuer à l'identification de solutions optimales tant en termes d'efficacité que de point de vue environnemental;
- fournir des éléments adéquats aux enquêtes préliminaires sur les phases d'approbation des interventions;
- vérifier les prévisions de la phase susmentionnée.

5.2 Habitat à prendre en considération

Les ouvrages de défense côtière pris en compte par le projet Maregot concernent généralement une bande côtière étroite qui s'étend du littoral à la profondeur de fermeture de la dynamique des sédiments côtiers.

Pour cette raison, même au niveau naturaliste, les habitats marins qui interagissent et peuvent être influencés par ce type de gestion des territoires sont les habitats les plus typiques des zones côtières.

À titre indicatif, la zone marine à considérer a pour limite supérieure la fermeture au sol de la bande dynamique de la plage et, comme limite inférieure, la limite inférieure de la prairie de *Posidonia oceanica*.

En général, un indicateur environnemental efficace doit présenter les caractéristiques suivantes:

- valeur intrinsèque en termes de biodiversité et de valeur écologique;
- sensibilité, c'est-à-dire modifiabilité, par rapport aux interventions considérées: si la modification correspond à une dégradation (diminution de l'état de surface et / ou de conservation) et que les temps de restauration naturels sont longs, nous sommes en présence d'éléments sensibles et vulnérables.

Dans la bande côtière prise en compte et en référence au contexte ligure, deux situations naturalistes répondent à ces caractéristiques:

- les prairies de *Posidonia oceanica*;
- habitats marins associés à la côte haute ou rocheuse (partie immergée des falaises): il convient de souligner que du point de vue de la bionomie marine, il ne s'agit pas d'un habitat unique mais d'un système d'habitat varié dont la complexité impose une approche basée sur des indicateurs récapitulatifs.

5.2.1 Échelle spatiale

L'échelle spatiale à laquelle les habitats doivent être analysés est celle de la zone côtière, telle que définie par la législation régionale de la Ligurie, présentée ci-dessous:

L'unité physiographique est la zone littorale à l'intérieur de laquelle les sédiments de la plage (émergés et immergés) sont confinés et il n'y a aucun échange de matière avec les unités physiographiques adjacentes.

Les limites des unités physiographiques sont constituées par des structures naturelles (promontoires, canyons) ou des structures artificielles (brosses, ports, etc.) qui atteignent une profondeur comparable à la profondeur de fermeture de la plage ou inversent le sens de la dérive sédimentaire.

Au sein d'une unité physiographique, il est possible de distinguer les zones côtières, définies comme zones côtières, qui peuvent être considérées comme indépendantes pour les tempêtes ordinaires, c'est-à-dire avec des temps de retour de l'ordre de 1 an. Une zone côtière peut à son tour être subdivisée, généralement à partir de structures artificielles, en cellules.

5.2.2 Monitoring

Pour les deux objectifs environnementaux identifiés ci-dessus, il est nécessaire de procéder à deux phases différentes d'étude et de caractérisation:

- *Cadre de base*: il s'agit des conditions de l'habitat à l'échelle de la parcelle, à définir indépendamment de toute planification et avant toute intervention; en Ligurie, cette activité est assurée par la région.
- *Monitoring spécifique*: il s'agit d'un monitoring qui peut être effectué à une échelle plus détaillée et dans des domaines de moindre ampleur; il est lié à la phase de planification et de suivi des interventions côtières individuelles; cette activité, à la charge des promoteurs, est planifiée sur la base du cadre de connaissances mis à disposition par le cadre de base.

