



Projet SEDITERRA (N°CUP : I42F17000010006)



COMPOSANTE T3 - ÉVALUATION DES PILOTES ET RÉDACTION DES LIGNES DIRECTRICES POUR LE TRAITEMENT DURABLE DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE DE L'ARE MARITTIMO

COMPONENTE T3 - VALUTAZIONE DEI PILOTI E REDAZIONE DI LINEE GUIDA PER IL TRATTAMENTO SOSTENIBILE DEI SEDIMENTI DRAGATI NELL'AREA MARITTIMO

LIVRABLE T3.1.1 : SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION COMPARÉE DES PILOTES DE TRAITEMENTS ET VALORISATION

DELIVERABLE T3.1.1 : SINTESI DELLA VALUTAZIONE COMPARATIVA DEI PILOTI DI TRATTAMENTO E VALORIZZAZIONE

Avril/April 2020



<p>Nom du livrable :</p> <p>Nome del deliverable :</p>	<p>SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION COMPARÉE DES PILOTES DE TRAITEMENTS ET VALORISATION</p> <p>SINTESI DELLA VALUTAZIONE COMPARATIVA DEI PILOTI DI TRATTAMENTO E VALORIZZAZIONE</p>
<p>Compilé par / Compilato da :</p>	<p>Erwan Tessier (INSA de Lyon)</p>
<p>Validé par / Approvato da :</p>	<p>Jacques Méhu (INSA de Lyon)</p>

ANNÉE : 2020

ANNO : 2020

ORGANISATION DU DOCUMENT :

LIVRABLE EN FRANÇAIS – P5

LIVRABLE EN ITALIEN – P43

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION	5
II.	SÉDIMENTS ÉTUDIÉS DANS LE PROJET SEDITERRA	6
III.	SYNTHÈSE DES TRAITEMENTS (T2.3) MIS EN ŒUVRE DANS SEDITERRA	7
3.1	TRAITEMENT DES SÉDIMENTS PAR SÉPARATION GRANULOMÉTRIQUE ET « SOIL WASHING » - LIVRABLE T2.3.3 – ISPRA LIVOURNE	7
3.2	TRAITEMENT DES SÉDIMENTS PAR MYCOREMÉDIATION - LIVRABLE T2.3.4 – DISTAV GÈNES	13
3.3	TRAITEMENT DES SÉDIMENTS PAR DÉSHYDRATATION (DEWATERING) - LIVRABLE T2.3.5 - NAVICELLI / PROVINCE DE PISE	19
3.4	TRAITEMENT PAR CALCINATION DES FRACTIONS DE FIBRES DE POSIDONIE - LIVRABLE T2.3.6 – PROVADEMSE / INSA LYON	22
IV.	SYNTHÈSE DES PILOTES DE TRAITEMENT ET VALORISATION DES SÉDIMENTS - LIVRABLE T2.4.7 - PROVADEMSE / INSA LYON ; ISPRA LIVOURNE ; RAS / CAGLIARI	29
V.	INTRODUZIONE	43
VI.	SEDIMENTI STUDIATI NEL PROGETTO SEDITERRA	44
VII.	SINTESI DEI TRATTAMENTI (T2.3) EFFETTUATI IN SEDITERRA	45
7.1	TRATTAMENTO DI SEPARAZIONE GRANULOMETRICA E « SOIL WASHING » – DELIVERABLE T2.3.3 - ISPRA LIVORNO	45
7.2	TRATTAMENTO DEI SEDIMENTI CON MYCOREMEDIATION - DELIVERABLE T2.3.4 – DISTAV GENOVA	51
7.3	TRATTAMENTO DEI SEDIMENTI CON DISIDRATAZIONE (DEWATERING) - DELIVERABLE T2.3.5 – NAVICELLI / PROVINCIA DI PISA	57
7.4	TRATTAMENTO CON CALCINAZIONE DI FRAZIONI DI FIBRE DI POSIDONIA - DELIVERABLE T2.3.6 – PROVADEMSE / INSA LYON	59
VIII.	SINTESI DI TRATTAMENTI PILOTA E VALORIZZAZIONE – DELIVERABLE T2.4.7 - PROVADEMSE / INSA LYON ; ISPRA LIVORNO ; RAS / CAGLIARI	66

LIVRABLE T3.1.1. : SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION COMPARÉE DES PILOTES DE TRAITEMENTS ET VALORISATION

I. INTRODUCTION

Le livrable T3.1.1 du projet INTERREG MARITTIMO SEDITERRA compile les différents résultats expérimentaux obtenus par les partenaires en charge des activités pilotes T2.3 : « Pilotes de traitement de sédiments non immergeables » et T2.4 : « Pilotes de traitement et valorisation de sédiments non immergeables ».

