



Interreg



UNION EUROPÉENNE



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds Européen de Développement Régional



SE.D.RI.PORT

Sédiments, Dragages et Risques PORTuaires

Activité T2.5

Capitalisation et perspectives: lignes directrices et préparation de stratégies futures pour la zone de coopération

Livrable T2.5.10

Lignes directrices sur la gestion des sédiments et les risques sur l'environnement côtier lors d'opérations de dragage

La coopération au coeur de la Méditerranée



REGIONE AUTONOMA
DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA
DELLA SARDEGNA



Regione Toscana



Région
Provence
Alpes
Côte d'Azur



REGIONE
LIGURIA



COLLETTIVITÀ DI CORSICA
COLLECTIVITÉ DE CORSE



Interreg



UNION EUROPÉENNE



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds Européen de Développement Régional

Activité T2.5

Capitalisation et perspectives: lignes directrices et préparation de stratégies futures pour la zone de coopération

Livrable T2.5.10

Lignes directrices sur la gestion des sédiments et les risques sur l'environnement côtier lors d'opérations de dragage



Coordinateurs

Nom	Partenaire	Contact
Alessandra Zoppeddu	RAS	azoppeddu@regione.sardegna.it
Simona Macchia	ISPRA	simona.macchia@isprambiente.it



SOMMAIRE

AVANT PROPOS	7
1. Présentation du projet et du partenariat SE.D.RI.PORT	7
2. Objectifs du projet	12
3. Présentation des lignes directrices sur la gestion des sédiments et les risques sur l'environnement côtier pendant les opérations de dragage	13
I^{ère} PARTIE - Résumé des résultats	15
CHAPITRE 1 - Normative de référence	17
CHAPITRE 2 - Cadrage du problème	19
2.1 Capitalisation des précédents projets liés à la problématique	19
2.2 Inventaire des systèmes de surveillance des opérations de manutention des sédiments dans les pays transfrontaliers	21
CHAPITRE 3 - Évaluation des phénomènes d'insablement portuaire	23
3.1 Analyse des besoins et de l'offre du territoire	23
3.2 Évaluation qualitative et quantitative du phénomène d'ensablement dans un port soumis à l'influence d'une rivière	26
3.3 Critères de choix de l'instrumentation à utiliser pour les investigations bathymétriques et morphologiques	29
3.4 Proposition d'instrumentation innovante pour les levés bathymétriques	32
3.5 Utilisation de la modélisation numérique à support de la planification et gestion des activités de dragage dans les différentes phases de conception et de suivi	36
CHAPITRE 4 - Évaluation du risque environnemental des opérations de remobilisation/resuspension de sédiments portuaires	40
4.1 Comparaison entre les techniques classiques de bio-suivi et les techniques innovantes d'échantillonnage passif	40
4.2 Tests d'élutriation des échantillons avec différents rapports eau-sédiments	42
4.3 Mobilité de contaminants métalliques et modifications dans les communautés microbiennes planctoniques résultant de la remise en suspension de sédiments dans des zones marines côtières fortement anthropisées	46
II^{ème} PARTIE - Plan d'Action conjoint	51



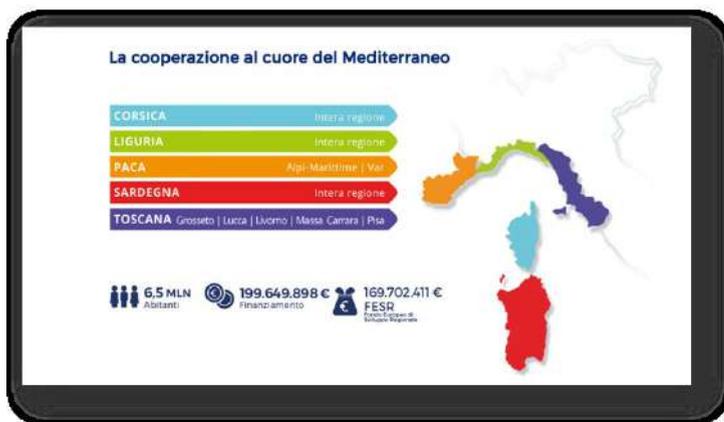
AVANT PROPOS

Édité par RAS

1. Présentation du projet et du partenariat SE.D.RI.PORT

SE.D.RI.PORT (SEdimenti, Dragaggi e RIschi PORTuali - SEdiments, Dragages et RIsques PORTuaires) est un projet, d'une durée de 36 mois, financé par le Programme Interreg Italie-France Maritime 2014-2020 pour un montant total de 1.854.602,16 € dont 1.576.411,83 euros financés par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER).

Le programme Interreg Italie-France Maritime 2014-2020 est un programme transfrontalier cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) dans le cadre de la Coopération Territoriale européenne (CTE). Le programme vise à atteindre les objectifs de la stratégie UE 2020 dans la région centre-nord de la Méditerranée, en promouvant une croissance intelligente, durable et inclusive.



Le programme prend en considération les problèmes des zones marines, côtières et insulaires, mais aborde également les zones internes, avec des risques spécifiques d'isolement.

L'objectif principal est de contribuer au renforcement de la coopération transfrontalière entre les territoires désignés pour faire de cette zone une zone compétitive, durable et inclusive dans le panorama européen et méditerranéen.

Le territoire du Maritime comprend les zones côtières transfrontalières françaises et italiennes suivantes:

- En France: Départements du Var et des Alpes Maritimes, Communauté Corse
- En Italie: Régions de la Ligurie et de la Toscane, Région Autonome de la Sardaigne

SE.D.RI.PORT est un projet porté par le Département des Transports de la Région Sardaigne, chef de file, en partenariat avec le Département du Var, l'Université de Cagliari, l'Université de Toulon, la Province de Livourne, l'Agence régional de protection de l'environnement de Ligurie, l'Institut supérieur de protection de l'environnement et l'Office des transports de Corse. Outre les partenaires du projet, l'Autorité du système portuaire de la mer de Sardaigne, la Ville métropolitaine de Cagliari, l'Autorité du système portuaire de la mer Tyrrhénienne du Nord et la Municipalité de Port Grimaud ont été convenus pour la mise en œuvre des activités.



**REGIONE AUTÒNOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

Région Autonome de la Sardaigne - Assessorat des transports

Le Assessorat des Transports est responsable des infrastructures et des services de transports publics au niveau régional, des liaisons maritimes avec les îles mineures et aussi des liaisons aériennes avec la péninsule. Le Service des infrastructures, planification stratégique et investissements dans les transports, assure la planification, la coordination, la mise en œuvre et la supervision des interventions infrastructurelles en ce qui concerne les transports. Etudes de faisabilité, planification des interventions infrastructurelles et participation aux comités techniques régionaux. Suivi, comptes rendus financiers et attribution de ressources communautaires, nationales et régionales sur les interventions infrastructurelles. Le service travaille sur des projets expérimentaux et innovants dans la région, en concertation avec les communautés locales et les autorités portuaires, sur des stratégies à moyen et long terme pour la mise en valeur et le développement économique de l'île ; ses interventions ont des répercussions importantes et directes sur les composantes productives, touchant le pouvoir concurrentiel du territoire.

8



Université de Cagliari

Le Département des Sciences Médicales et de la Santé Publique (DSMSP) de l'Université de Cagliari, et en particulier le Laboratoire d'hygiène environnementale (LIA), mène des investigations visant à la caractérisation chimique et physico-chimique des sédiments marins, au transfert de contaminants dans la colonne d'eau et dans les chaînes trophiques, à la biodisponibilité des contaminants, à l'utilisation d'indicateurs. Le DSMSP possède une vaste expérience dans l'étude de zones côtières ou lagunaires polluées. En Sardaigne l'attention a été donnée à la contamination des sédiments portuaires (port industriel de Portovesme, Porto Torres, Cagliari, Olbia). Depuis 2005, le DSMSP est engagé au niveau international dans la recherche concernant le développement et l'utilisation d'échantillonneurs passifs de polluants organiques et inorganiques dans l'eau de mer, à utiliser en synergie ou en remplacement des indicateurs biologiques (par exemple les moules) actuellement utilisés pour mesurer la biodisponibilité des contaminants.



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Institut supérieur de protection et de recherche de l'environnement

L'ISPRA est un organisme public qui mène des activités de recherche, d'expérimentation, de suivi, d'assistance technique et scientifique, ainsi que des activités de diffusion sur les questions environnementales. ISPRA réalise des études et des applications technico-scientifiques dans le domaine du dragage portuaire, concernant la caractérisation environnementale et la gestion des sédiments portuaires suite à l'ensablement, y compris l'identification des sites de déversement contrôlé en mer, et le suivi des activités de manipulation des sédiments.



Provincia di Livorno

La Province de Livourne a promu et mis en œuvre de nombreux projets dans les domaines des transports, des ports et de l'aménagement du territoire. Il a joué le rôle de coordinateur/chef de file dans des projets et des initiatives sur tout le territoire côtier toscan de la zone du programme Maritime 2014-2020. Ces initiatives ont été conçues pour combiner les secteurs des infrastructures et économiques, en particulier les activités portuaires maritimes et le tourisme, en vue d'une croissance harmonieuse et durable. La coopération transfrontalière dans l'espace nord Méditerranéen a favorisé la valorisation et les échanges pour améliorer la mobilité des passagers et des marchandises en milieu urbain et extra-urbain, l'accessibilité pour tous aux côtes et aux services et la protection du littoral.

9



LE DÉPARTEMENT

Département du VAR

Le département du VAR travaille depuis le début des années 2000 sur la problématique de la gestion des sédiments marins. D'abord il travaille, toujours dans les limites de ses compétences, dans la gestion portuaire, puis dans le domaine de la gestion des déchets et enfin aujourd'hui dans le domaine de l'assistance aux municipalités, en appui à la Commune de Grimaud sur le problème de l'ensablement. Le département du VAR a mené, en tant que chef de file, deux grands projets liés à la gestion des sédiments. Le premier (2005-2009) appelé "Gestione ambientale dei SEDimenti MARini Dragati SEDIMARD 83 - Gestion

environnementale des SEDiments MARins Dragués SEDIMARD 83” avait pour objectif d’analyser l’ensablement des ports en identifiant quantitativement et qualitativement le dépôt des sédiments portuaires dans le VAR. Des nombreux partenaires français et italiens ont participé à ce projet: Ministère de la Défense, Département des Alpes Maritimes, Ville de Marseille, Département du Finistère et la Région Émilie-Romagne .



Université de Toulon

L’Université de Toulon, via ses chercheurs de l’Institut Méditerranéen d’Océanographie (IMO) mène des recherches permettant de comprendre l’influence des activités humaines sur le fonctionnement de l’environnement marin, d’identifier des indicateurs d’impact et de développer des outils d’évaluation. Les chercheurs des équipes CEM (Chimie de l’Environnement Marin) et MEB (Microbiologie de l’Environnement et Biotechnologie) travaillent notamment, depuis maintenant plus de 10 ans, sur l’impact des activités portuaires. Ils ont notamment contribué à des diagnostics de contamination chimique des sédiments qui s’accumulent dans les ports, à l’étude du transfert de contaminants chimiques depuis ces sédiments vers la colonne d’eau, ainsi qu’à l’identification des conséquences de la remise en suspension des sédiments pour la diversité et les dynamiques microbiennes.

10



Agence régionale pour la protection de l'environnement ligurien

L'ARPAL réalise des activités de suivi et de contrôle de l'environnement, donne support technique à la Région Ligurie et aux autorités locales, pour la protection de l'environnement, pour la protection des ressources en eau, la protection des sols, la protection civile, la prévention et la promotion de la santé et de la sécurité collective. Planifie, organise et gère des plans de suivi environnementaux pour évaluer la qualité du milieu marin, conformément aux réglementations italiennes et européennes en vigueur. Il participe à la définition des lignes directrices/modes opératoires pour la relative transposition réglementaire et législative. Il mène des activités de contrôle des activités de dragage et du suivi environnemental qui y est associé. Il réalise des prélèvements et des analyses de matrices environnementales, ainsi que la détection des paramètres chimiques et physiques de la colonne d'eau à l'aide d'instrumentation spécifique.



Bureau des transports de la Corse

La Collectivité territoriale de Corse (CTC), avec son organe instrumental régional, à savoir l'Office des Transports, dispose de nombreuses compétences dans le domaine des transports. L'OTC a pour Président l'assesseur régional (Conseiller Exécutif) pour les transports. La Collectivité territoriale de Corse a également pour mission de développer la structure territoriale. La CTC identifie les axes de développement régional avec des plans de développement urbain et rural (Plan d'Aménagement et de Développement Durable de la Corse PADDUC). En sa qualité de propriétaire des routes, chemins de fer, ports et aéroports de l'île, détermine et assure, par l'OTC, la politique des transports sur route, rail, mer et aérien. Elle identifie les modalités de continuité territoriale entre la Corse et le continent français. Identifie les obligations de service public pour les liaisons aériennes et maritimes à destination et en provenance de la Corse et en particulier entre la Corse et la Sardaigne et le continent italien.



2. Objectifs du projet

SE.D.RI.PORT. (SEdiments, Dragage et Risques PORTuaires) est un projet conçu pour améliorer la prévention de l'ensablement des ports et la gestion des risques liés aux opérations de manipulation des sédiments à travers un plan d'action conjoint et le partage de lignes directrices visant à soutenir des actions de gouvernance et de proposer une législation uniforme applicable à l'ensemble de la zone transfrontalière. L'objectif est d'identifier une solution commune au problème de l'ensablement et par conséquent les opérations utiles à la reconstitution des fonds marins.

La manipulation des sédiments marins en zone portuaire est un sujet d'une importance considérable pour les ports de la zone de coopération où, parallèlement à la nécessité de construire des nouvelles infrastructures, il est nécessaire de rendre plus profonds les fonds marins pour permettre l'accès à des navires de plus en plus gros, et d'assurer l'entretien des fonds marins soumis à des ensablements rapides rendus de plus en plus dramatiques en raison des changements climatiques et des phénomènes météorologiques extrêmes qui en résultent.

L'excavation des fonds marins et l'éventuel rejet de sédiments dragués dans la mer est une activité à risque considérable en raison des contaminants qui leur sont associés, résultant des activités industrielles et commerciales présentes dans les zones portuaires. Cependant, l'expérience passée enseigne que dans certains ports ces sédiments ne présentent pas de polluants et se prêtent à une remise en mer (dumping/immersion), ce qui est moins impactant que de les placer à terre comme déchets.

En Europe, il n'y a pas de directive spécifique sur le sujet, mais des indications générales incluses dans certaines conventions: la Convention de Londres de 1972 (DMAF - "Dredged Material Assessment Framework") et le protocole relatif de 1996, la Convention de Barcelone (norme Dumping de 1995) pour la région méditerranéenne, la Convention d'Oslo et de Paris de 1992 (OSPARCON) pour la région de l'Atlantique du Nord-est et la Convention d'Helsinki de 1972, ratifiées par les pays riverains de la mer Baltique.

SE.D.Ri.PORT. a bénéficié de la contribution de divers autres projets qui ont permis de collecter des informations importantes sur l'état des ports, expérimentant des systèmes de suivi du milieu marin. Il ressort des analyses menées dans cette expérience et dans les précédentes, que les changements climatiques jouent un rôle déterminant en favorisant l'ensablement structurel des ports et en accélérant la dynamique d'ensablement, augmentant à la fois les risques pour l'environnement et les risques pour les activités économiques liés au transport maritime. Il est évident qu'une action non rapide de restauration des tirants hydrauliques met le tissu économique et social de communautés entières en crise, notamment dans les îles. Par conséquent, l'identification conjointe de procédures opérationnelles et de stratégies d'intervention communes tend à minimiser les effets négatifs de l'ensablement en obtenant une meilleure fiabilité des ressources portuaires disponibles pour l'économie locale avec tout ce qui suit en termes de garantie d'efficacité dans toute la zone transfrontalière.



3. Présentation des lignes directrices sur la gestion des sédiments et les risques sur l'environnement côtier pendant les opérations de dragage

Ce document est divisé en deux parties:

- **Résumé des résultats:** cette section présente les principales activités menées par les partenaires du projet et les résultats obtenus;
- **Plan d'Action Conjoint:** SE.D.Ri.PORT. est le précurseur des projets financés dans le pôle thématique “Lutte contre l'ensablement des ports”, SEDITERRA et GRAMAS, et a pour mission de coordonner la rédaction d'un Plan d'Action Conjoint partagé par les trois projets. La deuxième partie du document illustrera les actions prioritaires développées par SE.D.Ri.PORT., SEDITERRA et GRAMAS pour accompagner les autorités locales dans la planification des activités de prévention de l'ensablement des ports et de la gestion des sédiments dragués en milieu aquatique et terrestre.





1^{ère} PARTIE **Résumé des résultats**





CHAPITRE 1 - Normative de référence

Edité par ISPRA

L'un des premiers objectifs du projet SE.D.RI.PORT était de comparer les réglementations ordinaires et les critères actuellement adoptés en Italie et en France pour identifier les bonnes pratiques dans le domaine du dragage et de la gestion des sédiments et définir des lignes directrices à utiliser comme référence unique pour la zone transfrontalière (*Produit T1.2.2 - Etude comparative de la normative*).