5.2.3 Cadre de base pour les habitats de la côte haute ou rocheuse

Le produit de cette classification de base est une cartographie au format SIG vectoriel (échelle 1: 10.000 ou plus détaillée) du substrat rocheux présent dans la bande dynamique de la côte, réalisée grâce à l'interprétation de:

- ✓ modèles numériques du fond avec une résolution ne dépassant pas 1 mètre;

- ✓ sonogrammes géoréférencés provenant d'un sonar à balayage latéral avec une résolution ne dépassant pas 1 mètre;
- ✓ répertoire aérophotogrammétrie (images zénithale et en perspective);
- ✓ campagnes de vérité sur la mer sur des transects ou des points géoréférencés au moyen d'une caméra, d'un ROV ou de sondages d'opérateurs.

La cartographie doit pouvoir distinguer au moins les classes typologiques suivantes: côte naturelle, côte artificielle (ouvrages de défense côtière).

Pour la caractérisation qualitative de l'habitat, l'indice CARLIT appliqué au plan intertidal, à l'échelle spatiale d'un seul secteur (ligne côtière de 50 mètres linéaires) et à l'échelle de trois ans est utilisé.

5.2.4 Classification de base pour les prairies de *Posidonia oceanica*

Le produit de cette classification de base est une cartographie au format SIG vectoriel (échelle 1: 10 000 ou plus détaillée) des prairies de *Posidonia oceanica*: réalisée en interprétant:

- modèles numériques du fond marin avec une résolution ne dépassant pas 1 mètre;
- sonogrammes géoréférencés provenant d'un sonar à balayage latéral avec une résolution ne dépassant pas 1 mètre;
- répertoire aérophotogrammétrie orthorectifié;
- campagnes de vérité sur la mer sur des transects ou des points géoréférencés au moyen d'une caméra, d'un ROV ou de reliefs d'opérateurs.

La cartographie doit être capable de distinguer au moins les classes typologiques suivantes: prairie continue, prairie en plaques, matte morte, prairie sur roche.

Pour la caractérisation qualitative de l'habitat, il est utilisé:

- index PREI, à l'échelle spatiale du défilé et à l'échelle temporelle de trois ans.
- la profondeur et la typologie de la limite inférieure, à l'échelle spatiale de parage et à l'échelle temporelle de trois ans.
- la transparence des eaux (mesures bimensuelles avec le disque de Secchi), à l'échelle de l'espace de parage.

5.3 Monitoring spécifique des habitats de côte haute ou rocheuse

Le résultat de ce monitoring est la vérification, la clarification et la mise à jour du cadre de base dans les zones d'influence de travaux côtiers spécifiques.

Les techniques d'acquisition de données sont principalement celles des campagnes de vérité prévues pour la classification de base, avec un affinement spatial de l'effort d'échantillonnage.

Pour des types particuliers d'habitat, tels que les « beach-rock » ou grottes de mer, où le protocole CARLIT ne fournit pas suffisamment d'informations, des activités de monitoring supplémentaires peuvent être envisagées, telles que:

- dénombrements ou recensements dans les zones ou transits des espèces benthiques bien visibles ;
- recensement visuel de la faune piscicole.

La fréquence de temps comprend généralement une heure zéro (*ante operam*), une heure de fin de travail et une ou plusieurs campagnes post-opératoires, en fonction de la nature de l'intervention et des résultats obtenus.

5.4 Monitoring spécifique des herbiers de *Posidonia oceanica*

Le résultat de ce monitoring est la vérification, la clarification et la mise à jour du cadre de base dans les zones d'influence de travaux côtiers spécifiques.

Les techniques d'acquisition de données sont principalement celles des campagnes de vérité prévues pour la classification de base, avec un affinement spatial de l'effort d'échantillonnage.

Dans les cas particulièrement importants, des activités de monitoring supplémentaires telles que :

- "balisage" (marquage) des limites supérieure et inférieure des herbiers de *Posidonia oceanica*;
- analyse phénologique sur les feuilles de *Posidonia oceanica*;
- recensement visuel de la faune piscicole.

La fréquence horaire comprend généralement une heure zéro (*ante operam*), une heure de fin de travail et une ou plusieurs campagnes post-opératoires, en fonction de la nature de l'intervention et des résultats obtenus.