L'activité T2.3 regroupe les différents essais de traitement effectués pour tenter d'améliorer les caractéristiques des sédiments de dragage étudiés et ainsi faciliter leur gestion.

L'activité T2.4 concerne spécifiquement les essais de valorisation en génie civil et technique routière menés sur les sédiments (bruts et traités) du projet.

Ce livrable qui présente les conclusions principales des traitements et essais de valorisation menés durant le projet, s'appuie sur les 5 livrables expérimentaux suivants :

1. **LIVRABLE T2.3.3 (ISPRA LIVOURNE) : TRAITEMENT DES SÉDIMENTS PAR SÉPARATION GRANULOMÉTRIQUE ET « SOIL WASHING »**
2. **LIVRABLE T2.3.4 (DISTAV GÊNES) : TRAITEMENT DES SÉDIMENTS PAR MYCOREMÉDIATION**
3. **LIVRABLE T2.3.5 (NAVICELLI – PROVINCE DE PISE) : TRAITEMENT DES SÉDIMENTS PAR DÉSHYDRATATION (DEWATERING)**
4. **LIVRABLE T2.3.6 (PROVADEMSE – INSA LYON) : TRAITEMENT PAR CALCINATION DES FRACTIONS DE FIBRES DE POSIDONIE AFIN D'EN DÉTERMINER LE POTENTIEL DE VALORISATION ÉNERGIE**
5. **LIVRABLE T2.4.7 (PROVADEMSE – INSA LYON ; ISPRA LIVOURNE ; RAS - CAGLIARI) : SYNTHÈSE DES PILOTES DE TRAITEMENT ET VALORISATION DES SÉDIMENTS**

II. SÉDIMENTS ÉTUDIÉS DANS LE PROJET SEDITERRA

Les sédiments utilisés pour les essais de traitement et de valorisation ont été prélevés sur les sites des partenaires, à savoir :

- **Port de Centuri (Corse - France)**
- **Vasque de stockage de Livourne (Toscane – Italie)**
- **Vasque de stockage de Cagliari (Sardaigne – Italie)**
- **Centre de traitement (CPEM) de la Seyne/sur mer (Var – France)**
- **Port de Gênes (Ligurie – Italie)**
- **Canal Navicelli à Pise (Toscane – Italie)**

Notons que ces différents lots de sédiments, issus d'opérations de dragage, n'ont pas tous été utilisés pour mener l'entièreté des expérimentations réalisées dans le projet SEDITERRA.

Les essais de traitement des sédiments par séparation granulométrique et « soil washing » ont été menés à ISPRA Livourne sur les sédiments de Livourne et de Cagliari, et à La Seyne/mer sur le sédiment de Centuri et sur celui prélevé sur le CPEM ENVISAN – désigné par la suite « sédiment Toulon » (cf. livrable T2.3.3).

Les essais de traitement par mycoremédiation ont été menés sur l'ensemble des sédiments disponibles : Gênes, Livourne, Cagliari, Centuri, Toulon et Canal Navicelli de Pise (cf. livrable T2.3.4).

Les essais de traitement par déshydratation ont été menés sur le seul sédiment du Canal Navicelli de Pise (cf. livrable T2.3.5).

Les essais de traitement par calcination (pyrogazéification) ont été menés sur les fibres végétales extraites du sédiment « Toulon » (cf. livrable T2.3.6).

Enfin, les essais pilotes de valorisation ont été menés à La Seyne/mer sur les sédiments de Centuri et Toulon, et à Livourne sur les sédiments prélevés à Cagliari et Livourne.

Les caractéristiques physico-chimiques, écotoxicologiques et géotechniques des différents sédiments étudiés sont détaillées dans le livrable T2.1.1 du projet intitulé « Rapport de synthèse des caractérisations croisées des sédiments ». Ce livrable T2.1.1 présente les résultats des caractérisations réalisées selon les méthodologies françaises et italiennes.