A titre préliminaire, les indications des réglementations internationales en matière de protection de l'environnement ont été examinées, en particulier le Protocole 96 de la Convention de Londres et la Convention de Barcelone pour la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée. Les réglementations nationales individuelles ont ensuite été analysées.

En général, dans le cas de l'Italie, les activités de manipulation des sédiments doivent être menées de manière à garantir non seulement la "non-aggravation" de la condition initiale, mais également la compatibilité avec la réalisation des objectifs de qualité fixés. Les interventions de dragage dans le port et la zone maritime côtière (à l'exception des zones faisant partie des sites de remise en état d'intérêt national - SIN) sont régies par l'article 109 du décret législatif 3 avril 2006, n. 152 et en particulier par le D.M. 15 juillet 2016, n. 173, qui introduit la notion de "ressource" pour le matériel produit par l'excavation qui doit être récupéré et réutilisé, en aval d'un processus de caractérisation physique, chimique et écotoxicologique, à l'issue duquel un projet spécifique de gestion doit être préparé. La grande nouveauté par rapport au passé est que l'identification de la qualité des sédiments passe d'une approche de type tabulaire à des critères d' "intégration pondérée" où le nombre de contaminants dépassant le niveau chimique de référence est pris en compte ainsi que l'étendue de ces dépassements et le type de contaminants.

Une autre nouveauté introduite concerne les analyses écotoxicologiques qui sont évaluées dans leur ensemble au niveau de la batterie et non comme un test unique, pesant la pertinence biologique des effets mesurés, la signification statistique du résultat, la pertinence écologique de la matrice testée, ainsi que le type d'exposition. Des dosages de type chronique sont également introduits pour la première fois. Cela représente une grande différence par rapport à la France, qui applique toujours une approche "tabulaire", dans laquelle la classification chimique est déterminée par le dépassement, même léger et pour une seule substance, d'un niveau de référence chimique et la classification écotoxicologique est basé sur le pire résultat obtenu à partir d'une batterie d'au moins 3 dosages biologiques.

À l'instar de la situation française, la législation sur l'évaluation des impacts sur l'environnement a été récemment mise à jour suite à la transposition de la directive 2014/52/UE par le décret législatif 104 de 2017. Dans ce cas, dans la disposition unique sur les questions environnementales l'autorisation concernant la discipline de la plongée en mer serait demandée pour les projets de compétence de l'Etat.

Afin de disposer d'un cadre de comparaison immédiat entre les réglementations des deux pays et les différentes applications en matière de dragage et de réutilisation des déblais de dragage, un questionnaire spécifique a été élaboré et ensuite complété par les partenaires du projet. De la comparaison directe entre la législation italienne (hors SIN) et la législation française, résultant de la comparaison des questionnaires, certaines similitudes émergent. Par exemple, en ce qui concerne la procédure de caractérisation, les deux normatives sont comparables pour le choix de la stratégie d'échantillonnage en fonction de la quantité à draguer et la possibilité de créer des échantillons composites, pour les paramètres



chimiques à analyser, pour l'utilisation de 2 niveaux de référence chimiques et pour l'utilisation d'une batterie d'essais biologiques.

Cependant, il existe des différences substantielles concernant la gestion des matériaux de dragage en mer: alors que la législation française offre la possibilité ou non de les plonger en mer, en fonction d'une part des résultats chimiques et d'autre part des contrôles écotoxicologiques qui cependant ils ne sont pas réglementés comme en Italie ; au contraire, la récente législation italienne, avec le décret ministériel 173/2016, se base sur une approche détaillée de la caractérisation, plaçant la vérification écotoxicologique avant les investigations chimiques et utilisant un critère d'intégration pondéré pour la classification et les options de gestion en milieu marin, y compris l'alimentation des plages, l'immersion délibérée dans la mer et le dépôt dans un environnement confiné.

Une autre différence importante concerne les indications fournies concernant le suivi, qui dans le cas de la France ne sont pas obligatoires.

En ce qui concerne l'utilisation à terre et les traitements, la législation française est très détaillée dans le cadre de la filière terrestre, prévoyant une valorisation directe ou indirecte (après traitement) ou un stockage final. Les traitements comprennent : lagunage, déshydratation, criblage/tamassage. Cependant, l'évaluation des dangers n'a pas été conçue pour être utilisée dans un environnement marin et n'est actuellement pas réglementée dans une législation spécifique. De plus, les niveaux chimiques de référence et d'évaluation ont été calculés sur une base statistique et non sur une base écotoxicologique, c'est-à-dire en testant les sédiments au moyen d'une batterie d'essais biologiques. Cela représente en effet une réelle lacune réglementaire qui n'est que partiellement compensée par les lignes directrices sur les bonnes pratiques, qui sont en tout cas applicables sur une base volontaire.

18

La législation italienne en dehors du SIN, en revanche, ne contient pas d'indications spécifiques pour le traitement et la réutilisation des sédiments marins à terre.



CHAPITRE 2 - Cadrage du problème

2.1 Capitalisation des précédents projets liés à la problématique

Edité par AdSP Mare di Sardegna - Olbia

Pour mieux comprendre le contexte dans lequel s'inscrit le projet SE.D.RI.PORT, une première collecte d'informations utiles a été entreprise pour comprendre la délicate question de l'ensablement des ports (*Produit T.1.1.1 "Bibliographie des projets existants"*). Dans l'étude, on a collecté des informations sur le processus d'approche au sujet, qui passe par les étapes de caractérisation, dragage et gestion des sédiments depuis le début jusqu'aux dernières innovations dans les domaines technologiques et environnementaux.

De l'analyse des techniques et des types de systèmes qui peuvent être adoptés pour réaliser le dragage, on peut déduire que chaque intervention est unique dans son ensemble, car son unicité est dictée par une réalité complexe qui tourne autour d'un système, où les facteurs sont nombreux et tous doivent être fondés sur une perspective qui, avec des évaluations appropriées et des moyens spécifiques, atteint ces stratégies et techniques de planification et de gestion du territoire, qui ne doivent plus être considérées comme de simples opérations d'excave, mais doivent prendre dûment en considération tous les aspects relatifs à la protection de l'environnement aquatique et terrestre.

Les tendances réglementaires actuelles dans le secteur considèrent les sédiments comme une ressource et non plus comme un déchet devant être éliminé. Déjà en phase de conception, un plan de caractérisation de la zone soumise au dragage est envisagé pour déterminer la bonne gestion des sédiments à draguer.

Dans le document "Bibliographie des projets existants", des exemples significatifs de projets et d'études de cas ont été rapportés, certains relatifs à la réutilisation des sédiments dragués, qui montrent l'efficacité des technologies de traitement, désormais consolidées, et une approche intégrée de gestion durable, combinant toutes ces techniques innovantes visant à recycler et valoriser les matériaux de dragage, comme dans le projet Coast-BEST, par exemple. Dans le projet LIFE15 ENV/ IT/000391 MARINA PLAN PLUS, en revanche, une approche totalement innovante est mise en évidence, le dragage sans dragage, à travers l'utilisation d'éjecteurs. Ces dispositifs, convenablement rincés à l'eau sous pression, sont capables d'aspirer le mélange solide/liquide présent dans les environs et de l'évacuer, au moyen d'une canalisation, dans une zone où il ne constitue pas un obstacle à la navigation, gardant ainsi toujours constante la profondeur du fond marin. Avec cette technologie, les processus d'ensablement seraient complètement éliminés, et de conséquence les dragage. Une approche, cette dernière, intéressant les Autorités Portuaires (réduire les opérations de dragage) qui ont montré, pendant la durée du projet, des difficultés persistantes, en termes de temps et de méthodes, pour les autorisations de dragage et pour l'utilisation des sédiments dragués. Difficultés qui, comme le montrent les rapports annuels des AdSP italiennes, limitent fortement les activités portuaires.

Tous les effets découlant du dragage, qu'ils soient positifs ou négatifs, doivent être soigneusement identifiés dès la phase de conception, avec une attention aux évaluations des impacts qu'ils pourraient avoir sur l'environnement, en proposant les mesures d'atténuation les plus adaptées et les plus économiques au même temps, au cas par cas, en envisageant également les solutions les plus appropriées pour gérer le matériel de dragage, en fonction des possibilités de réutilisation en mer, d'alimentation des zones côtières, de confinement, de traitement ou de combinaisons de ces derniers.



Dans le cadre général européen, on pourrait affirmer que la sensibilité développée par les différents pays appartenant à l'Union Européenne (UE), se concentre de plus en plus sur une approche environnementale, abordant la question avec la juste importance pour la correcte manipulation et gestion des sédiments.

En Italie, ce type d'approche a récemment été traité avec plus de soin, selon la logique précitée, en fait on essaye d'intervenir au niveau national, selon une planification et une programmation des interventions dans le respect des dispositions des conventions internationales en vigueur, pour une utilisation du matériel de dragage, le considérant non plus seulement comme un déchet à éliminer mais aussi comme une ressource réutilisable, selon le principe d'une économie circulaire, utile pour améliorer les conditions de vie et de l'environnement.

Voici une liste de liens utiles pour en savoir plus sur le sujet de l'ensablement des ports :

<http://www.lifemarinaplanplus.eu/it/life-15>

http://www.jandenui.com/sites/default/files/activity-category/brochures/dragaggi_ed_opere_marittime_it.pdf

<http://www.cap-sediments.fr/pdf/gt/guide-analyse-multicritere-cap-sediments-28129.pdf>

<http://www.green-site.net/>

<http://www.lifemarinaplanplus.eu/it/progetto>

<http://www.pdc.minambiente.it/progetti/coast-best-trificazione-e-riuso-dei-sedimenti-di-dragaggio-una-rete-di-piccoli-porti>

<http://www.pdc.minambiente.it/progetti/coast-best-trificazione-e-riuso-dei-sedimenti-di-dragaggio-una-rete-di-piccoli-porti>

http://www.coast-best.eu/?page_id=512

<http://www.primadanoi.it/news/cronaca/573544/la-macchina-del-fango-scarichera-i-sedimenti-del-porto-di-ortona-al-largo-di-pescara.html>

<http://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00004200/4233-c2738-m6-u2.pdf>

<http://www.labelab.it/site/wp-content/uploads/sites/9/atti/WL-5-Saccani.pdf>

http://www.scienzecostiere.unipr.it/PDF/Present%20Try%20fin%2010-11%20pdf/Michela_Adorni_29.08.11.pdf

<https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/481519DA1B0207CDC12574B0002A8451?OpenDocument>

https://www.arpae.it/cms3/documenti/cerca_doc/ecoscienza/ecoscienza2017_3/servizi/mare_es_2017_03.pdf

<https://www.keep.eu/keep/project-ext/42999/GRAMAS>

<https://sednet.org/>

<https://www.cerema.fr/fr/system/files/documents/2017/10/3-%20Nathalie%20DUMAY-COTITA%20-%20r%C3%A9glementation%20-%20novembre%202016.pdf>

http://www.side.developpementdurable.gouv.fr/EXPLOITATION/DEFAULT/doc/IFD/IFD_REFDOC_05_12344/dragage-en-milieu-marin-immersion-et-code-de-l-environnement-le-guide-des-procédures-préalables_#

<http://www.comunecervia.it/citta/notizie/notizia/progetto-innovativo-contro-linsabbiamento-dei-porti.html>



2.2 Inventaire des systèmes de surveillance des opérations de manutention des sédiments dans les pays transfrontaliers

Edité par ISPRA

Les directives communautaires sur le dragage reposent sur le principe fondamental du maintien ou de la réalisation des objectifs de “bon état chimique et écologique” (directive 2000/60/CE). Les activités de manipulation des sédiments doivent donc être conduites de manière à garantir la “non détérioration” de l'état environnemental constaté et la compatibilité avec l'atteinte des objectifs de qualité fixés.

En Italie, les opérations de dragage dans les zones marines portuaires et côtières sont régies par les décrets ministériels 172 et 173 de 2016, qui ont respectivement pour objet le “Règlement régissant les procédures et les normes techniques des opérations de dragage dans le SIN” et le “Règlement contenant les procédures et les critères techniques pour l'autorisation d'immersion en mer de matériaux excavés des fonds marins”.

La conception des plans de suivi des différentes activités de manipulation des sédiments, qu'il s'agisse de dragage, de transport, de dépôt et/ou de reflux, s'inscrit dans ce contexte réglementaire.

Un système de suivi conçu pour une zone portuaire spécifique est un outil efficace pour suivre l'évolution dans le temps de la qualité du milieu marin en présence et en l'absence de mouvement de sédiments. Quelle que soit l'intervention de manutention à réaliser à l'intérieur d'un port, la mise en œuvre d'un plan de suivi adéquat ne peut pas être ignorée, ce qui constitue un élément fondamental dans la conception et l'exécution de l'ensemble des activités de manutention.

L'objectif principal d'un plan de suivi doit être la vérification de l'hypothèse d'impact, ou encore l'évaluation de l'ampleur des effets de la manipulation des sédiments sur le compartiment abiotique et biotique et la tendance à restaurer les conditions initiales. En particulier, pendant le suivi, il est essentiel de faire attention à la variation de la biodisponibilité des substances potentiellement toxiques, à l'apparition de changements “précoces” dans les indicateurs biologiques (biomarqueurs) et des effets toxiques à court ou à long terme, ainsi que des modifications portées aux biocénoses, en particulier les habitats et les espèces présentant un intérêt pour la conservation.

Le plan de suivi doit être en fonction des caractéristiques environnementales de la zone affectée par les opérations et de la présence d'éventuels récepteurs sensibles, qui pourraient être affectés par les effets de la remise en suspension des sédiments ; il doit également répondre au principe de gradualité : le nombre de stations, l'emplacement, la fréquence des investigations, les paramètres à suivre dans la colonne d'eau, dans les sédiments superficiels et dans le biote doivent être proportionnels à la quantité et à la qualité des matériaux à manipuler et à la durée et aux modes opératoires liés au milieu des interventions spécifiques.

Les modes opératoires adoptés doivent se baser sur des critères communs essentiels, tout d'abord la subdivision des activités de suivi en différentes phases temporelles, précédant, contextuelle et postérieure au dragage : *ante-operam*, en cours de travaux et *post-operam*.

L'objectif de l'activité T1.5 était d'acquérir des informations sur les systèmes de suivi adoptés par des différentes entités portuaires de la zone transfrontalière, tant en présence qu'en absence d'activités de dragage (Gênes, La Spezia, Livourne, Castiglione della Pescaia, Scarlino, Olbia, Cagliari et Port Grimaud). L'enquête a été menée à travers la diffusion d'un questionnaire, élaboré par l'ISPRA avec le soutien de l'ARPAL, structuré en deux sections différentes, contenant des questions spécifiques, formulé dans le but de rassembler toutes



les informations utiles pour cadrer à la fois le type de suivi et les différentes matrices impliquées dans les activités de contrôle et d'analyse.

En particulier, dans la première section, des informations ont été demandées sur les systèmes de suivi adoptés en l'absence de manipulation, et pour chaque matrice étudiée, il a été demandé d'indiquer les paramètres surveillés, les instruments utilisés, les fréquences de contrôle et le nombre de stations. Dans la deuxième section, en revanche, des informations ont été demandées sur l'ensemble des activités de manutention réalisées dans les ports, avec des références précises sur les volumes concernés et les instruments utilisés, ainsi que sur les plans de suivi mis en place au cours de ces activités.

Les réponses reçues ont permis de mettre en évidence une situation assez hétérogène : alors que dans le port de La Spezia, et en partie dans le port de Gênes, un suivi de l'ensemble de la zone portuaire et des zones environnantes a été mis en place, étendu à différentes matrices environnementales, en présence de et en l'absence d'activités de manutention, dans d'autres situations, comme dans le port de Livourne, le suivi a été ponctuel et limité à la durée et à la modalité de l'intervention prévue. Dans d'autres cas, par contre, aucun système de suivi n'a été mis en place.

Le réseau de suivi proposé, tant dans le cas du port de Gênes que dans la baie de La Spezia, s'est avéré efficace, tant aux fins de la protection de l'environnement et des diverses utilisations légitimes de la mer que pour la vérification de l'efficacité des mesures techniques et opérationnelles adoptées.

Certaines différences apparaissent également en ce qui concerne le dimensionnement du plan de suivi. Dans la baie de La Spezia, le système a été calibré en fonction du contrôle des installations piscicoles et mytilicoles présentes à l'intérieur et à l'extérieur de la baie, ainsi que des biocénoses sensibles présentes dans les zones voisines. A Gênes, en revanche, une attention particulière a été portée au suivi de la turbidité, contextuelle aussi au passage des ferries, et au respect des paramètres de baignade.

Les situations dans lesquelles des activités de suivi ont été menées, bien qu'avec des approches différentes, ont mis en évidence l'importance de préparer des plans adéquats de suivi du dragage des sédiments portuaires, calibrés sur les spécificités des sites concernés et en relation avec les techniques de manipulation utilisées, tant aux fins de la protection de l'environnement et des différentes utilisations légitimes de la mer que pour vérifier l'efficacité des mesures techniques et opérationnelles adoptées.