III. SYNTHÈSE DES TRAITEMENTS (T2.3) MIS EN ŒUVRE DANS SEDITERRA

3.1) TRAITEMENT DES SÉDIMENTS PAR SÉPARATION GRANULOMÉTRIQUE ET « SOIL WASHING » - LIVRABLE T2.3.3 – ISPRA LIVOURNE

Une zone expérimentale dédiée à l'application du traitement, aussi bien à l'échelle pilote qu'à l'échelle de laboratoire, a été mise en place dans les locaux de ISPRA à Livourne.

- PRINCIPES ET OBJECTIFS DU TRAITEMENT

L'objectif principal du traitement mis en oeuvre à ISPRA sur l'installation pilote est de séparer les différentes fractions granulométriques qui composent les sédiments marins étudiés afin d'en extraire la composante sableuse, partie du sédiment habituellement la moins contaminée et la plus susceptible d'être valorisée. Selon la littérature, les granulométries de coupe sur lesquelles la séparation est effectuée vont de 63 à 40 µm, dimensions qui répondent aux exigences technologiques et économiques et aux exigences relatives à la teneur en polluants que les sables peuvent contenir.

- MATÉRIELS ET MÉTHODES DE MISE EN ŒUVRE DU TRAITEMENT

La séparation du sable peut avoir lieu par le biais d'une classification par voie humide du sédiment, qui, dans un milieu fluide, se fonde sur la vitesse maximale de déplacement des grains dans un champ de forces gravitationnelles (classificateurs à sédimentation) et/ou dans un champ de forces centrifuges (hydrocyclones). La fraction fine du sédiment (plus polluée) est acheminée vers la phase de « dewatering », tandis que les eaux de traitement sont collectées dans des réceptacles prévus à cet effet et éliminées de manière adéquate par des entreprises spécialisées.

L'installation expérimentale comprend les modules suivants :

1. Module pour l'élimination des matériaux de faible densité, tels que les fibres végétales (ex. *Posidonia Oceanica*) et les fragments de plastique
2. Vibro-tamissage
3. Hydrocyclones
4. Cellules d'attrition
5. Classificateur à spirale

Chaque expérience de séparation mécanique des différentes fractions granulométriques a nécessité l'utilisation de 4 m³ de sédiments (correspondant à environ 6 tonnes).

L'eau de traitement, préalablement stockée dans des citernes de stockage d'un volume de 2,5m³, suit un circuit fermé, sans aucune évacuation pendant le processus de traitement et est éliminée en fin de traitement en tant qu'effluent liquide selon les normes en vigueur.

Les sédiments ont été soumis à un processus de séparation et classification mécanique par l'utilisation des équipements suivants :

a) **Trémie de chargement** de 1 m³ (2,40 x 1,30 m) pour l'alimentation des sédiments bruts. La trémie de chargement sert à alimenter le lit de criblage, permettant, ainsi, la régulation du débit du matériau entrant dans l'unité.

b) **Module 'by-pass'** pour l'élimination des fragments de posidonies/plastiques contenus dans le sédiment à traiter. Lorsque le sédiment en entrée présente un pourcentage élevé de matières végétales, telles que des fibres et/ou des fragments d'algues ou de plantes aquatiques et de fragments de plastique, il est soumis à un tamisage spécial, sur un tamis rotatif. Ce module est placé entre les équipements d'homogénéisation (caisson interchangeable sur roulettes) et le crible vibrant. Le module est composé d'un tambour rotatif perforé, doté de trous de différents diamètres, permettant le lavage et la séparation du sédiment des matériaux les plus grossiers.

c) **Crible vibrant** avec tôle de criblage de 2 mm de diamètre (dimensions : 2,40 x 1,60 m). Le crible vibrant sépare les matériaux grossiers des matériaux plus fins. Le tri a lieu par le passage des matériaux les plus fins sur une grille vibrante. La vibration de la grille est assurée par deux moteurs, fixés sur la structure du crible, auxquels sont reliées les masses excentriques en rotation. Le sédiment est pulvérisé par 4 jets d'eau à haute pression pour faciliter le tri par tailles et permettre son déplacement dans les sections suivantes de l'installation.

d) **Cellules d'attrition** (dimensions : 1,20 x 0,70 m - vol. 0,125 m³ chacune). Le mélange trouble (eau + sédiment) qui sort du classificateur à spirale est acheminé, dans des conditions de turbulence élevée, vers deux cellules d'attrition dotées d'un volume de 125 litres, qui entraînent la désagrégation des agglomérats boueux éventuellement présents.

e) **Unité d'hydrocyclonage** (dimensions : 3,50 x 1,3 m). Elle comprend 2 hydrocyclones séparés (dont un est by-passable). L'hydrocyclone opère le tri entre sable fin et fraction limoneuse-argileuse grâce à l'action de la force centrifuge. Il est composé d'un cylindre à fond conique doté d'une vis sans fin latérale pour l'alimentation du mélange sédiment/eau, d'une sortie pour les particules fines entraînées par le fluide et d'une autre sortie pour les matériaux dotés d'une granulométrie plus importante, située au sommet du cône.

f) **Classificateur à spirale** (dimensions : 2,90 x 1,00 m - diam. 300 mm). Le classificateur à spirale est employé comme unité de classification. Le principe de fonctionnement dépend de la vitesse différente de dépôt des particules solides en raison des différences de densité.

Les fractions en sortie de l'installation (solides et liquides) ont été échantillonnées en mélangeant plusieurs prélèvements collectés pendant le fonctionnement de l'installation en attribuant aux échantillons les acronymes suivants :

TQ = SÉDIMENT BRUT EN L'ÉTAT

SG = SABLE GROSSIER

SF = SABLE FIN

PE = PÉLITES

Au terme du processus de traitement, les fractions de sédiment récupérées, triées en fonction de leurs classes granulométriques respectives, ont été soumises à des analyses chimiques, physiques et biologiques, en vue de l'évaluation de la qualité des matériaux et de l'identification des solutions de gestion et de réutilisation.

* **Remarque** : Suite aux difficultés administratives rencontrées en Italie pour obtenir l'autorisation de transfert transfrontalier des sédiments, les essais de séparation granulométrique du sédiment corse de Centuri ont dû être menés sur la plateforme de Toulon (CPEM ENVISAN) par ISPRA Livourne. À cette fin, l'Installation pilote de Livourne a subi un certain nombre d'adaptations, notamment par la mise en place d'un tamis rotatif en tant qu'équipement complémentaire permettant la séparation des fibres de posidonie du reste du sédiment. L'élément « Tamis rotatif » de l'installation pilote ISPRA a donc été démonté, transporté et remonté à Toulon, en vue de l'exécution des opérations de tri prévues pour la séparation des fibres de posidonie du sédiment.

Malheureusement, les résultats obtenus n'ont pas été conformes aux attentes (faible efficacité de séparation), probablement à cause de la faible présence de fibres de posidonie dans le sédiment dragué à Centuri et à leur état de désagrégation. A ces constats, il faut également indiquer que le tamis rotatif n'a pas été connecté, dans son action, au reste de l'installation contrairement à ce qui était initialement prévu à ISPRA. Il conviendrait donc de réessayer le traitement avec un sédiment plus riche en fibres de posidonie et moins désagrégées ; et en menant le traitement dans son intégralité.

- PRINCIPALES CONCLUSIONS FORMULÉES PAR ISPRA LIVOURNE

Le soil washing (lavage du sol) exploite la tendance des polluants à se concentrer dans la fraction fine, en raison de sa plus grande surface spécifique, donc plus soumise aux phénomènes d'adsorption concernant à la fois la substance organique que les contaminants eux-mêmes.

Par rapport à la matrice sableuse, principalement composée de silice et de carbonates, la fraction limoneuse-argileuse est essentiellement caractérisée par des minéraux argileux, des oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium et des matières organiques, toutes des espèces chimiques très actives dans les processus d'échange ionique et de complexation.

Le traitement de soil washing a permis d'obtenir un sable de bonne qualité environnementale, adapté aux opérations de réutilisation indiquées par les autres partenaires du projet SEDITERRA, et une fraction fine principale destinatrice pour la migration des polluants.

La réalisation de tests de rejet menés sur les eaux de traitement et sur les éluats des sédiments a été jugée utile pour analyser la mobilité des polluants dans des matrices complexes comme les sédiments marins afin de comprendre les modalités de variation de la libération de ces éléments dans l'environnement marin côtier et lors de la réutilisation à terre.

En plus de l'évaluation qualitative des sédiments, ces tests ont également été utiles pour évaluer la capacité de transfert des contaminants des sédiments vers l'eau de traitement, en simulant les impacts potentiels que différentes options de gestion et de réutilisation (par exemple, matériaux de route, engraissement des plages, matériaux de construction, etc.) pourraient avoir sur l'environnement.