CHAPITRE 3 - Évaluation des phénomènes d'insablement portuaire

3.1 Analyse des besoins et de l'offre du territoire

Edité par RAS et par la Ville métropolitaine de Cagliari

A partir de l'analyse des besoins et de l'offre du territoire, il a été possible d'obtenir différents types d'informations concernant les ports. Les informations collectées peuvent être divisées en deux macro-catégories : de nature purement descriptive et de nature technique.

Les premières concernent la dénomination, le lieu, le type et l'autorité compétente et étaient faciles à trouver grâce à une littérature abondante.

Les secondes, celles de nature technique, concernent la périodicité de l'activité de dragage, y compris la dernière et la prochaine excavation, le type de sédiments dragués et leur réutilisation, les méthodes de dragage et enfin le suivi, considéré comme l'ensemble d'activités nécessaires pour enregistrer la progression de l'accumulation des sédiments ou pour assurer la conservation de la qualité des eaux. Ces dernières informations étaient plus complexes à trouver et ont vu la participation des principales entités impliquées, à savoir les autorités portuaires, l'ISPRA, les Régions, etc. Une intense activité de recherche documentaire a aussi été nécessaire, qui a permis de repérer des informations même très récentes comme l'excavation du port de Savone actuellement en place.

Dans les ports italiens présents dans la zone du programme Maritime, on drague en moyenne plus que dans les ports français (le seul port parmi ceux objet de ces travaux où des activités de dragage ont été mise en place est Port-Grimaud, dans lequel il y a eu 4 excavation de 2014 à 2017) et le dragage est presque toujours fait pour garantir des tirants hydrauliques adéquats. Il existe des ports comme ceux de la Toscane qui, par rapport aux ports sardes et ligures, se caractérisent par une activité de dragage très intense, imputable principalement à leur emplacement, en fait ils sont souvent situés près de l'embouchure des rivières et des canaux, ainsi qu'à la nécessité d'assurer l'alimentation constante des plages voisines. Le port de Viareggio, par exemple, est dragué chaque année depuis 2002 avec la possibilité de connaître cette même fréquence également à l'avenir ; il en est de même pour le port de Livourne, pour lequel s'il n'a pas été possible de retracer une fréquence précise sur le long terme, il a tout de même fait l'objet d'interventions annuelles au cours des cinq dernières années. En revanche, plusieurs ports de Sardaigne n'ont pas été dragués depuis plus de vingt ans, comme le port de Santa Teresa di Gallura, ou n'ont jamais été dragués (sauf au moment de leur construction) comme Porto Corallo.

Par contre, il a été possible de recueillir peu d'indications sur les activités de suivi, bien que celles-ci soient presque toujours mises en œuvre par des organismes publics ou par des organisations reconnues selon la norme UNI CEI EN 17011/05. Bien que la loi rend obligatoire la préparation d'un plan de suivi, un certain nombre de campagnes d'excavation n'ont été associées à aucun suivi ou dans d'autres cas, il n'a pas été possible de savoir si cela avait été fait. Une plus grande attention à cet aspect se trouve dans les campagnes d'excavation les plus récentes, grâce à l'entrée en vigueur de l'arrêté ministériel du 15 juillet 2016, n. 173 "Autorisation à l'immersion en mer de matériaux provenant de l'excavation des fonds marins - dragage - Application de l'article 109 du décret législatif 152/2006".

De même, dans le cas de la caractérisation des sédiments, nécessaire à la détermination de la destination de ces derniers, les données sont quasiment indisponibles notamment dans les petits ports, mais en appliquant un processus de rétro-ingénierie compte tenu de leur destination il est encore possible de comprendre la nature du matériel. C'est le cas par



exemple du port de Chiavari et de celui de Loano où les sédiments dragués ont été utilisés pour alimenter et/ou créer des nouvelles plages.

Les ports italiens perdent beaucoup de leur trafic en raison de l'ensablement des fonds marins (par exemple le port de Piombino, bien que candidat à la mise au rebut du navire Concordia, manquait à l'époque d'infrastructures et de fonds marins adéquates à accueillir l'épave, perdant effectivement l'occasion) ainsi que de nombreuses plages perdent des touristes en raison de l'érosion côtière. En amont, les barrages sur les rivières ont accéléré ce processus en se remplissant de sédiments. La réalisation d'un barrage sur un cours d'eau fait que la charge solide normalement portée par le système fluvial se déposera dans la barrière sans être en mesure d'atteindre ensuite la vallée où, au même temps, on assiste à une diminution de la sédimentation ce qui entraîne l'érosion. Ce déséquilibre doit être corrigé chaque année avec des travaux coûteux qui donnent un sentiment d'impuissance étant donnée la récurrence rapide du problème.

Le dragage représente un coût énorme et se fait beaucoup moins que nécessaire à la fois en raison du manque de financement et du problème environnemental qu'il représente. Il suffit de citer simplement le port de Massa Carrara dont le cas est exemplaire. Le port est un site SIN (site d'intérêt national) de 3.560 hectares dont 1.895 à la mer. Entre 2002 et 2013, 8,6 millions d'euros ont été consacrés au dragage de seulement 120.000 mètres cubes de matériaux à un prix moyen de 72 €/mètre cube. Les analyses de 2006 ont calculé 203 €/m³ pour 10.000 m³ au total alors qu'en 2011 ils étaient de 58.000 m³ à 25 €/m³.

Le transport des sédiments doit avoir lieu dans le but de minimiser l'augmentation de la turbidité liée à la remise en suspension des sédiments, malheureusement pas tous les godets avec lesquels le dragage est effectué ont la capacité de minimiser le rejet du composant fin dans l'eau, provoquant ainsi une augmentation potentielle de la turbidité et de la diffusion des polluants dans les environs. Ces effets se produisent à la fois sur le secteur abiotique et sur le secteur biotique. Le terme abiotique désigne la composante non vivante d'un environnement naturel, tandis que le terme biotique en désigne la composante vivante. Lorsque les sédiments sont contaminés, les effets principalement physiques sont aggravés par ceux causés par la dispersion des contaminants présents dans les sédiments.

Le cas du port de La Spezia est indicatif, ici les travaux de dragage ont été suspendus pendant longtemps car les barrages flottants adoptés pour contenir la dispersion des polluants, n'avaient pas été ancrés au fond marin lors du dragage, avec pour conséquence des fuites de boue et une détérioration importante de l'environnement de tout le golfe.

Si à ces considérations s'ajoute aussi la législation de protection du littoral, le problème de l'ensablement des ports prend des aspects dont la résolution est très complexe. Les différentes conditions environnementales favorisent le dépôt de sédiments marins de composition, structure et origine différentes. Les sédiments marins sont constitués d'un mélange de matières détritiques plus ou moins grossières, dérivées de sédiments continentaux préexistants, et de matières dérivant de la précipitation chimique ou biochimique des sels contenus dans l'eau de mer et des résidus de l'activité organique présente. Les eaux de surface reçoivent également des apports ponctuels et diffus, représentés par les eaux usées liquides et les déchets solides de diverses natures, produits par les activités urbaines et industrielles, par le lessivage des sols, par les déversements accidentels et par les infiltrations. Ces apports contiennent des éléments contaminants, même dangereux, qui, accumulés dans les sédiments, peuvent persister dans l'environnement pendant de longues périodes, en particulier dans les plans d'eau à faible renouvellement.



L'analyse a également mis en évidence que dans certains ports (Porto Corallo, Santa Teresa di Gallura) l'activité de dragage est quasiment inexistante et les raisons peuvent être retracées, une fois encore, à la fois dans les considérations énumérées ci-dessus, à savoir coût de l'investissement très élevé et donc un manque de financement, mais aussi dans la non-nécessité substantielle de dragage en raison des caractéristiques spécifiques des ports.

Compte tenu du coût d'une opération de dragage et de tout le corollaire des opérations qu'elle implique, on peut dire qu'elle fait rarement l'objet de petits ports ; ces derniers, dont la fonction est presque principalement récréative, bien qu'ils constituent des opportunités économiques importantes pour les territoires qui les accueillent, ne peuvent guère justifier de telles dépenses. Si d'une part nous avons des ports où le dragage est principalement destiné à assurer la conservation des tirants hydrauliques, comme le port de Savona, d'autre part nous avons des ports où le dragage est effectué afin de garantir de nouvelles fonctions comme Portovesme ou le port de Piombino.

Les conditions météorologiques changeantes, souvent défavorables, extrêmes et inattendues, qui affectent l'écoulement de l'eau et les quantités et types de sédiments normalement transportés par les rivières revêtent une importance stratégique. C'est le cas de la rivière Magra sur laquelle se trouve le port d'Ameglia.

Il y a une manque générale de données à disposition, conditionnée par divers facteurs, en premier lieu la question du décret législatif 169 du 4 août 2016 "*Réorganisation, rationalisation et simplification de la réglementation concernant les autorités portuaires conformément à la loi du 28 janvier 1994, no. 84, en application de l'article 8, paragraphe 1, lettre f), de la loi no. 124*" ; ce dernier a abouti à un transfert important de compétences qui n'est pas encore achevé. A cela s'ajoute la présence simultanée de différents acteurs qui de diverses manières possèdent ou ont possédé la souveraineté dans la gestion du dragage : Régions, Provinces, Consortiums industriels, etc.

Pour rendre le tableau encore plus complexe, il y a l'absence de documentation au format numérique des travaux d'excavation effectués avant les années 2000. De tous les travaux réalisés avant cette date et relevant de la compétence du ministère des Travaux publics (anciennement le Service des excavation des ports - SEP) il n'y a que des documents papier conservés dans des archives difficiles d'accès dans un délai raisonnable. La documentation relative aux interventions les plus récentes, en revanche, était facile à trouver dans les bureaux des autorités portuaires nouvellement créées et des directions régionales des travaux publics (voir le cas du port sarde de Portovesme). Dans le cas des ports français, le matériel fourni (constitué de quelques fiches techniques avec peu de données) s'est révélé insuffisant pour pouvoir approfondir les réflexions.

3.2 Évaluation qualitative et quantitative du phénomène d'ensablement dans un port soumis à l'influence d'une rivière

Édité par VAR-PG et OTC

Dans le cadre de l'activité T1.4 "Analyse de l'ensablement des ports de Grimaud, Porto-Vecchio et Olbia ; propositions de solutions" portée conjointement par l'Office des Transports de la Corse et le Département du Var, la commune de Grimaud a réalisé une analyse qualitative et quantitative du gisement sédimentaire dans l'avant-Port de Grimaud. Ainsi, 5 carottages ont été réalisés dans l'avant-port, le chenal de la Giscle (fleuve côtier) ainsi qu'au droit de la plage de Port-Grimaud. Afin de déterminer l'origine fluviale et/ou marine du gisement sédimentaire présent dans l'avant-port.

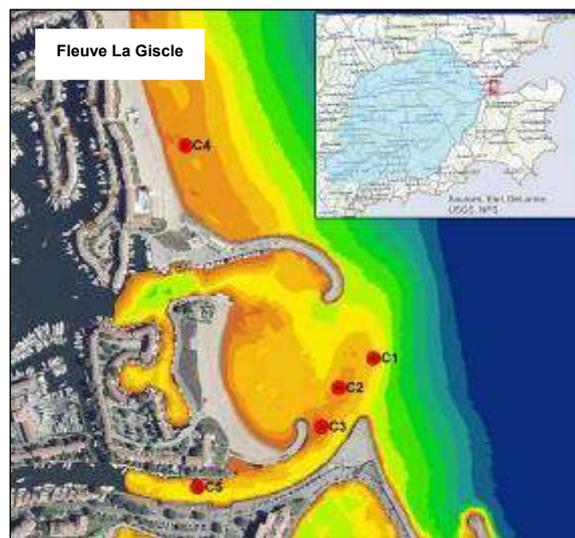


Figure 1 - Passe d'entrée de Port-Grimaud et embouchure de la Giscle

Chaque échantillon a été analysé: granulométrie, teneur en eau, matières organiques et carbonates, diffraction des rayons X, microscope électronique à balayage, analyse thermique différentielle et thermogravimétrie.

Les résultats de l'analyse qualitative (teneur en eau, en matière organiques, analyses granulométriques, analyses MEB) concordent et indiquent que le dépôt sédimentaire situé à l'interface du domaine fluvio-maritime, est une zone d'accumulation d'éléments fins et organiques, transportés par le fleuve "La Giscle" et provenant ainsi principalement du domaine fluvial.

En ce qui concerne l'analyse quantitative, la société CORINTHE Ingénierie a modélisé numériquement les processus hydro-sédimentaires dans l'avant-port de Grimaud afin d'expliquer la dynamique de l'ensablement qui affecte cette zone.

La modélisation concerne houle, vent et niveau d'eau (l'hypothèse est que la sédimentation se fait par temps relativement calme), décharge liquide de la Giscle (l'étude cherche à représenter un épisode de pluie intense), bathymétrie et sédiment (les simulations sont exécutées sur la base de la bathymétrie de projet pour le dragage de l'hiver 2018/2019).



Quatre cas météorologiques sont étudiés :

1. Le cas Houle. Les conditions de houle et de vent sont considérées. Il n'y a pas de courant provenant de la Giscle.
2. Le cas Giscle. Le débit provenant de la Giscle est modélisé. Il n'y a pas de houle ni de vent.
3. Le cas Houle et Giscle. Les conditions de houle et de vent, ainsi que le débit provenant de la Giscle sont modélisés.
4. Le cas Giscle puis Houle. Le débit provenant de la Giscle est modélisé sans houle ni vent, puis les conditions de houle et de vent sont modélisées sans courant provenant de la Giscle.

Ces différents cas permettent de représenter tous les phénomènes météorologiques rencontrés sur la zone d'étude. Le modèle numérique Delft3D est mis en œuvre dans cette étude.

D'après CORINTHE Ingénierie, les dynamiques hydro-sédimentaires dans l'avant-port de Grimaud dans les diverses conditions peuvent être schématisées comme suit:

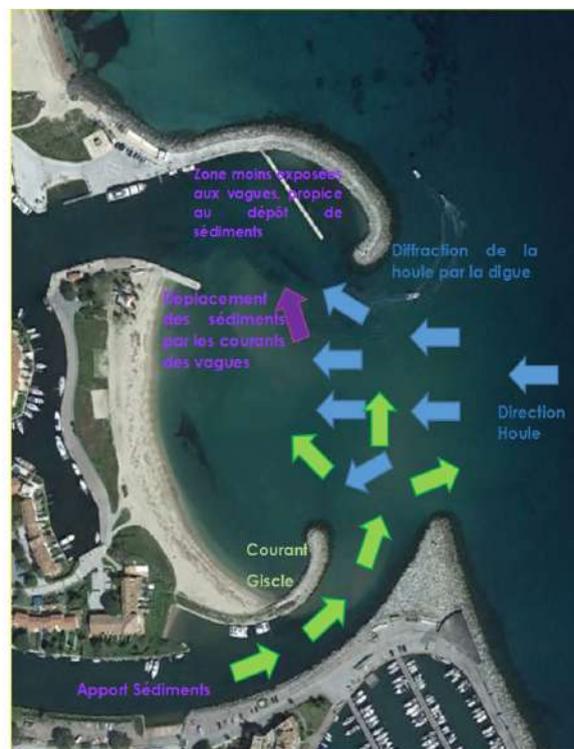


Figure 2 - Dynamique hydro-sédimentaire de l'avant- port de Grimaud

- L'apport principal de sédiments dans la zone se fait par la Giscle. Elle dépose des sédiments au niveau de son embouchure immédiate, formant ainsi une structure sédimentaire, la «bosse de sable».
- Lors des coups de mer, les courants de houle créent un mouvement d'ensemble déplaçant les sédiments de l'embouchure de la Giscle vers la passe d'entrée de l'avant-port de Port-Grimaud.



Deux solutions sont proposées afin de réduire l'ensablement de la zone. Elles sont présentées sur les images ci-dessous (Fig.3):



Figure 3 - Solutions identifiées pour réduire l'ensablement de la zone

28

1. Pour la première solution, le sable continue de se déposer à l'embouchure, mais un peu plus au large. La passe d'entrée de Port Grimaud s'ensable toujours suite à des coups de mer. De plus, un bouchon de sable se crée devant la digue, risquant d'ensabler la passe d'entrée du port des Marines de Cogolin. **Cette solution n'est donc pas recommandée.**

2. La solution 2 permet de réduire considérablement l'ensablement de la passe d'entrée et de pacifier le plan d'eau de l'avant-port. Cette solution permet de ne plus avoir l'entrée du port face à la sortie de la Giscle. Par contre, l'entrée du port se retrouve face au transit littoral. Cependant, le modèle numérique ne prend pas en compte le transit littoral. Afin de limiter le risque de générer un léger ensablement dans la passe d'entrée, la réalisation d'un téton de digue placé perpendiculaire à la digue Nord permet de bloquer ce transit et ainsi diminuer très largement l'ensablement de la passe d'entrée. Cependant, les mouvements de sable à l'embouchure de la Giscle restent les mêmes avec donc une tendance à l'ensablement de son embouchure.