Outre la concentration de départ des éléments chimiques recherchés dans les sédiments et la grande variabilité environnementale du site de prélèvement des sédiments traités, un certain nombre de facteurs physico-chimiques (tels que le pH, le potentiel Redox, la solubilité, la température, les concentrations d'Oxygène et de Carbone Organique), en interagissant entre eux, peuvent avoir un impact sur les processus de mobilité des polluants, et complexifient l'évaluation qualitative des différents paramètres examinés et donc du processus de traitement utilisé. Ces facteurs d'interférence devraient être étudiés plus en détail lors d'expériences ultérieures.

Le rapport final sur les activités de surveillance confiées à ARPAT (*N.B. Agence Régionale de Protection de l'Environnement*) contient les conclusions formulées par ARPAT qui – en résumé – indiquent dans les eaux de process « une tendance générale à la migration des polluants surveillés, avec une augmentation de leur concentration » et dans les fractions solides récupérées « une augmentation générale de la concentration des polluants surveillés dans les fractions fines par rapport aux fractions sableuses ».

La comparaison avec les valeurs chimiques de référence italiens (L1 et L2) pour les zones limitrophes à faible contamination présentant une fraction fine comparable a fait ressortir une situation de départ (TQ – Tel Quel) relativement peu compromise.

L'application du procédé de séparation mécanique montre une concentration de métaux dans les fractions les plus fines (PE) en faveur des sables grossiers (SG), qui ne sont pratiquement plus contaminés et donc réutilisables : les valeurs trouvées sont généralement inférieures à L1, à l'exception du cadmium pour lequel, cependant, il n'y a pas d'association évidente avec la composition granulométrique.

Afin de réutiliser les matériaux récupérés, il convient d'examiner les processus de transfert et de solubilisation de certains éléments chimiques, car les essais réalisés ont fait ressortir une augmentation de la concentration de certains métaux dans les eaux de traitement par rapport aux eaux en entrée, preuve du passage de certains métaux du sédiment à l'eau.

L'évaluation des concentrations en composés organostanniques fait ressortir des valeurs différentes entre Livourne et Cagliari. En particulier pour Livourne : en partant de niveaux sur brut supérieurs à L1, on parvient à des valeurs supérieures à L2 dans les fines, mais dans tous les cas, des fractions sableuses SG et SF réutilisables, grâce à l'abattement de cette pollution.

En ce qui concerne la pollution aux hydrocarbures, l'attention est attirée uniquement sur les concentrations d'hydrocarbures lourds (C>12) qui sont supérieures à la valeur "L2" dans presque toutes les fractions mais avec des valeurs négligeables dans les sables grossiers. Il n'y a aucune preuve de transfert des sédiments vers l'eau de traitement.

Pour les HAP de Cagliari, bien que l'analyse des eaux de traitement ne fasse ressortir aucune augmentation spécifique de la concentration des congénères présentant les concentrations les plus élevées, s'agissant toutefois, de substances dangereuses prioritaires, il convient de consacrer une attention particulière à la gestion des fractions sableuses, malgré l'excellente efficacité d'abattement de l'installation pilote pour d'autres polluants.

Les hydrocarbures lourds ne suscitent aucune inquiétude, même en tenant compte du fait que, s'agissant d'une pollution non-spécifique, il conviendrait de procéder à des analyses supplémentaires afin de déterminer quels sont les composés réellement responsables de la teneur élevée.

Les recherches relatives aux teneurs en PCB font ressortir une concentration de ces substances dans les fractions fines et une libération négligeable entre le sédiment brut (TQ) et l'eau.

L'usine pilote a rempli avec efficacité et précision sa fonction de séparation mécanique des sédiments selon les différentes classes granulométriques qui les composent. Les résultats obtenus indiquent que les sédiments portuaires traités par l'installation pilote peuvent fournir des matériaux appropriés de bonne qualité physico-chimique : la réutilisation des fractions de sable SG récupérées est donc possible.

- SYNTHÈSE GÉNÉRALE DE ISPRA LIVOURNE

L'installation pilote pour le traitement expérimental des sédiments a rempli de manière efficace et précise sa fonction de séparation mécanique des sédiments entre les différentes classes granulométriques dont ils sont composés.

Les résultats obtenus indiquent que les sédiments portuaires traités par l'installation pilote fournissent des matériaux appropriés de bonne qualité physico-chimique : il est en effet possible de réutiliser les fractions de sable grossier [SG] récupérées (par ex. pour : matériaux routiers, remblayage de plages, matériaux de construction, etc.).

Le processus de soil washing a permis d'obtenir des sables présentant des bonnes qualités environnementales, adaptés pour des activités de réutilisation, ainsi qu'une fraction fine, destination principale de la migration des polluants.

À partir d'un matériau brut (TQ : Tel Quel) de bonne qualité environnementale, même la fraction sableuse fine (SF) pourrait être également valorisée ; la fraction fine résiduelle (PE : Pélites) représente un volume plus réduit de sédiments à éliminer par rapport au volume initial de sédiment brut, ce qui apporte des avantages tant du point de vue économique que du point de vue environnemental.

Par ailleurs, l'analyse chimique des eaux en contact avec les sédiments durant le traitement a permis d'évaluer le transfert des contaminants présents dans les sédiments vers les eaux de process et a constitué ainsi une analyse grossière des impacts potentiels que les différentes options de gestion et de réutilisation pourraient avoir sur l'environnement.

Cela a révélé que, tant la concentration initiale des éléments chimiques dans les sédiments, que la variabilité environnementale des sites de collecte des sédiments traités, ainsi que les différents paramètres physico-chimiques - tels que le pH, le potentiel Redox, la solubilité, la température, les concentrations d'Oxygène et de Carbone organique - en interagissant entre-eux, influencent les processus de mobilité des polluants et complexifient l'évaluation qualitative des différents paramètres étudiés et du processus de traitement utilisé. L'étude de ces facteurs combinés pourrait être approfondie lors d'expériences ultérieures, notamment en utilisant des sédiments marins présentant des niveaux de contamination plus élevés que ceux testés à l'occasion de ce projet.

D'autres expériences similaires à celles menées dans le cadre du projet SEDITERRA sont nécessaires et souhaitables, afin de mettre en oeuvre et de promouvoir la récupération et l'utilisation des matériaux traités dans le cadre de travaux de réemplois bénéfiques.

3.2) TRAITEMENT DES SÉDIMENTS PAR MYCOREMÉDIATION - LIVRABLE T2.3.4 – DISTAV GÈNES

- PRINCIPES ET OBJECTIFS DU TRAITEMENT

Afin d'améliorer les caractéristiques chimiques des sédiments dragués dans les ports en vue de leur réutilisation future, le laboratoire DISTAV (Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita) de l'Université de Gênes a proposé l'activité pilote de traitement des sédiments par mycoremédiation. La mycoremédiation (via l'utilisation de micromycètes) fait partie des traitements connus sous le nom de bioremédiation, une alternative "verte" aux méthodes traditionnelles de traitement des polluants dans les sédiments et les eaux.

Les stratégies de bioremédiation consistent à stimuler et à exploiter les microorganismes qui sont des composants des cycles biogéochimiques naturels. Ces microorganismes sont capables de dégrader les polluants organiques et de bio-accumuler les polluants inorganiques (métaux) par des processus biologiques qui se produisent naturellement (sécrétion d'enzymes et d'acides organiques par les microorganismes qui peuvent interagir avec les polluants).

- MATÉRIELS ET MÉTHODES DU TRAITEMENT

L'activité de mycoremédiation du DISTAV Gênes a été réalisée sur des sédiments prélevés dans 6 zones différentes : le port de Gênes, le réservoir de remplissage du port de Livourne, le canal Navicelli de Pise, le réservoir de remplissage du port de Cagliari, le port de Centuri et le port de Toulon. Pour chaque site, 30 kg de sédiments ont été échantillonnés puis soumis au processus de mycoremédiation.

Dans un premier temps, l'activité a consisté à caractériser la flore fongique autochtone présente dans chaque sédiment. Sur la base des informations contenues dans la bibliographie, les espèces de microchampignons, identifiées dans les sédiments de chaque zone, qui sont les plus efficaces pour la dégradation des composés organiques et l'accumulation des métaux, ont été sélectionnées. Enfin, les espèces indigènes sélectionnées sur chaque site ont été exploitées pour évaluer la capacité de ces microorganismes à réduire ou éliminer les polluants présents dans les sédiments dont ils sont extraits.

La caractérisation de la flore fongique a été réalisée afin d'utiliser les microchampignons naturellement présents dans chaque zone sans introduire de nouvelles espèces, en vue de l'application possible du protocole de mycoremédiation directement dans l'environnement.