En conclusion, aucune de ces deux solutions ne règle donc toutes les problématiques d'ensablement de la zone. Une solution serait de faire des pièges à sédiments et de les exploiter en amont de la Giscle afin de piéger les sédiments avant que ceux-ci arrivent sur le littoral.



3.3 Critères de choix de l'instrumentation à utiliser pour les investigations bathymétriques et morphologiques

Edité par AdSP Mar Tirreno Settentrionale - Livorno

Dans le cadre du projet Interreg SE.D.RI.PORT, des expériences bathymétriques ont été menées dans les ports de Livourne et Piombino.

La première expérimentation réalisée a été celle de Livourne dans la semaine du 23 avril 2018, alors que le 6 décembre 2018, a été apporté à Piombino le même système de détection bathymétrique que celui utilisé pour l'expérience de Livourne.

Le port de Piombino a représenté un banc d'essai extrêmement intéressant en ce qui concerne la collecte de données, car il a récemment subi une importante série d'interventions visant à modifier sa conformation et donc le fond marin est toujours en phase de stabilisation. En ce sens, il a été décidé d'étudier le bassin d'entrée du port, récemment modifié et toujours en évolution.

La première intervention réalisée sur les options d'acquisition a été d'insérer des *filtres pour prendre en compte l'état de la colonne d'eau*.

Au début de l'observation, en effet, un appareil a été utilisé capable de détecter deux paramètres fondamentaux qui affectent le trajet du signal ultrasonore vers le fond marin et le chemin du retour vers le bathymètre :

- la résistance de l'eau à la propagation du signal, liée aux propriétés physiques/ chimiques du bassin spécifique ;
- le profil de la vitesse du son dans l'eau, dépendant de la direction et de la vitesse des courants au moment des mesures et également responsable des variations de propagation du signal.

Ces paramètres ont été mesurés à l'aide d'un instrument auxiliaire fourni avec le système et ont été saisis dans le logiciel d'acquisition à l'aide des commandes appropriées.

Naturellement, ces paramètres ont également été pris en compte dans la première expérience de Livourne, mais en utilisant le mode « automatique » présent dans le logiciel qui dérive les informations à l'aide des capteurs intégrés, plutôt que d'utiliser des outils spéciaux, assurant ainsi une estimation moins précise.

Une autre fonction testée et exploitée au cours de l'enquête était la *planification des lignes de levé*, c'est-à-dire l'itinéraire que le navire aurait à parcourir pour assurer la couverture de la zone d'intérêt.

L'interface de planification est très simple, même si elle nécessite évidemment que les coordonnées des sommets du périmètre à analyser soient préalablement identifiées. À ce stade, on peut laisser le système préparer les lignes à suivre pour scanner la zone ou aussi préparer des lignes personnalisées.

Le système, à l'aide du GPS, réalisera sur quelle ligne on travaille à ce moment-là, et pourra à la fois avertir en cas de déviation de l'itinéraire et savoir quand la fin d'une ligne est atteinte, afin que les données partielles puissent être enregistrées dans un fichier de ligne créée ad hoc.

Ce mécanisme permet d'effectuer des inspections séparées dans le temps mais connectées les unes aux autres, afin de pouvoir gérer de manière simple même des relevés de grands bassins qui ne peuvent être entièrement couverts en une seule session.

Une fois la campagne d'acquisition de données terminée, celles-ci sont soumis à une *phase de post-traitement*, le même que celle déjà utilisé lors de l'expérience de Livourne, pour une normalisation par rapport aux informations acquises par les capteurs auxiliaires.



Ces expériences ont été menées de manière préparatoire pour vérifier la faisabilité des levés bathymétriques à l'aide d'outils qui peuvent être acquis, installés et utilisés par une organisation telle que une Autorité Portuaire ; cependant, pour utiliser les données obtenues lors de ces observations, il est nécessaire de disposer d'un système d'information qui facilite la sauvegarde, l'indexation et l'utilisation des données.

L'architecture du système proposé doit permettre la gestion des fichiers issus des différentes campagnes de collecte de données comme une collection globale, plutôt que comme des entités indépendantes les unes des autres. Ce paradigme est conçu pour simplifier grandement les opérations d'étude, d'observation et de prévision de l'état des fonds marins dans le temps.

Le système est essentiellement composé de trois composants, qui constituent la « plateforme » de gestion des données, et de deux acteurs qui sont censés être l'utilisateur qui utilise la plateforme pour télécharger les données qui viennent d'être collectées et, d'autre part, l'utilisateur qui les utilise plutôt pour obtenir les données disponibles et les utiliser à ses propres fins. Les trois composants constituant la plate-forme sont au contraire le système d'indexation, le système d'enregistrement des données et le logiciel côté utilisateur qui, via une interface utilisateur, exposera les fonctions de la plate-forme aux deux principaux acteurs.

La norme OneM2M s'est avérée idéale pour conserver les informations relatives aux données bathymétriques. Dans tous les cas, les garanties de sécurité et le paradigme « Store & Share » sur lequel repose le standard garantissent que les données sont conservées en toute sécurité et que les utilisateurs sont autorisés non seulement par un mécanisme générique « autoriser/ne pas autoriser », mais l'ensemble de données possède un set d'autorisations spécifique.

30

Pour l'historisation des données brutes, le système utilisera l'API REST pour l'historisation sur MongoDB .

Les données brutes issues des campagnes d'investigation des données bathymétriques seront stockées dans une base de données NoSQL MongoDB. MongoDB stocke les données et permet d'y accéder de différentes manières que celles généralement attendues dans des bases de données relationnelles. Les données ne sont pas structurées en termes d'enregistrements et de tableaux, mais de documents et de collections. Chaque document contient des informations relatives à une entité et se compose d'un objet JSON valide. Tous les documents représentant des entités du même type sont généralement regroupés dans une collection spécifique.

Afin de permettre aux utilisateurs de s'interfacer avec cette architecture, un logiciel java a été développé qui, grâce à une interface utilisateur extrêmement intuitive, permet de rechercher dans le système l'historique des observations réalisées et de les télécharger.

L'autre fonctionnalité proposée par le logiciel est d'accéder à la plateforme OneM2M/MongoDB pour saisir les données récupérées d'une campagne de manière transparente (sans donc nécessiter de compétences spécifiques).

Le logiciel se compose principalement de 4 composants:

1. Module HTTPTransfer : ce module traite du transfert de fichiers vers et depuis le serveur, c'est-à-dire lorsqu'il est demandé de sauvegarder des nouvelles mesures ou lorsqu'il est demandé de prendre des données à partir de mesures déjà enregistrées, via le protocole réseau http ;
2. Module FTPTransfer: ce module permet d'effectuer les mêmes opérations que le précédent, à la différence que le transfert se fait via le protocole FTP. La raison pour laquelle nous avons choisi de gérer le transfert via deux protocoles différents est liée à la différence de performances (en faveur de FTP) et de fiabilité (plutôt en faveur de



- HTTP). Le système décide de temps en temps quel est le meilleur protocole à utiliser en fonction des conditions du réseau ;
3. Module OneM2MHandler : ce module traite de l'organisation de l'index au sein de la plateforme OneM2M, et est appelé dans deux situations :
 - quand des nouvelles données sont enregistrées dans la base de données
 - quand une recherche est effectuée sur les données
 4. Module SedriportGUI: c'est le module qui crée et affiche l'interface utilisateur (GUI) avec laquelle on devra interagir pour profiter des fonctions de la plateforme. C'est le seul module qui est montré directement à l'utilisateur et se compose de deux sections distinctes : une pour rechercher et télécharger la bathymétrie et une pour télécharger de nouvelles observations.



3.4 Proposition d'instrumentation innovante pour les levés bathymétriques

Edité par le Département du VAR et la Commune de Grimaud

Dans le cadre du projet européen SE.D.RI.PORT le Département du Var avec la Commune de Grimaud ont fait développer un instrument innovant de mesure de la bathymétrie dans les ports, en vue d'être utilisé de manière simple par un agent portuaire.

Il s'agit de pouvoir évaluer régulièrement l'ensablement des ports pour effectuer une gestion fine des dragages. Ces travaux s'inscrivent dans le développement de la **valise instrumentée du projet SE.D.RI.PORT**, tant sur le matériel que sur les méthodes de traitement.

L'expérimentation initiale a été menée à Port Grimaud et a permis de comparer des acquisition avec

1. du matériel standard : acquisition géophysique standard avec la chaîne opérationnelle de SEMANTIC TS ;
2. le prototype SE.D.RI.PORT : acquisition géophysique avec la valise SE.D.RI.PORT.

Les données sont traitées par des algorithmes classiques et une comparaison des deux jeux de résultats est effectuée pour valider le principe de la chaîne d'acquisition et de traitement de la valise SE.D.RI.PORT.

Afin d'obtenir un positionnement précis pour les données de position du navire, SEMANTIC TS a installé sur le chantier une base GPS RTK de référence sur un point connu de la zone.

32

Pour l'inspection de la zone de Port Grimaud, les lignes de levés exécutées sont montrées dans la figure suivante et permettent une couverture exhaustive de la zone. La bathymétrie est complétée par une acquisition de données sur la nature des fonds et complétée par des prélèvements des sédiments.



Figure 4 - Plan de mission

Le système d'acquisition géophysique avec le système SE.D.RI.PORT se compose de trois valise et il est installé sur le tableau arrière du navire utilisé pour les opérations. L'application est compatible avec Android, iOS, Windows et Linux et le système permet la mesure de la bathymétrie et la classification des fonds.



Les échantillons de sédiments prélevés ont permis de le comparer avec la nature des fonds données par la valise SE.D.RI.PORT.



Valise accessoires

Valise mobile

Ensemble avec tablette

Figure 4 - Valises SE.D.RI.PORT

Dans la figure 5 sont représentés les résultats de l'acquisition géophysique effectuée avec la valise SE.D.RI.PORT .

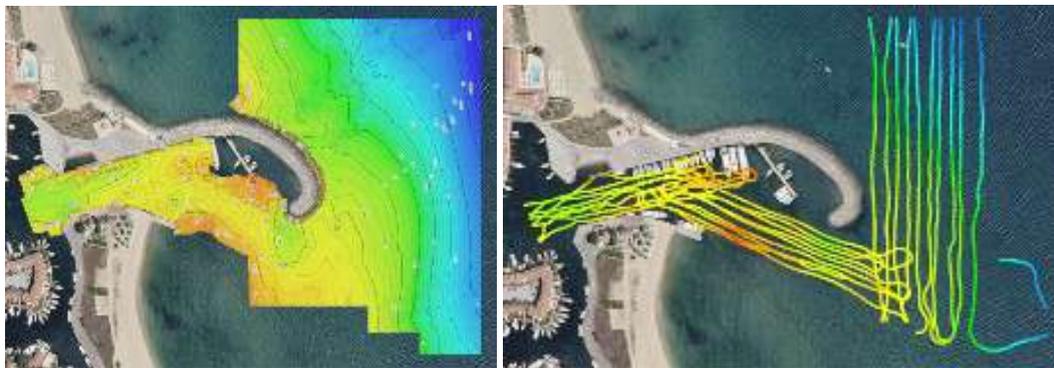


Figure 5 - Comparaison des profondeurs enregistrées avec le levé géophysique classique (à gauche) et le cas SE.D.RI.PORT (à droite)

On constate déjà visuellement la similitude des levés, les données bathymétriques produites avec la valise SEDRIPORT sont donc dans les spécifications attendues avec un écart moyen de - 3 cm lorsque la spécification en demande ± 10 cm.

La valise SE.D.RI.PORT a été mise en œuvre lors d'une démonstration à Olbia, le 18 juin 2019.

Les résultats obtenus (figure 6) nous indiquent que le système permet de lever la position du porteur avec une précision en Z de 2 cm à une distance de 2.3 km. Les zones où cette précision n'a pu être obtenue sont les zones de masquage de réception des satellites : trop près de gros navires ou de grands quais.



Profondeur



Rugosité du fond marin

Figure 6 - Résultats de l'expérimentation de la valise SE.D.RI.PORT à Olbia

Un troisième essai a été réalisé à Port Grimaud. En termes de résultats, entre les deux bathymétries de 2018 (Fig.7) et de 2019 (Fig.8) il est clairement visible qu'un engraissement a eu lieu dans le chenal de la passe à l'Ouest et au Sud du musoir de la digue.

En conclusion, la valise instrumentée SEDRIPORT donne des résultats avec une précision comparable à des instruments plus volumineux et plus difficiles à mettre en œuvre. Elle est compacte et utilisable par un agent portuaire qui pourra réaliser un suivi régulier de la bathymétrie de son port en vue d'évaluer la nécessité de dragages. De plus elle donne une information sur la nature des fonds.



Figure 7 - Profondeurs relevées lors de la campagne initiale

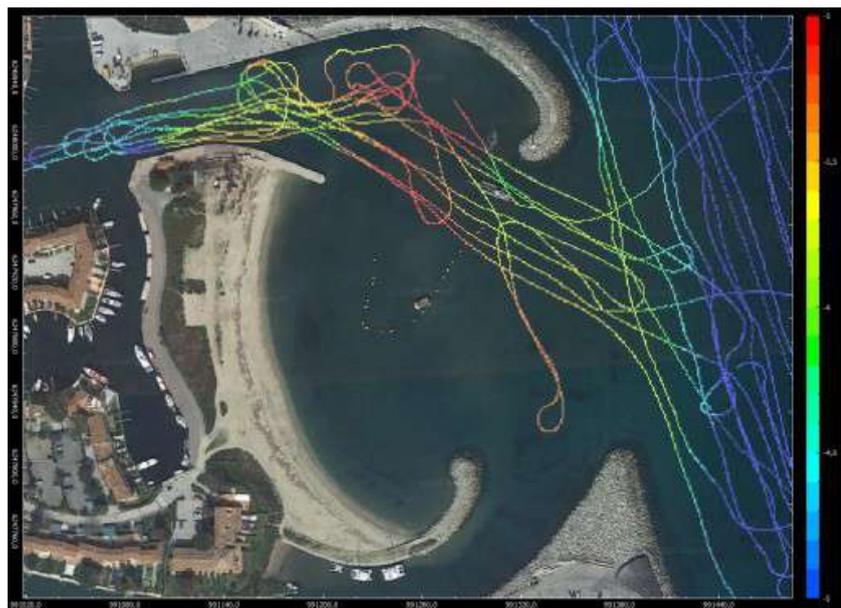


Figure 8 - Profondeurs relevées lors de la deuxième campagne



3.5 Utilisation de la modélisation numérique à support de la planification et gestion des activités de dragage dans les différentes phases de conception et de suivi

Edité par l'ARPAL et l'ISPRA

Les activités de manipulation des sédiments, souvent nécessaires à l'entretien et à la restauration des fonds portuaires, peuvent entraîner des effets environnementaux négatifs (à la fois sur le compartiment abiotique et biotique de l'écosystème marin) dans les zones portuaires et à proximité en raison d'une éventuelle remise en suspension et de dépôt subséquent de la fraction la plus fine des sédiments déplacés et des contaminants organiques et inorganiques qui sont souvent présents dans les sédiments portuaires. La modélisation peut fournir un support pour l'analyse des effets environnementaux potentiels générés par les sédiments remis en suspension (et redéposés) pendant les opérations de dragage. Ces études peuvent être fonctionnelles à la fois à la conception des opérations de dragage des fonds portuaires et à la planification des systèmes de suivi sur les altérations possibles de la qualité de l'écosystème marin lors de la réalisation des activités.

En pratique, l'ensemble du cycle de manipulation des sédiments est généralement divisé en trois phases opérationnelles principales: l'excavation (ou dragage), le transport et le déversement (ou emplacement final).

Qu'elle soit réalisée dans des environnements côtiers ou offshore, les effets environnementaux physico-chimiques et biologiques sur les écosystèmes marins peuvent être multiples. En particulier, les effets sur les compartiments abiotique (substrat et colonne d'eau) et biotique (benthique, poisson, etc.) peuvent être localisés :

- au sein des sites d'intervention ;
- en proximité de l'outil de dragage, principalement en raison de l'action directe de collecte et déversement des sédiments ;
- à des distances différentes des sites d'intervention, principalement en raison du transport et du dépôt des sédiments fins suite à la formation de turbidité (superficielle et profonde) au cours des activités.

En particulier, les effets physiques directs sur le compartiment abiotique sont principalement dus aux altérations des caractéristiques physico-chimiques de la colonne d'eau (par exemple, diminution temporaire de la pénétration de la lumière et de la concentration d'oxygène dissous, mobilisation et solubilisation de tout contaminant associé aux sédiments en suspension, etc.) et du fond (par exemple pour le dépôt de sédiments fins sur des substrats de différents types).

Sur le compartiment biotique, en revanche, les effets directs sont essentiellement liés aux éventuels phénomènes d'enterrement et d'étouffement (piégeage et traînée sur le fond, inefficacité de l'activité de filtration et bouchage de l'appareil branchial, recouvrement, abrasion des tissus, etc.).