Plus particulièrement, les sédiments prélevés dans les réservoirs de remplissage (cas de Livourne et de Cagliari) ont été exposés aux conditions climatiques pendant de longues années, les sédiments prélevés dans le canal Navicelli de Pise sont saumâtres et les sédiments du port de Centuri sont caractérisés par la présence de fibres de posidonies mortes.

Chaque échantillon a d'abord été homogénéisé, puis les fractions de sédiments suivantes ont été prélevées :

- 5 g pour la caractérisation mycologique du sédiment et pour la sélection du microchampignon pour l'activité de mycoremédiation
- 215 g pour la caractérisation physique du sédiment
- 1,5 kg pour la caractérisation chimique du sédiment
- 25 kg pour effectuer la mycoremédiation (15 kg pour le port de Centuri)

Les souches fongiques ont été isolées du sédiment par la méthode de dilution sur plaque. L'échantillon a été dilué dans de l'eau stérile dans un rapport de 1:10 (p/v). Après agitation mécanique pendant 10-20 min, la solution obtenue a été diluée par un facteur de 10. 1 ml de suspension a été inoculé dans chaque plaque de Pétri. Enfin, les plaques ont été incubées pendant une semaine dans l'obscurité à une température de 24 °C. Pour favoriser la croissance fongique, des milieux de culture spécifiques ont été utilisés, additionnés d'antibiotiques afin de limiter la croissance des souches bactériennes. Les colonies de champignons ont été comptées chaque semaine et les morphotypes ont été isolés dans des cultures pures, en éprouvette. À ce stade, l'identification morphologique et moléculaire des souches isolées a été effectuée en utilisant une approche polybasique.

Une fois que toutes les espèces trouvées ont été correctement identifiées, celles qui conviennent le mieux aux essais de mycoremédiation tant pour les contaminants organiques qu'inorganiques, pour chaque sédiment, ont été sélectionnées en fonction de la fréquence d'isolement et des connaissances bibliographiques. Une fois les pools d'espèces à utiliser identifiés, il a été procédé à des inoculations liquides de sols de culture appauvris (à teneur réduite en éléments nutritifs) afin de favoriser la croissance fongique juste assez pour que les champignons eux-mêmes dans les sédiments soient activés et stimulés pour dégrader et/ou accumuler d'autres substances. Un inoculum de 0,5L a été préparé pour chaque bac. Une fois préparé et inoculé avec les champignons sélectionnés, il a été mis en agitation pendant 4 jours avant d'être ajouté au sédiment lui-même.

La fraction de sédiments prise en compte pour la mycoremédiation, qui est de 25 kg (15 kg pour le port de Centuri), a été à son tour répartie en 5 fractions de 5 kg chacune. Ces fractions ont été placées dans 5 bacs en plastique de 50 x 34 x 10 cm (3 fractions de 5 kg chacune placées dans 3 bacs en plastique pour le port de Centuri).

Les sédiments contenus dans les bacs 1 et 2 ont été traités avec des microchampignons pour tester l'efficacité de l'action de ces organismes sur les métaux contenus dans le sédiment. L'activité prévoyait l'utilisation d'un papier absorbant humidifié pour adhérer à la surface des sédiments car cela permet de séparer mécaniquement, et non chimiquement, les microchampignons du sédiment. Les microchampignons sélectionnés parmi ceux qui présentaient les meilleures caractéristiques pour l'accumulation des métaux ont été inoculés sur le papier absorbant. Les sédiments présents dans les bacs 1 et 2 ont également été analysés au regard des polluants organiques afin d'avoir une image plus complète de la situation, malgré le fait que les microchampignons ont été sélectionnés parmi ceux qui sont les plus adaptés à l'accumulation des métaux.

Les sédiments des bacs 3 et 4 ont été traités avec des microchampignons pour tester l'efficacité de leur action sur les polluants organiques. Les microchampignons, sélectionnés pour leur capacité d'agir efficacement sur ces composés ont été inoculés (via l'inoculum préparé) dans le sédiment.

Le sédiment placé dans le bac 5 représentait l'échantillon témoin. En effet, il n'a pas été traité avec des microchampignons et a été maintenu dans les mêmes conditions que les sédiments contenus dans les autres bacs en termes de température, d'humidité et de lumière (conditions limites), pendant toute la période d'activité.