Aux effets déjà mentionnés s'ajoutent ceux de type indirect, tels que la perturbation des zones de *nurserie*, ceux associés aux variations de la quantité de substance organique présente dans les fractions sédimentaires plus fines qui, en cas de mouvement de volumes importants de sédiments¹, peuvent provoquer des situations d'anoxie, et notamment en

¹L'importance des volumes à manipuler doit toujours être évaluée en fonction du contexte environnemental spécifique dans lequel l'intervention est réalisée (Lisi et al., 2017). Pour le cas spécifique des interventions d'alimentation de plages, par ailleurs, la distinction pour les types différents d'interventions est rapportée dans le décret ministériel 173/2016 en : petites interventions annuelles impliquant un apport global de sable inférieur à 5.000 m³, moyenne interventions annuelles plus élevées que 5.000 m³ et jusqu'à 40.000 m³ de déblais de dragage et enfin des interventions significatives avec des volumes globaux supérieurs à 40.000 m³ par an.



présence d'habitats sensibles tels que les *herbiers* de *Posidonia oceanica* ou la biocénose coralligène au voisinage des zones d'intervention, des altérations de la capacité photosynthétique (ex Manzanera et al., 1998). En outre, dans le cas de la manipulation de sédiments contaminés, d'autres effets indirects sur le compartiment biotique peuvent être causés par la mobilisation des contaminants présents (par exemple, bioaccumulation de contaminants dans les tissus des organismes, bioamplification et transfert dans la chaîne trophique, altération microbiologique de l'eau et des sédiments, etc.).

Les activités de manipulation des sédiments doivent être menées de manière à garantir la « non détérioration » de l'état initial constaté et la compatibilité avec les objectifs de qualité envisagés.

Bien que le choix des méthodes techniques et opérationnelles soit souvent lié à la finalité de l'intervention et à leur impact sur la durée ainsi qu'aux coûts d'exécution (EPA, 1993; OMOE, 1994; IADC, 1998; USACE, 2003; Anchor Environmental, 2003; Eisma, 2006, CEDA / IADC, 2018), les différentes phases de conception et de gestion des interventions doivent être précédées d'études spécialisées visant à identifier d'éventuelles criticités environnementales² (Lisi et al, 2017) et les modes opératoires à adopter pour minimiser les éventuels effets environnementaux (physiques, chimiques, biologiques et écotoxicologiques) qui pourraient résulter, à différentes échelles spatiales et temporelles, sur les opérations de manipulation.

Dans ce cas, des études internationales recommandent d'adopter, dans la phase de conception et de gestion des interventions, des modèles mathématiques capables de reproduire les processus de génération et de développement de la turbidité où l'apparition d'éventuelles criticités environnementales est reconnue. Ces modèles doivent permettre de reproduire la dynamique des sédiments remis en suspension à partir de l'analyse des interactions entre facteurs opérationnels (type de drague, vitesse et productivité du cycle dragage/déversement, volumes globaux à manipuler, etc.) et facteurs environnementaux (composition et granulométrie des sédiments à manipuler, caractéristiques hydrodynamiques et morpho-bathymétriques, etc.) qui conditionnent les processus de transport (dispersion, diffusion et dépôt) à différentes profondeurs et distances du site d'intervention.

En vertu du cadre réglementaire italien inhérente à la manipulation des sédiments dans les environnements marins côtiers et à leur gestion, l'Annexe A au DM 172/2016, bien que portant sur le dragage dans les zones SIN, fait explicite référence à l'utilisation de modèles mathématiques. En particulier:

dans la gestion environnementale du procédé de traitement des sédiments (art. 2), « *les choix de projet, effectués conformément aux dispositions de l'article 3 du présent décret, peuvent être adoptés [...] également sur la base de modèles mathématiques correctement mis en œuvre capables de prédire, pour les différents scénarios de hypothèse, le comportement des sédiments déplacés dans le milieu aquatique et les processus de dispersion et/ou de diffusion de toute contamination présente. Les résultats de ces modèles, lorsqu'ils sont appliqués, doivent faire partie intégrante du projet de dragage [...]*;

dans le cadre des activités de mise en place de déblais de dragage (art. 5), « *Tous les types d'intervention doivent être effectués de manière à exclure des impacts mesurables et*

²Toute altération des paramètres environnementaux d'intérêt pouvant survenir à la suite d'opérations de manipulation, à différentes échelles spatiales / temporelles, et susceptible de produire des effets (ou stress) significatifs (réversibles ou irréversibles) sur les récepteurs et les cibles sensibles identifiés. Aux fins du présent manuel, cette définition inclut également les contraintes environnementales (voir la définition associée) et les facteurs environnementaux (type de sédiments et de tout contaminant associé, volumes globaux à manipuler, etc.) auxquels des altérations significatives pourraient être liées. paramètres d'intérêt, qui conditionnent et limitent le choix des modes opératoires (Lisi et al, 2017).



significatifs [...], en prévenant et en limitant toute dispersion et rejet accidentels de matières, en sauvegardant également des objectifs sensibles ou des zones protégées de diverses manières et conformément à la législation régionale pertinente. En fonction de la complexité de l'intervention et du contexte environnemental dans lequel on opère, l'évaluation des effets doit concerner l'ensemble de la zone potentiellement affectée par les activités, en tenant compte de divers facteurs dont, [...] les résultats de l'application de modèles mathématiques, correctement mis en œuvre, capables de prédire, pour les différents scénarios hypothétiques, le comportement du sédiment déplacé et les processus de dispersion et/ou de diffusion de toute contamination présente ;

en ce qui concerne les mesures d'atténuation (article 6) et les activités de suivi (article 7), le décret cite les études des caractéristiques hydrodynamiques, les évaluations de la présence d'objectifs sensibles, les méthodes de dragage/transport et de mise en place, ainsi que l'évaluation des options de gestion, qui pourraient certainement bénéficier de l'application de modèles d'évaluation de l'évolution spatiale/temporelle des effets induits par les manipulations.

Une condition préalable de base pour l'évaluation des effets environnementaux est d'identifier les effets potentiels des activités de manipulation (Becker et al., 2015) :

- à court terme, lors de la mise en œuvre des interventions ;
- à moyen terme, en raison de la succession d'opérations répétées dans le temps ;
- à long terme, lié à la configuration finale du projet.

Le bon encadrement des études environnementales nécessite donc de prédire et de quantifier la variabilité des augmentations de la concentration de sédiments en suspension et des taux de sédimentation, dans le temps et dans l'espace, grâce à une approche de modélisation appropriée (CEDA / IADC, 2018; Lisi et al., 2019).

Récemment les Lignes Directrices ISPRA (Lisi et al., 2017), à cet égard, fournissent des indications opérationnelles pour l'utilisation de modèles mathématiques comme outil de support pour les différentes phases de conception des opérations de manipulation, pour l'évaluation des alternatives de projet (par exemple dans le choix des dragage, pour identifier les meilleures fenêtres temporelles, etc.), ainsi que pour la planification des activités de suivi, permettant l'optimisation des ressources nécessaires pour assurer un contrôle précis des effets potentiels sur l'environnement.

Profitant des connaissances scientifiques menées au fil des ans par l'ISPRA en collaboration avec diverses expertises (Lisi et al., 2012; 2016; Feola et al., 2015; 2016; Di Risio et al., 2017), des approches standardisées ont été définies pour la conception et la mise en œuvre d'études de modélisation (ex: définition du terme source, choix et durée des scénarios de modélisation, interactions avec le suivi) au moyen de l'AMI (Lisi et al 2017; 2019), en fonction des phases opérationnelles du cycle de manipulation (excavation/transport/déversement), des particularités des zones d'intervention (zones côtières, y compris les zones du littoral et de transition, bassins semi-fermés et zones offshore) et de la typologie des effets environnementaux attendus à court et à long terme.

Le document définit des techniques d'analyse et de synthèse des résultats pour faciliter l'identification des zones les plus affectées par les variations, dans l'espace et dans le temps, de la concentration en solides en suspension (SSC) et du dépôt de fond (DEP), reprenant les principes méthodologiques des techniques d'analyse proposées dans Feola et al. (2016).

Dans le projet Se.D.Ri.Port, la synergie entre ISPRA et ARPAL a été conçue pour tester la reproductibilité des critères énoncés dans les Lignes Directrices ISPRA pour la mise en



place correcte des études de modélisation dans différentes zones portuaires et contextes transfrontaliers et pour l'interaction avec le suivi environnemental dans les différentes phases de planification et de gestion des interventions. En particulier, des applications spécifiques ont été menées pour modéliser la dispersion de la fraction fine suite au dragage et à la relocalisation des sédiments en utilisant la technique de nivellement des fonds marins dans la zone portuaire.

Le document « *Manuel pour l'application des lignes directrices sur l'utilisation de la modélisation à support de la gestion des activités de dragage en zone portuaire* » rapporte les aspects à prendre en compte pour le paramétrage correct des applications de modélisation en zone portuaire, afin de les rendre facilement applicables dans les différents types de ports présents dans la zone transfrontalière.

Plus précisément, les critères permettant l'identification des conditions aux limites (bathymétriques, sédimentologiques, climatiques, hydrodynamiques) et la caractérisation des sources de rejet du dragage sont mis en évidence (par exemple les sédiments remis en suspension et/ou rejetés dans la colonne d'eau par rapport au volume initial et à la distribution granulométrique ; profondeur de rejet, intensité de rejet par cycle de dragage).

En particulier, il est détaillé :

- les facteurs environnementaux et opérationnels à considérer pour la mise en œuvre de l'approche de modélisation intégrée (AMI) ;
- les principales interactions avec le suivi environnemental, dont la planification doit permettre à la fois le contrôle des effets sur l'environnement et la vérification des résultats de la modélisation, conformément aux indications fournies dans l'arrêté ministériel 172/2016 « [...] *le plan de suivi doit contenir la description du contexte environnemental dans lequel les interventions ont lieu (caractéristiques morphologiques et hydrodynamiques, présence d'objectifs sensibles et/ou de zones protégées de diverses manières) [...]* » ;
- les méthodes d'analyse et de synthèse des résultats pour la définition des « impacts potentiels » en fonction de la connaissance de la zone d'intervention (ex. présence et type d'objectifs sensibles à protéger conformément aux orientations européennes et internationales, comme la *P. oceanica*, formations coralliennes, etc.) ;
- l'utilisation de fiches d'information projet (SIP), contenant les principales informations (environnementales et opérationnelles) à acquérir pour une meilleure application et vérification des études de modélisation et pour enrichir la disponibilité des données de terrain en vue de futurs projets.



CHAPITRE 4 - Évaluation du risque environnemental des opérations de remobilisation/resuspension de sédiments portuaires

4.1 Comparaison entre les techniques classiques de bio-suivi et les techniques innovantes d'échantillonnage passif

Edité par l'Université de Cagliari et l'ISPRA

Parmi les différentes approches pour évaluer le risque environnemental potentiel associé à la remobilisation/remise en suspension des sédiments portuaires, la plus courante est l'utilisation de bioindicateurs et en particulier des moules. La bioaccumulation de contaminants organiques et inorganiques (et dans ce cas les métaux, les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les polychlorobiphényles) par ces organismes fournit des informations biologiquement pertinentes. Cependant, l'interprétation des résultats révèle des difficultés liées aux nombreux facteurs biotiques (par exemple l'état de reproduction) et abiotiques (tels que les niveaux d'oxygène dissous ou la salinité) qui peuvent influencer la bioaccumulation.

Les principales exigences pour une application correcte de la méthodologie de bioaccumulation à travers la transplantation de moules regardent l'utilisation d'organismes provenant de zones relativement non contaminées, la définition d'un temps d'exposition adéquat des organismes dans le milieu aquatique, l'exposition des organismes par périodes où l'activité reproductive n'est pas élevée, afin d'atteindre des concentrations plus élevées de contaminants dans les tissus et de réduire l'effet des paramètres biologiques sur les concentrations mesurées (éviter la dilution des contaminants due à l'augmentation des lipides dans le tissu gonadique).

Contrairement aux moules, qui accumulent les contaminants de l'eau et des particules, les échantillonneurs passifs sont capables de pré-concentrer uniquement les substances présentes sous forme dissoute *in situ*. L'accumulation n'est pas affectée par les paramètres biotiques ou abiotiques et les extraits contiennent moins d'interférences dans la matrice que ceux du biote. De plus, les polluants normalement présents dans l'eau de mer sont facilement mesurés à des concentrations souvent inférieures aux limites de détection des méthodes d'analyse, la fréquence d'échantillonnage et les coûts des analyses sont aussi réduits. L'échantillonnage passif peut être appliqué dans presque tous les environnements aquatiques, même lorsque les conditions environnementales ne sont pas idéales (par exemple, des faibles niveaux d'oxygène), comme c'est souvent le cas dans les zones portuaires. A partir de l'analyse de la masse de polluant accumulé, il est possible de déduire la concentration moyenne sur la durée d'exposition.

En Italie, le recours à l'échantillonnage passif, associé à des mesures de bioaccumulation dans des organismes représentatifs des sédiments et/ou de la colonne d'eau, a été introduit au niveau réglementaire avec l'annexe technique du décret ministériel 173/2016 dans le suivi des activités de manipulation des sédiments, du dragage à diverses activités de gestion dans le milieu marin côtier, telles que les activités d'alimentation des plages.

Dans le projet SEDRI PORT, il a été décidé d'intégrer les informations obtenues à partir des moules transplantées dans les sites pilotes avec celles de l'échantillonnage passif, pour obtenir une évaluation intégrée du risque environnemental lié aux opérations de remobilisation/remise en suspension des sédiments dans les ports étudiés. A cet effet, dans deux des sites pilotes, La Spezia et Olbia, les échantillonneurs passifs et les moules ont été placés en parallèle dans 3 stations soumises à des pressions différentes. Les campagnes



d'échantillonnage ont été menées sur deux périodes de l'année, pour comparer les périodes de trafic maritime élevé et faible.

L'échantillonnage passif a donné une mesure de concentration moins liée aux interférences biotiques ou abiotiques qui pourrait être utilisée de manière opérationnelle pour définir les niveaux de contamination, comparer des sites avec différentes expositions et évaluer la tendance de la pollution dans le temps. D'autre part, le bio-suivi a fourni des informations plus complètes sur la présence de contaminants dans l'eau (en solution et dans les particules), bien que conditionnée par les stratégies d'échantillonnage. De plus, les extraits des échantillonneurs passifs ont été soumis à des tests de toxicité, donnant des informations sur les effets biologiques dus aux niveaux de polluants environnementaux qui apportent des réponses écotoxicologiques significatives, contribuant à une analyse approfondie de l'évaluation des risques.

L'échantillonnage passif et l'utilisation des moules ont produit, comme prévu, des résultats différents mais complémentaires, permettant d'obtenir une image complète de la distribution des contaminants dans chacune des zones d'étude et de leur biodisponibilité. Il a donc été montré que les informations obtenues avec les deux techniques peuvent être intégrées, permettant d'obtenir des informations différentes et complémentaires sur les effets de la remobilisation/remise en suspension des sédiments sur la qualité de l'eau dans les zones portuaires.



4.2 Tests d'élutriation des échantillons avec différents rapports eau-sédiments

Edité par ISPRA

Les sédiments marins sont le dépôt final d'un large éventail de polluants (hydrocarbures, pesticides, POP, contaminants émergents, etc.) rejetés dans les eaux marines par les activités anthropiques dans la région (Zhou et al., 2001; Breivik et al., 2002; Litskas et al., 2012). Les contaminants peuvent rester piégés dans cette matrice pendant de longues périodes (Ruiz-Fernández et al., 2012) et/ou être transférés le long de la chaîne alimentaire, affectant le biote marin et finalement la santé humaine (Borgå et al., 2001). Dans l'évaluation de la qualité environnementale des zones portuaires, l'intégration des analyses chimiques et écotoxicologiques effectuées sur les sédiments est une activité de routine (Chapman 2000). Les analyses chimiques permettent d'identifier et de quantifier le type et la source du contaminant, mais n'en détecte pas la biodisponibilité, les effets sur les organismes vivants et d'éventuels effets synergiques et/ou antagonistes de mélanges de polluants. Lors de l'évaluation de la toxicité d'un sédiment et des contaminants qui lui sont associés, les matrices suivantes sont généralement prises en compte : sédiment tel quel, eau interstitielle et élutriat. Le sédiment tel quel représente le scénario d'exposition le plus réel pour la réalisation d'analyses biologiques, mais son analyse peut nécessiter un investissement considérable en ressources humaines, en matériel et en temps. L'eau interstitielle constitue une voie d'exposition directe pour de nombreuses espèces, mais pour certains types de sédiments (principalement des échantillons sableux), il n'est pas possible d'en extraire une quantité suffisante pour la préparation des dosages. De plus, la méthodologie d'extraction peut conduire à des altérations physico-chimiques (pH et potentiel redox in primis) de la matrice elle-même, qui peuvent interférer avec la biodisponibilité des contaminants présents. Contrairement aux sédiments tels quels et à l'eau interstitielle, l'élutriat est la matrice la plus facilement utilisable et trouve une large application dans des nombreux tests biologiques qui utilisent des espèces appartenant à différents niveaux trophiques. Les tests avec élutriat simulent les effets de l'exposition des organismes bioindicateurs au sédiment remis en suspension et ont pour but de fournir des indications concernant le relâche de contaminants dans la colonne d'eau, en raison d'un déversement en mer de sédiments, stockage dans des environnements délimités (réservoirs de colmatage) et remise en suspension des sédiments dans des zones soumises au dragage.

Dans la préparation des élutriats, la méthode couramment utilisée se réfère au protocole ASTM E1391 (1990), qui prévoit le mélange d'une partie de sédiment et de quatre volumes d'eau. Cependant, sous la poussée d'une série de programmes de recherche concernant les activités de dragage et la gestion des matériaux de dragage, dans le respect des indications fournies par la Protection Research and Sanctuaries Act (Ocean Dumping Act) et la Clean Water Act de 1972 (CWA), l'U.S. Army Corp of Engineers (USACE) a développé des nombreux protocoles pour la préparation d'élutriats, qui impliquent l'utilisation de différents rapports entre l'eau et les sédiments, afin de mieux simuler les conditions environnementales qui se produisent au cours des différentes activités de manipulation des sédiments.

Au niveau international, il n'existe pas de méthode universellement reconnue et acceptée pour la préparation des élutriats. À cet égard, la littérature scientifique a produit de nombreux articles ces dernières années (Novelli *et al.*, 2006; Haring *et al.*, 2010; Vicinie *et al.*, 2011; Haring *et al.*, 2012) et même en Italie, le DM 173/2016, contenant les méthodes et les critères techniques pour l'autorisation à l'immersion en mer de matériaux d'excavation des



fonds marins, ne donne aucune indication sur la méthode à utiliser dans la préparation des éluutriats, indiquant un rapport générique eau/sédiments de 1:4 (p/v) pour leur préparation.

Les différentes méthodes de préparation des éluutriats peuvent conduire à des résultats et des options de gestion différents des sédiments analysés ; pour cette raison, dans le cadre du projet Interreg SEDRI PORT et dans le cadre de l'évaluation des effets écotoxicologiques liés à la remise en suspension des sédiments, les éluutriats des sédiments prélevés en mer à Cagliari, La Spezia et Toulon ont été testés, au moyen du test de développement embryonnaire avec l'oursin *P. lividus*, et ces éluutriats ont été préparés, soit conformément au protocole ASTM, soit sur la base des informations contenues dans le protocole *dredging elutriate test - test d'éluatriat de dragage*, développé par l'USACE (Di Giano et al., 1995).

En plus de l'enquête écotoxicologique, la concentration de métaux lourds, la teneur en substance organique et l'analyse granulométrique ont été déterminées pour chaque échantillon de sédiment. L'objectif de la présente étude était d'évaluer à la fois les différences entre les éluutriats préparés avec les méthodes ASTM et USACE, et les effets de 3 temps différents d'agitation du mélange eau/sédiment (1h, 3h et 24h) dans la préparation des éluutriats.

Les sédiments de Toulon et Cagliari sont caractérisés par une granulométrie fine fortement corrélée à la présence de fortes concentrations de Cu, Pb et Zn. La contamination des sédiments des ports d'Olbia et de La Spezia était extrêmement faible.

Pour les ports de Toulon et de La Spezia, les résultats obtenus avec le test d'embryotoxicité, même si comparables entre eux, ont mis en évidence des criticités différentes : la station de *Suffren* (Toulon), a révélé une plus grande toxicité dans les éluutriats préparés selon le protocole USACE, tandis que le Station *MF4* (La Spezia), a montré une plus grande criticité pour les éluutriats préparés avec le protocole ASTM. Pour le port d'Olbia, en général, les éluutriats préparés selon la méthode USACE ont montré une toxicité plus élevée que les tests menés sur les éluutriats ASTM, au contraire, pour le port de Cagliari la toxicité était plus élevée pour les tests effectués sur les éluutriats préparés avec le protocole ASTM.

Compte tenu de la toxicité différente trouvée dans les éluutriats préparés avec les protocoles ASTM ou USACE, une autre variable a été considérée : le temps d'agitation du mélange eau/sédiment. Sur la base de ce qui a déjà été rapporté par le groupe de travail du MIO de l'Université de Toulon sur la cinétique des contaminants métalliques en suspension, les éluutriats des sédiments collectés dans les ports étudiés ont été préparés en augmentant le temps d'agitation du mélange eau/sédiment à 3 et 24h.

En général, les résultats du test de développement embryonnaire avec *P. lividus* ont montré une augmentation de la toxicité corrélée à l'augmentation du temps de mélange entre l'eau et les sédiments dans la préparation des éluutriats, tant pour le protocole ASTM que USACE. Il est légitime de faire l'hypothèse à cet égard, d'une plus grande capacité d'extraction des composés hydrophiles, en phase aqueuse, quand le temps de contact entre l'eau et le sédiment augmente. La variation de la toxicité en fonction du temps peut être liée aux différentes cinétiques des métaux en traces qui migrent du sédiment vers la phase aqueuse (Dang et al., 2020), ou aux synergies qui peuvent être établies entre certains métaux lourds (comme le Hg, Pb et Cu), dont les effets se manifestent sur le développement larvaire de *P. lividus* comme rapporté par Fernandez et Beiras (2001).

L'écart des résultats obtenus avec les deux protocoles de préparation des éluutriats peut être lié aux différentes conditions physico-chimiques pouvant survenir lors de la préparation des éluutriats. L'aération du mélange eau/sédiment prévue par la méthode USACE, visant à créer un environnement oxydant dans le surnageant lors de la phase de sédimentation des



élutriats, peut influencer la mobilité des métaux, surtout s'ils sont présents dans le sédiment sous forme de sulfures qui deviennent très instables et donc solubles dans les environnements oxydants (Moore et al., 1990). De plus, sur la base des résultats obtenus dans cet étude, les sédiments avec un pourcentage de boue supérieur à 80%, ont montré une plus grande toxicité avec les élutriats préparés sur la base du protocole ASTM, tandis que, pour les échantillons à prédominance sableuse, le protocole qui a montré le plus de criticité était le protocole USACE.

Une classification écotoxicologique inexacte des sédiments due à des procédures méthodologiques inappropriées peut représenter un danger potentiel pour le milieu marin. Par conséquent, afin d'éviter des interprétations différentes des résultats obtenus dans l'évaluation de la qualité écotoxicologique des sédiments marins soumis à manipulation, il est nécessaire à l'avenir d'arriver à une uniformité et une standardisation des méthodes de préparation des matrices à analyser, non seulement pour rendre comparables les résultats obtenus à partir de zones différentes et à des moments différents, mais surtout pour une meilleure gestion des sédiments qui ne compromette pas la qualité de l'environnement marin, où se trouvent des écosystèmes d'une valeur naturaliste particulières et des activités productives, telles que des installations aquicoles, dont les dommages peuvent représenter un risque pour la santé humaine.

Bibliographie

ASTM, American Society for Testing and Material, 1990. Guide standard pour la collecte, le stockage, la caractérisation et la manipulation des sédiments pour les tests toxicologiques. E1390 - E1391.

Borgå , K., Gabrielsen , GW , Skaare , JU , 2001. Biomagnification des organochlorés le long d'une chaîne alimentaire de la mer de Barents. Environ. Pollut . 113, 187-198.

Breivik , K., Sweetman , A., Pacyna , JM, Jones, KC, 2002. Vers un inventaire historique mondial des émissions de certains congénères de PCB - une approche de bilan de masse: 2. Émissions. Sci . Total Environ. 290, 296-307.

Carr, RS, Chapman, DC, 1995. Comparaison des méthodes de conduite des essais de toxicité des eaux interstitielles des sédiments marins et estuariens - techniques d'extraction, de stockage et de manipulation. Arch. Environ. Contam . Toxicol . 28, 69-77.

Chapman, PM, 2000. La triade de la qualité des sédiments (SQT) - hier, aujourd'hui et demain. Int. J. Environ. Pollut . 13, 351-356.

Dang, DH, Layglon , N., Ferretto , N., Mullot , J.-U., Lenoble , V., Mounier, S., Garnier, C., 2020. Processus cinétiques de la remobilisation du cuivre et du plomb lors de la remise en suspension des sédiments de sédiments marins pollués. Sci. Total Environ. 698, 134120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134120>

Di Giano , FA, Miller, CT, Yoon, J., 1995. Développement d'un test d'élutriat de dragage (DRET). Rapport de contrat D-95-1, Station d'expérimentation des voies navigables du génie de l'armée américaine, Vicksburg, MS.

Fernández , N., Beiras , R., 2001. Toxicité combinée du mercure dissous avec le cuivre, le plomb et le cadmium sur l'embryogenèse et la croissance larvaire précoce de l' oursin *Paracentrotus lividus* . Ecotoxicology 10, 263-271.

Haring HJ, Smith, ME, Lazorchak , JM, Crocker, PA, Euresti , A., Blocksom , K., Wratschko , MC, Schaub , MC, 2012. Une comparaison interlaboratoire de la préparation des élutriats de sédiments et des méthodes d'essai de toxicité. Environ. Monit . Évaluer. 184, 7343-7351. DOI 10.1007 / s10661-011-2503-y



Haring, HJ, Smith, ME, Lazorchak, JM, Crocker, PA, Euresti, A., Wratschko, MC, Schaub, MC, 2010. Comparaison des méthodes d'essai de toxicité des sédiments en vrac et des éluutriats de sédiments. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 58, 676-683.

Huerta Díaz, MA, 2006. Géochimie des sédiments. Dans: Iron Sulphures. <http://www.ens.uabc.mx/iio/persogeo.htm> (cours en ligne): Chapitre 06.

Décret ministériel italien 173/2016, Règlement contenant les procédures techniques et les critères d'autorisation des matériaux d'excavation des fonds marins et de la mer (en italien), Journal de l'Office italien n° 208/2016.

Litskas, VD, Dosis, IG, Karamanlis, XN, Kamarianos, AP, 2012. Présence de polluants organiques prioritaires dans le bassin versant de la rivière Strymon, Grèce: eaux intérieures, de transition et côtières. Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 19, 3556-3567.

Monnin, L., Ciffroy, P., Garnier, JM, Ambrosi, JP, Radakovitch, O., 2018. Remobilisation des métaux traces lors de la remise en suspension en laboratoire des sédiments contaminés d'un réservoir de barrage. J. Soils Sediments 18, 2596-2613. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1931-5>.

Moore, TJ, Hartwig, RC, Loeppert, RH, 1990. Procédure à l'état d'équilibre pour déterminer la distribution granulométrique effective des carbonates du sol. Soil Sci. Soc. Am. J., 54, 55-59.

Novelli, AA, Losso, C., Libralato, G., Tagliapietra, D., Pantani, C., Ghirardini, AV, 2006. Le rapport d'éluutriation 1: 4 est-il fiable? Comparaison écotoxicologique de quatre sédiments différents: proportions d'eau. Ecotox. Environ. Safe. 65 (3), 306-313.

Ruiz-Fernández, AC, Sprovieri, M., Piazza, R., Frignani, M., Sanchez-Cabeza, J.-A., Feo, ML, Bellucci, LG, Vecchiato, M., Pérez-Bernal, LH, Páez-Osuna, F., 2012. Histoire dérivée du ²¹⁰Pb de l'accumulation de HAP et de PCB dans les sédiments d'une lagune intérieure tropicale (Las Matas, golfe du Mexique) près d'une raffinerie de pétrole majeure. Geochim. Cosmochim. Acta 82, 136-153.

Sahu, SK, Ajmal, PY, Pandit, GG, Puranik, VD, 2009. Distribution verticale des congénères polychlorobiphényles dans les carottes de sédiments de la région de Thane Creek à Mumbai, Inde. J. Hazard. Mater. 164, 1573-1579.

Vicinie, A., Palermo, M., Matko, L., 2011. Revue des différents tests d'éluutriats et raffinements de ces méthodologies. Actes de la conférence technique de la Western Dredging Association (WEDA XXXI) et du séminaire de dragage de la Texas A&M University (TAMU 41), Nashville, Tennessee, 5-8 juin 2011.

Zhou, JL, Maskaoui, K., Qiu, YW, Hong, HS, Wang, ZD, 2001. Congénères biphényles polychlorés et insecticides organochlorés dans la colonne d'eau et les sédiments de Daya Bay, Chine. Environ. Pollut. 113, 373-384.



4.3 Mobilité de contaminants métalliques et modifications dans les communautés microbiennes planctoniques résultant de la remise en suspension de sédiments dans des zones marines côtières fortement anthropisées

Edité par l' Université de Toulon

Les microorganismes marins : importance écologique et indicateurs de perturbation

Bien qu'invisibles à l'œil nu, les microorganismes représentent la "majorité invisible" du vivant. A titre d'exemple, en milieu marin où on dénombre entre 10^5 et 10^6 bactéries par millilitre d'eau, la biomasse de ces bactéries représenterait plus de 95% de la biomasse totale. Les microorganismes assurent un ensemble de fonctions qui leur sont propres. Ainsi, le fonctionnement naturel des écosystèmes repose en grande partie sur ce monde invisible. Par ailleurs, compte tenu de leur temps de génération très court (quelques minutes à quelques jours selon les espèces), les communautés microbiennes réagissent très rapidement à la moindre variation de leur environnement, qu'elle soit naturelle ou causée par l'homme. Enfin, les spécificités métaboliques de certaines espèces particulières ne leur permettent de se développer que dans des conditions très particulières, ce qui leur confère un potentiel d'indication de l'état écologique du milieu.

Ainsi, l'étude des dynamiques d'abondance et de diversité microbienne par des outils d'analyse à haute fréquence et/ou à haute résolution, couplée à une description fine des perturbations de l'environnement induites par les activités humaines, représente une voie de recherche pertinente. Elle permettra de mieux évaluer et, à terme, mieux gérer l'impact écologique du développement des ports sur l'environnement marin.

46

Observations réalisées lors d'une opération de dragage encadrée dans la rade de Toulon

Dans le cadre de l'aménagement de la base navale de Toulon, une opération de dragage a été réalisée. Compte-tenu d'un risque pyrotechnique élevé, l'opération a reposé sur une aspiration des sédiments assistée par des plongeurs. Les sédiments présentant un niveau de contamination élevé, ils ont été entreposés transitoirement en mer, à l'intérieur d'un géotextile semi-perméable retenant les particules sédimentaires, avant d'être éliminés à terre.

D'un point de vue chimique, les mesures réalisées ont démontré une contamination de l'eau par des particules riches en cuivre (Cu) et en plomb (Pb) limitée au site d'entrepôt des sédiments (Figure 9), à l'intérieur du géotextile. Ceci démontre bien l'efficacité combinée du mode d'aspiration des sédiments (peu de remise en suspension au site de dragage) et de l'utilisation d'un géotextile semi-perméable (retient bien les particules au site d'entrepôt des sédiments). En revanche, malgré ces précautions, une augmentation significative de la contamination en plomb dissous et labile a été détectée jusqu'à plusieurs kilomètres de la zone draguée pendant la période de dragage (Figure 9). Cette observation démontre un nouveau risque potentiel lié à ce type d'activité de gestion des sédiments portuaires contre lequel les mesures de protection de l'environnement couramment employées s'avèrent inefficaces.

Durant cette opération de dragage, deux réponses microbiennes ont été détectées. Une augmentation de l'abondance des procaryotes hétérotrophes (bactéries) planctoniques a été détectée pendant la période de dragage, jusqu'à plusieurs kilomètres de la zone draguée (Figure 9). Ceci suggère une contamination de la colonne d'eau par de la matière organique dissoute utilisée par les bactéries pour leur croissance, et sa diffusion à grande distance. De

plus, une structure singulière de la communauté phytoplanctonique a été observée dans la zone d'entrepôt des sédiments, mais pas en dehors (Figure 9). Cette différence démontre une certaine efficacité du géotextile semi-perméable pour limiter l'impact de la remise en suspension de sédiments sur le phytoplancton. Comparée aux variations spatiales de structure habituellement rencontrées dans la rade de Toulon, cette différence a également permis d'émettre l'hypothèse d'une influence à long terme de la remise en suspension des sédiments par les activités portuaires plus classiques dans toute la partie Nord de la petite rade de Toulon.

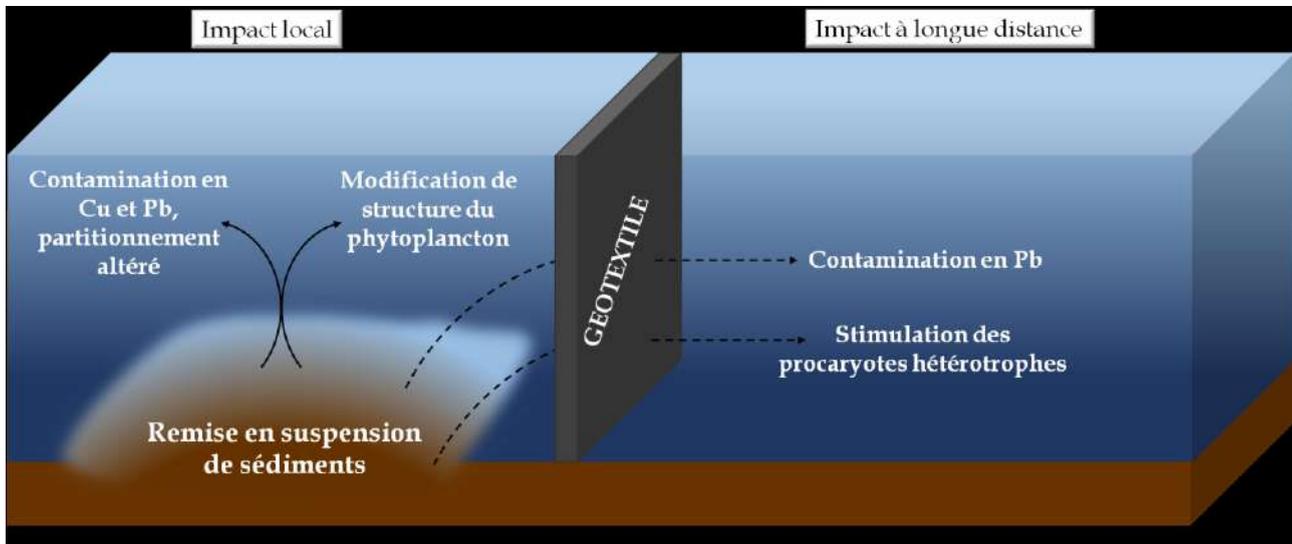


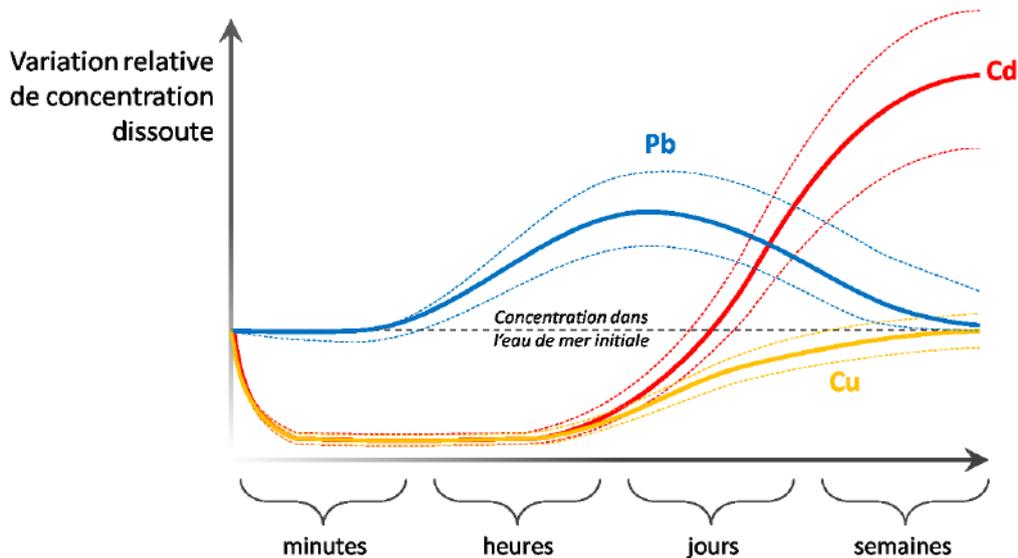
Figure 9 - Représentation schématique des impacts écologiques observés lors de l'opération de dragage suivie (modifié d'après Layglon et al., Marine Pollution Bulletin, 2020)

Etudes expérimentales de l'impact écologique de la remise en suspension de sédiments portuaires

Afin d'étudier plus précisément les facteurs de contrôle des transferts de contaminants métalliques et des dynamiques microbiennes lors de la remise en suspension de sédiments portuaires, des simulations expérimentales ont été réalisées en laboratoire. La principale contrainte consistait à travailler dans des conditions « traces » ne modifiant pas les concentrations en métaux, tout en conservant les sédiments dans des conditions anoxiques jusqu'au lancement de chaque expérience.

La répétition de ces expériences avec des échantillons des ports pilotes de La Spezia, d'Olbia et de Toulon a permis de dégager des transferts de contaminants métalliques généralisables et de mettre en évidence des variations encore mal comprises. Ainsi, quelque soit le port et les caractéristiques de l'eau et des sédiments (dont leur niveau de contamination par les métaux), le cadmium (Cd), Cu et Pb montrent un comportement principalement constitué de deux grandes phases successives. Cd et Cu sont tout d'abord transférés de l'eau vers les particules dès les premières minutes de remise en suspension. Ces deux éléments sont ensuite progressivement libérés des particules et retournent dans la phase dissoute au bout de quelques heures à quelques jours de mélange. Si Cu tend à retrouver une concentration dissoute proche ou légèrement supérieure à celle de l'eau de mer initiale après deux semaines, Cd lui atteint des concentrations dissoutes très largement supérieures à celle de l'eau de mer initiale (figure 10). Concernant Pb, son comportement est inversé par rapport aux deux métaux précédents : il subit tout d'abord un important

transfert des particules vers la phase dissoute pendant les premières heures de mélange, puis ensuite il est à nouveau transféré du dissout vers les particules après plusieurs jours. Le retour de la concentration dissoute en Pb au niveau initial de l'eau de mer est d'autant plus tardif que les sédiments de départ sont contaminés (figure 10). Au-delà des ces grandes tendances, des variations secondaires (d'amplitude, de vitesse de transfert) ont été observées en fonction des échantillons et restent à expliquer. Ces observations démontrent la nécessité de considérer simultanément les caractéristiques initiales de l'eau et des sédiments, le contexte local (éléments métalliques présents en grande concentration) et les paramètres de la remise en suspension (durée, ratio sédiment/eau) pour bien évaluer son risque chimique.



48

Figure 10 - Représentation schématique des transferts de contaminants métalliques intervenant lors de la remise en suspension des sédiments en fonction du temps. Les traits pleins représentent les modèles généraux de concentration dissoute pour Cd (rouge), Cu (jaune) et Pb (bleu). Les pointillés délimitent la variabilité observée entre sites.

Si l'analyse des réponses microbiennes selon le même protocole expérimental n'a pu être réalisée qu'à partir des échantillons d'Olbia, elle a mis en évidence des dynamiques a priori indépendantes de celles des 3 métaux étudiés. Ces dynamiques consistent en un recul des groupes anaérobies issus des sédiments durant les premiers jours au profit du développement important de groupes opportunistes aérobies, favorisés par l'abondance de matière organique apportée par les sédiments. Plusieurs groupes dominants se succèdent jusqu'au retour progressif vers une structure de communauté proche de celle de départ dans l'eau. L'importance et la durée du développement des microorganismes opportunistes augmente avec la quantité de sédiments remise en suspension, et retarde d'autant la résilience (Figure 11). Ce développement d'opportunistes inclut des potentiels pathogènes d'animaux marins, mettant en évidence le risque lié à de fortes remises en suspension de sédiments portuaires pour la production aquacole et la santé de l'écosystème. Enfin, des bactéries parasites d'eucaryotes prédateurs se développent également, d'autant plus que la quantité de sédiment augmente, démontrant le transfert de carbone remobilisé au réseau trophique planctonique et la contribution de la remise en suspension à l'eutrophisation en zone portuaire.

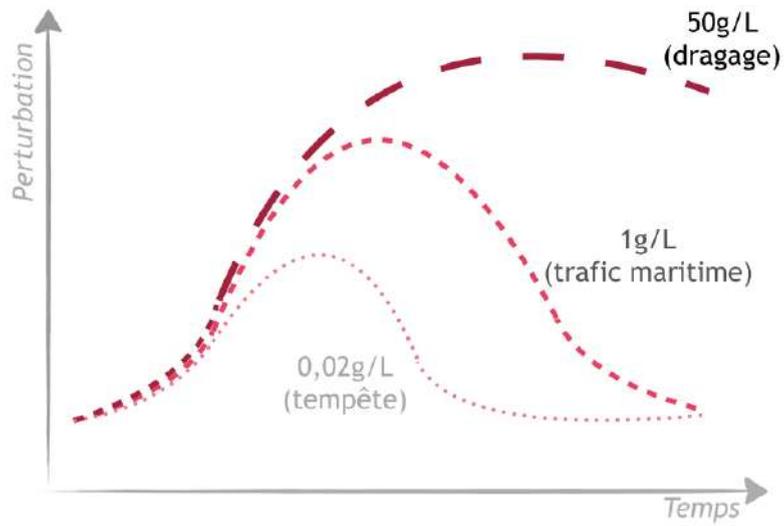


Figure 11 - Modèle de réponse des communautés microbiennes à la remise en suspension de sédiments en fonction de différents ratios, représentant différents scénarii.





II^{ème} PARTIE

Plan d'Action conjoint





PROJET

SE.D.RI.PORT

ACTIVITÉS

Préparation d'un Manuel à support de l'application des critères existant dans la littérature et qui peuvent être adoptés dans des différents contextes portuaires transfrontaliers pour le bon réglage d'**études de modélisation pour l'analyse des effets environnementaux potentiels générés par les sédiments remis en suspension** (et redéposés) lors d'opérations de dragage, comme recommandé par plusieurs études internationales.

RÉSUMÉ DES ACTIVITÉS

Le Manuel fournit des indications opérationnelles sur la manière de mettre en œuvre des modèles mathématiques et sur les interactions nécessaires avec les données de suivi environnemental, pour soutenir la gestion des opérations de dragage dans des bassins semi-fermés et des zones portuaires. Il détaille l'application de l'approche de modélisation intégrée (AMI) déjà proposé dans les lignes directrices ISPRA « Modélisation mathématique dans l'évaluation des aspects physiques liés à la manipulation de sédiments dans les zones marines-côtières » (Lisi et al., 2017). Le Manuel définit des techniques d'analyse et de synthèse des résultats pour faciliter l'identification des zones les plus affectées par les variations, dans l'espace et dans le temps, de la concentration de solides en suspension (SSC) et des dépôts au fond (DEP).

Il est proposé d'utiliser des Fiches d'information de projet (SIP), contenant les principales informations (environnementales et opérationnelles) à acquérir pour une meilleure application et vérification des études de modélisation et pour enrichir la disponibilité des données de terrain pour les projets futurs.

ASPECTS INNOVANTS

Le Manuel vise à fournir des indications opérationnelles pour l'utilisation de modèles mathématiques comme outil de support pour les différentes phases de conception des opérations de manipulation, l'évaluation des alternatives de projet (par exemple dans le choix de la technologie de dragage, dans l'identification des meilleures fenêtres temporelles, etc.), ainsi que pour la planification des activités de suivi, permettant l'optimisation des ressources nécessaires pour assurer un contrôle précis des effets potentiels sur l'environnement. Le document découle de la nécessité de combler le manque de méthodologies communes, aux niveaux national et international, pour l'analyse et la comparaison des effets environnementaux potentiels générés par les opérations de manipulation des sédiments dans différentes zones marines-côtières et la définition d'approches standards pour la conception et la mise en œuvre d'études de modélisation (ex: définition du



terme source, choix et durée des scénarii de modélisation, interactions avec le suivi).

L'un des aspects innovants est la proposition d'outils concrets visant à normaliser les mesures et le flux d'informations grâce à l'utilisation de protocoles/approches normalisés pour l'exécution des mesures et la compilation de bases de données. En particulier, afin d'homogénéiser et de maximiser l'utilité des données acquises, la compilation d'une fiche d'information (SIP) est proposée.

Le Manuel peut être fonctionnel pour les Autorités portuaires, les planificateurs et les organismes en charge du contrôle dans les différentes phases de planification des interventions qui nécessitent des opérations de dragage des fonds marins portuaires. Il définit les critères de mise en œuvre de modèles mathématiques, utilisant des approches standardisées, pour l'analyse préventive des éventuels effets environnementaux induits par le dragage portuaire dans différentes zones transfrontalières. En particulier, il est proposé comme manuel d'application les lignes directrices ISPRA « Modélisation mathématique dans l'évaluation des aspects physiques liés à la manipulation de sédiments dans les zones marines-côtières » (Lisi et al., 2017), facilitant son utilisation également dans un contexte transfrontalier. Plus précisément, la méthodologie proposée peut soutenir le choix de méthodes d'exploitation les plus appropriées (par exemple, le type et la vitesse du cycle de dragage et les fenêtres temporelles) et la planification de systèmes de suivi ciblés (en termes de positionnement, nombre et fréquence d'échantillonnage) en fonction des effets environnementaux attendus,

Pour cette raison, le Manuel, conformément aux objectifs de protection de l'environnement contenus dans les récentes bonnes pratiques nationales et internationales, peut être considéré comme un outil d'application pour aider à la fois à vérifier la compatibilité environnementale des interventions et à maximiser l'efficacité et optimiser les coûts des mesures de contrôle dans les différentes phases de conception (*ante operam*, en cours et *post operam*), comme l'exige l'annexe A du DM 172/2016, bien que ce soit référé aux opérations de dragage dans les zones SIN.



PROJET

SE.D.RI.PORT

ACTIVITÉS

Valise instrumentée SE.D.RI.PORT

L'outil innovant (valise instrumentée) pour suivre la bathymétrie d'un port de manière régulière (et surtout par du personnel portuaire non spécialiste).

Ainsi, des données sur la cartographie, l'évolution des fonds marins, peuvent être récoltées et permettent de surveiller l'écosystème marin, l'érosion côtière et la biodiversité.

**RÉSUMÉ DES
ACTIVITES**

Evolutions futures possibles:

- Intégration sur un drone de surface
- Calibration et apprentissage sur différentes zones avec natures de fond différentes
- Amélioration automatisation du traitement et de la plateforme
- Module complémentaire RTK radio SIM
- Mise en oeuvre extrêmement simple
- Le matériel (gps/sondeur) performant et miniaturisé, permet d'obtenir des mesures centimétriques.
- Les paramètres complexes liés à l'acquisition sont simplifiés afin de proposer un système plug-n-play tout en assurant des données fiables et précises.
- Déployable rapidement
- Encombrement faible
- Faible consommation énergétique
- Utilisable sur tout plan d'eau (mer, eaux douces littorales, rivières, etc.)
- L'application de navigation disponible sur Android/iOS est ludique et affiche la profondeur en temps réel sur une grille permettant de passer dans les endroits à mesurer.
- Il suffit de passer dans toutes les cases qui se colorent alors selon la profondeur pour effectuer le levé prévu.
- La carte se construit en temps réel et permet de s'assurer de la qualité du travail.
- Solution adaptable sur différents types d'embarcations grâce au système de fixation fourni
- Récupération et traitement des données à distance
- Indice de classe des fonds (signature acoustique différente selon type de fond).

ASPECTS INNOVANTS

**DOMAINES
D'APPLICATION**

Exemples d'utilisation:

- Surveillance de l'ensablement des ports



- Surveillance de l'évolution des herbiers de posidonies
- Sécurité à la navigation

Evolutions proposées et applications futures possibles:

- cartographie, l'évolution des fonds marins, des ressources en poisson, la température des océans



PROJET

SE.D.RI.PORT

ACTIVITÉS

Utilisation des **échantillonneurs passifs** (« passifs samplers », PS) dans le suivi des contaminants chimiques libérés dans la colonne d'eau au cours des activités de dragage ou pour la remise en suspension (par exemple suite à la navigation des navires) des sédiments.

RÉSUMÉ DES ACTIVITÉS

Les polluants peuvent être transportés par les courants même sur des distances considérables et présentent un risque pour les écosystèmes aquatiques et la santé publique en raison de leur transfert dans les chaînes alimentaires. Les PS accumulent les polluants in situ, permettant de mesurer de très faibles concentrations en laboratoire après leur extraction et réduisant considérablement les coûts d'échantillonnage. Leur utilisation améliore considérablement le processus d'évaluation des risques. En raison de leurs particularités, le PS pourrait être utilisé en alternative (ou en complément) aux mollusques bivalves pour évaluer le degré de contamination de la zone de dragage, avant et après les opérations de manipulation des sédiments.

ASPECTS INNOVANTS

À ce jour, l'évaluation de la contamination de l'eau dans les ports est liée à la collecte ponctuelle d'échantillons (« spot sampling ») et à l'utilisation de mollusques bivalves. Ces deux procédures ne sont pas sans criticités. Dans le premier cas, si les contaminants sont à l'état de traces, le « spot sampling » peut nécessiter l'échantillonnage de grands volumes d'eau, tandis que l'analyse ne fournit qu'un instantané des niveaux de contaminants au moment de la collecte. Quant aux mollusques, ils fournissent une valeur « intégrée » dans le temps et une mesure de la « biodisponibilité », mais les résultats sont fortement influencés par les facteurs biotiques et abiotiques qui déterminent l'accumulation des contaminants, alors que leur analyse chimique est complexe et sous réserve d'anomalies significatives.

Au contraire, les DGT permettent 1) d'atteindre de faibles limites de détection grâce à l'extraction in situ des analyses 2) les moules fournissent une valeur « intégrée » dans le temps et donnent une mesure de biodisponibilité, mais l'accumulation de contaminants n'est pas conditionnée par des facteurs biotiques. SEDRI PORT a montré que l'échantillonnage passif est capable de surmonter les limites des procédures de suivi actuelles. Le DGT (Diffusive Gradients in Thin Films) a été utilisé pour les métaux, le silicon rubber (SR pour les composés organiques non polaires (par exemple PCB ; IPA) et les POCIS (Polar Organic Chemical Integrative Sampler) pour les polaires (par ex. pesticides, résidus de médicaments),



ce qui a permis d'obtenir une résolution spatiale et temporelle élevée de la distribution des contaminants dans les différents ports étudiés (Toulon, La Spezia, Olbia et Cagliari) et l'identification des principales sources de contamination pour chaque port, y compris ceux liés à la remobilisation des contaminants contenus dans les sédiments. Il est donc proposé de promouvoir l'utilisation d'échantillonneurs passifs pour l'évaluation du risque environnemental associé aux activités portuaires et leur intégration dans le processus décisionnel pour une gestion portuaire durable.

Les échantillonneurs passifs sont déjà inclus dans les directives nationales en Italie (annexe technique au décret ministériel 173/2016) pour le suivi des activités d'excavation (c'est-à-dire l'évaluation de la remobilisation des contaminants dans la colonne d'eau).

Au niveau européen, plusieurs pays utilisent les PS pour répondre aux exigences de la législation nationale, en termes de gestion des sédiments et d'activités portuaires, ou travaillent dans ce sens. Par exemple, les directives norvégiennes reconnaissent le PS comme une technique valide pour mesurer les contaminants « libres » dans les sédiments qui pourraient potentiellement être rejetés dans la colonne d'eau. Au Royaume-Uni, les PS sont utilisés pour évaluer la remobilisation des contaminants suite à l'élimination des matériaux de dragage dans la mer. En Espagne, plusieurs groupes travaillent à l'inclusion d'échantillonneurs passifs pour la gestion des ports (par exemple les projets MODELTOX, PORTONOVO). Cependant, c'est la première fois que des PS sont utilisés à plusieurs reprises dans différents ports pour surveiller les activités affectant la distribution des contaminants dans la colonne d'eau. SEDRI PORT fournit donc de plus amples informations pour l'inclusion des échantillonneurs passifs dans les lignes directrices pour l'évaluation des risques associés à la remise en suspension des sédiments et au rejet conséquent de contaminants dans les eaux portuaires.

DOMAINES D'APPLICATION



PROJET

SE.D.RI.PORT

ACTIVITÉS

Améliorer l'évaluation de l'impact sur l'état écologique de l'eau portuaire par la remise en suspension de sédiments contaminés (**pollution métallique, diversité microbienne et processus associés**)

Si la gestion en mer des sédiments portuaires fait l'objet de certaines restrictions, ces dernières sont souvent basées sur quelques caractéristiques des sédiments, sans vision intégrative de l'impact écologique de la remise en suspension de sédiments. De même, si des mesures de protection sont proposées au regard des particules remises en suspension, trop peu d'élément de connaissance sur le risque associé au changement d'état de ces particules lors de la remise en suspension sont disponibles.

Le suivi d'une opération de dragage à long terme couplée à des expériences en laboratoire menées à partir d'eau et de sédiments issus de ports présentant des pressions anthropiques contrastées ont été proposés pour évaluer les impacts sur la contamination métallique de la colonne d'eau et la diversité bactérienne.

Différents scénarii de remise en suspension permettent de couvrir des événements naturels et anthropiques de remise en suspension. Le suivi cinétique à haute fréquence lors des expériences permet une meilleure compréhension des changements observés sur le terrain.

Ces travaux pourront servir de base pour ajuster les indicateurs de perturbation du milieu à suivre lors d'un dragage, ou encore faire évoluer la réglementation concernant l'étude a priori des caractéristiques du site.

Réaliser un suivi de terrain incluant les périodes anté- et post-dragage, pendant lequel l'impact est évalué à différentes échelles de distance, de quelques mètres à plusieurs kilomètres.

Il est important de réaliser ce suivi longtems en amont de la période de dragage afin de bien prendre la mesure de l'empreinte des activités portuaires usuelles sur le site.

Les principales innovations de ce suivi consistent en une comparaison des concentrations totales et dissoutes de cuivre et de plomb, ainsi que de concentrations "biodisponibles" en Pb par l'utilisation de DGT, afin d'évaluer les transferts, l'export et la toxicité potentielle de ces contaminants. En parallèle, assurer une évaluation de la distribution de groupes microbiens planctoniques pouvant servir d'indicateur de perturbation toxique et/ou trophique.

Concernant les approches expérimentales, en s'appuyant

RÉSUMÉ DES ACTIVITÉS

ASPECTS INNOVANTS



sur un protocole déjà éprouvé (Dang et al., 2015, 2020), l'aspect innovant consistait à évaluer la part généralisable du comportement des métaux lors d'une remise en suspension de sédiments portuaires afin de déterminer les impacts potentiels, généralisables, ceux dépendant de paramètres classiquement mesurés (comme la teneur totale en contaminants métalliques), ceux restant inexpliqués. Ce protocole permet d'étudier le comportement des métaux intervenant entre quelques minutes et plusieurs semaines de remise en suspension. Afin de couvrir un gradient de turbidité représentant des remises en suspension observées lors d'une tempête comme suite à un dragage, une innovation supplémentaire a consisté à remettre en suspension un gradient de quantités de sédiments dans un même volume d'eau.

La comparaison des résultats de ces différentes expériences, réalisées à partir de sédiments issus de différents ports plus ou moins contaminés, représente également une innovation permettant de mieux prendre la mesure de l'importance de la contamination chimique des sédiments dans le risque écologique. Il s'agit ici d'un aspect critique des règlementation régissant actuellement la gestion des sédiments en mer. Enfin, pour mieux évaluer l'impact écologique de la remise en suspension de sédiment, il a été proposé d'analyser la dynamique de diversité microbienne au cours du temps et en fonction de la quantité de sédiments remise en suspension. Via l'étude des préférences écologiques des groupes microbiens favorisés par la remise en suspension, le principal stress perçu par le biote peut être identifié.

Ces activités ont été menées lors du suivi d'une opération de dragage réalisée dans la rade de Toulon. Les approches expérimentales ont été réalisées avec des échantillons issus des ports de La Spezia, d'Olbia et de Toulon, permettant de travailler avec des sédiments remaniés, impactés par la mytiliculture ou contaminés fortement par des évènements historiques.

Les résultats marquants consistent en :

- des impacts variables selon les métaux considérés et selon le temps de remise en suspension des sédiments
- une contamination significative et à large échelle de la fraction dissoute de la colonne d'eau par du plomb biodisponible observée lors du dragage à Toulon
- une démonstration de cinétiques probablement généralisable pour les transferts de cuivre, plomb et cadmium à l'échelle de quelques heures à quelques jours de remise en suspension
- une amplification des transferts de ces éléments

DOMAINES D'APPLICATION



- relativement à la teneur initiale dans les sédiments, sans changement de cinétiques
- une très forte contamination en cadmium de la colonne d'eau, même lorsque les sédiments sont considérés comme sans risque pour les activités de dragage au regard de la législation française
 - une réponse trophique des communautés microbiennes en seulement quelques jours, qui pourrait contribuer fortement à l'eutrophisation du site
 - une résilience microbienne qui varie dans le temps en fonction de l'intensité de la remise en suspension et des caractéristiques initiales des sédiments

Bien que nécessitant encore des travaux pour mieux comprendre la régulation de ces mécanismes, ces résultats pourraient être pris en compte pour faire évoluer les pratiques portuaires locales et la législation encadrant les activités de dragage. Les caractéristiques sédimentaires autres que la contamination chimique représentent des pistes intéressantes à poursuivre pour améliorer à la fois la compréhension des processus et les pratiques de gestion.



PROJET	GRAMAS
ACTIVITÉS	Systèmes innovants pour l'étude et la suivi des fonds marins portuaires.
RÉSUMÉ DES ACTIVITÉS	<p>Le projet GRAMAS a réalisé la plateforme bathymétrique, qui permet de visualiser l'état des fonds marins portuaires en temps réel. Le projet a également permis l'achat de sondes bathymétriques.</p>
ASPECTS INNOVANTS	<p>Le projet a été le premier à développer une plateforme de suivi de la bathymétrie, qui permet une approche partagée à la mesure de la profondeur des fonds marins dans la zone de coopération IT-FR. Le système peut acquérir des données à partir de n'importe quel port. Dans le port de Livourne et Piombino cela a été couplé à la plateforme de suivi et contrôle MONICA. Le système GRAMAS est divisé en trois niveaux : infrastructurel, gestion des données et logiciel, en intégrant et développant les trois, ceci permet non seulement le suivi, mais aussi la modélisation et l'historisation des données bathymétriques des ports.</p>
DOMAINES D'APPLICATION	<p>Les mesures du fond marin ont été effectuées et ne sont en cours que dans les ports directement impliqués dans le projet. Les cartes des fonds marins ont donc été réalisées pour les ports de Savone, Livourne et Piombino. Cependant, le système peut être répliqué dans d'autres ports, à condition qu'ils soient équipés de sondes bathymétriques appropriées. Le projet fournit les spécifications techniques pour l'achat de capteurs et a créé une plateforme unique de partage de données bathymétriques pour tous les ports, qui peut donc également être utilisée pour d'autres ports. Un guide opérationnel du système est disponible et le plan d'action conjoint du projet est en cours d'élaboration.</p> <p>L'achat et l'installation de capteurs bathymétriques ont été finalisés en octobre 2020 pour le port de Savone et le seront en novembre 2020 pour les ports de Livourne et Piombino.</p>



PROJET

SEDITERRA

ACTIVITÉS

Systèmes innovants pour l'étude et la surveillance des fonds marins portuaires.

Les activités de dragage des ports visant à maintenir les profondeurs du fond marin pour assurer la sécurité de la navigation (par exemple, ensablement) et le développement des ports (par exemple, création de nouvelles structures portuaires, etc.), déterminent la nécessité d'une **gestion environnementale et économique durable, en dehors du circuit des déchets**. La valorisation des activités menées par le projet vise à mettre en évidence l'importance de la **réutilisation des sédiments dragués**, un sujet actuellement dépourvu de législation adéquate et spécifique. À ce jour, la seule alternative possible pour les matériaux de dragage, notamment pour une utilisation dans la chaîne d'approvisionnement terrestre, est l'application de la législation sur les déchets, mal adaptée à une matrice néanmoins naturelle, même si elle est éventuellement polluée. Dans le projet SEDITERRA, une action a été menée sur le **traitement expérimental des sédiments contaminés** dragués dans 4 contextes **portuaires** différents.

En particulier, une attention particulière a été portée à la récupération et à la relocalisation potentielle des sédiments dragués, qui sont considérés actuellement à gérer comme des matériaux à éliminer, les plaçant principalement dans des décharges ou des réservoirs de confinement des boues portuaires.

Les différentes fractions granulométriques constituant la matrice des sédiments marins peuvent être récupérées par des procédés de traitement et soumises à des actions/traitements physico-chimiques et biologiques, visant à **éliminer** les **contaminants** présents et à leur réutilisation finale.

Bien qu'il existe déjà de nombreuses techniques de traitement et d'assainissement des matrices solides et liquides contaminées, dans ce projet, certaines de ces techniques ont été **appliquées aux sédiments marins contaminés**.

Une **combinaison de traitements** a été appliquée aux sédiments contaminés, en commençant par une séparation mécanique qui a permis de diviser le sédiment marin en différentes fractions granulométriques qui le constituent, afin de récupérer le composant sableux dès le départ, c'est-à-dire la partie généralement la moins contaminé et immédiatement réutilisable.

Les fractions sableuses les plus fines séparées, à

RÉSUMÉ DES ACTIVITÉS

ASPECTS INNOVANTS



différents niveaux de contamination et donc susceptibles de traitements ultérieurs, ont été soumises à ces principales techniques de traitement:

- **soil washing (lavage des sols)** au moyen d'une installation pilote spécifique;
- **mélange** des fractions sableuses (récupérées du lavage des sols) avec différents pourcentages de béton traditionnel et/ou à usage marin, pour la production de dalles et de matériaux cimentaires destinés aux travaux de génie civil.
- Préparation de **lysimètres**, dans lesquels des conditions environnementales spécifiques ont été simulées et contrôlées, afin d'évaluer une bioremédiation naturelle des sédiments contaminés et le transfert de contaminants dans des matrices aqueuses;
- traitement de **micoremédiation** ;
- récupération de matrices organiques à partir de sédiments (fibres de *Posidonia oceanica*) afin de **valoriser leur énergie** (production d'électricité) au moyen de procédés de *pyrogazéification* ;

A l'issue de chaque série d'essais, une **évaluation qualitative minutieuse des matériaux obtenus a été effectuée.**

Les sédiments dragués et soumis à ces procédés de traitement peuvent donc être, au moins en partie, récupérés et réutilisés de manière vertueuse dans une perspective d'économie circulaire, tels que : matériaux pour fondations de routes, places et pistes cyclables, matériaux de construction, artefacts et mobilier urbain, remplissage de jetées, quais, remblais, zones à risque hydrogéologique, travaux d'ingénierie naturaliste, etc.

Les activités menées visaient donc à optimiser la gestion des sédiments dragués et traités et à définir une **réglementation dédiée** et en tout cas de précaution à la santé de tous les milieux concernés, de ceux impliqués **dans le traitement des sédiments** à ceux destinés à les accueillir comme solution finale («à terre» ou «en mer»).

Dans une optique de durabilité environnementale et économique, insérée dans une vision d'économie circulaire et de développement de l'économie bleue, d'autres expériences similaires à celles menées avec le projet Sediterra sont nécessaires et souhaitables, afin de **mettre en œuvre et de promouvoir la réutilisation de matériaux traités dans des travaux de réutilisation bénéfique, à la fois dans un contexte terrestre** (ne serait-ce que pour le dessalement) **et pour une nouvelle réutilisation dans des zones marines-côtières et en**

DOMAINES D'APPLICATION



milieu portuaire.

Il est souhaitable de continuer à approfondir les expériences menées, y compris le développement et l'application de techniques intégrées et innovantes supplémentaires, appliquées aux sédiments marins présentant des niveaux de contamination de départ plus élevés que ceux testés dans le cadre de ce projet.

Les activités menées visaient également à identifier d'éventuels **protocoles** de réutilisation des matériaux de dragage et à **identifier des solutions innovantes**, en apportant un soutien technico-scientifique et un transfert de connaissances et d'activités à échelle réelle, à des sujets publics et privés intéressés (Autorités du système portuaire, organismes de recherche, administrations locales, administrations portuaires, entités privées).

Il est donc souhaitable que les indications et les conclusions des expériences menées puissent contribuer dans un proche avenir à constituer la base d'une **régulation normative** au niveau local, national et communautaire.



Nous remercions pour la précieuse contribution tous les partenaires du projet, en particulier ce qui ont collaboré:

Région Autonome de la Sardaigne - Assessorato dei Trasporti

Alessandra Zoppeddu - Enrica Carrucciu

ADSP Mer de Sardaigne

Sergio Murgia - Alessandra Mannai - Francesco Pitzus.

Alessandro Meloni - Roberto Bertuccelli

Alessandro Cassitta - Alessandro Fazzi - Valentina Gallisai - Caterina Pattitoni.

Ville Métropolitaine de Cagliari

Giuseppina Carta - Salvatore Pistis

Université de Cagliari

Marco Schintu - Natalia Montero - Barbara Marras

Institut Supérieur de Protection et de Recherche de l'Environnement - ISPRA

David Pellegrini - Simona Macchia - Maria Elena Piccione - Davide Sartori - Cristian Mugnai - Iolanda Lisi - Alessandra Feola - Andrea Salmeri - Francesco Venti - Gianluca Chiaretti

Province de Livourne

Irene Nicotra - Riccardo Ciabatti

ADSP Mer Tyrrhénienne du Nord

Riccardo Di Meglio - Ivano Toni - Gregorio Barbieri

Francesco Bisconti (CNIT) - Paolo Pagano (CNIT)

Département du VAR

Jean - Louis Loeuillard

Commune de Grimaud

Benjamin Kulling

Université de Tolone

Cédric Garnier - Benjamin Misson - Véronique Lenoble - Stéphane Mounier (Redaction)

Nicolas Layglon - Emilie Paséro - Nicolas Gallois - Sébastien d'Onofrio - Isabelle Navarro (Contributions techniques essentielles)

Aurélié Portas, Alexis Canino, Nezli Doumandji, Louis Longo (Stagiaires)

Agence de Protection de l'Environnement de la Ligurie - ARPAL

Rosella Bertolotto - Stefania Magri

Office des Transports de la Corse

José Bassu - Jean-Antoine Mondoloni



REGIONE AUTONOMA
DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA
DELLA SARDEGNA



Università degli
studi di Cagliari



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Provincia di Livorno



LE DÉPARTEMENT