Une fois la préparation des bacs terminée, les sédiments provenant des 6 zones ont été traités différemment pendant l'activité et, plus précisément :

- Sédiments des ports de Gênes, Livourne et Pise : les sédiments contenus dans chaque bac ont été initialement aspergés d'eau, afin de maintenir une humidité sédimentaire d'environ 60 % nécessaire aux activités vitales des champignons, en quantités égales à 50 ml. Ces sédiments ont été humidifiés quotidiennement en utilisant la même quantité d'eau pendant toute la durée de l'activité. Pendant les périodes d'absence (> 5 jours) de l'opérateur chargé de cette tâche, les sédiments ont été pulvérisés abondamment avec 200 ml d'eau et les bacs ont été enveloppés d'une bâche en plastique noire perforée de manière à maintenir l'humidité et, en même temps, à permettre l'aération du sédiment.

- Sédiments du port de Cagliari, Centuri et Toulon : les sédiments contenus dans chaque bac ont été initialement humidifiés avec de l'eau, qui est nécessaire aux activités vitales des champignons, en quantité égale à 2,5 l. Les bacs ont été immédiatement recouverts de bâches en plastique noires perforées, de manière à maintenir l'humidité et, en même temps, à permettre l'aération des sédiments ; ces bâches ont été maintenues pendant toute la durée de l'activité. Par conséquent, après l'ajout de l'eau initiale (2,5 l), ces sédiments n'ont plus besoin d'être aspergés d'eau, ce qui permet de maintenir l'humidité nécessaire à la croissance des champignons tout au long de l'essai.

Les bacs contenant les sédiments ont été conservés en laboratoire, à température ambiante, pendant toute la durée de l'activité (60 jours).

Pendant cette période de 60 jours, un protocole d'échantillonnage commun à tous les sédiments testés, comprenant l'analyse chimique du sédiment, du papier absorbant inoculé de champignons et du papier absorbant sans champignons, a été appliqué.

De plus, des analyses du contenu organique et inorganique des sédiments de Centuri ont été effectuées afin d'évaluer l'action des microchampignons sur la dégradation de la *Posidonia Oceanica* qui caractérise ces sédiments.

Pour évaluer l'efficacité du traitement, les analyses chimiques (métaux et organiques) ont été effectuées quatre fois de suite sur les sédiments et sur les membranes, respectivement au moment de l'inoculation / 15 jours / 30 jours / et 60 jours après l'inoculation (temps 0/1/2/3). Les analyses métalliques dans les sédiments ont été effectuées à la fois dans les premiers centimètres des sédiments en contact étroit avec la membrane et sur la couche de sédiment sous-jacente.

- PRINCIPALES CONCLUSIONS FORMULÉES PAR DISTAV GÈNES ET PERSPECTIVES

Les essais de mycoremédiation ont montré que le traitement fongique était plus efficace pour l'accumulation des métaux lourds que pour la dégradation des contaminants organiques. L'une des principales limites des expériences réalisées a été de travailler avec des taux de contamination plutôt faibles : tant les valeurs des métaux que celles des contaminants organiques se situaient souvent en dessous des niveaux de tolérance standard. La contamination étudiée ici peut être qualifiée de résiduelle. Cependant, au moins en ce qui concerne les métaux, les résultats sont très encourageants et prometteurs.

Dans la plupart des sédiments, il a été constaté une réduction des contaminants et une augmentation de la concentration de métaux sur les membranes de feutre inoculées avec des champignons indigènes. S'agissant d'organismes vivants, un certain degré de sélectivité dans l'accumulation des métaux a été constaté : en effet, les espèces fongiques sont capables d'absorber certains métaux mieux que d'autres, et elles n'ont pas toutes développé leur capacité de bioaccumulation. Il existe, en effet, des métaux dits à fonction biologique, que les microorganismes sont capables d'absorber parce qu'ils sont déterminants pour assurer un bon fonctionnement cellulaire (par exemple Fe et Zn), et des métaux indifférents que seules certaines espèces sont capables de chélater et d'absorber grâce à l'évolution de mécanismes spécifiques et aussi grâce à l'adaptation et/ou l'exposition à ces métaux (par exemple Cr, As, Pb, Hg).

En suivant la stratégie d'évaluation pondérée de la qualité et de la dangerosité des sédiments décrite dans le Décret Ministériel Italien 173/2016, une évaluation quantitative de l'efficacité de la mycoremédiation sur les sédiments traités a été réalisée. Selon la valeur limite L1 (niveau chimique de référence le plus bas), avant traitement (Temps 0), les sédiments de Gênes présentent une contamination (HQc) élevée en métaux (rouge), Pise et Cagliari une contamination très élevée (noir). Selon la valeur limite L2 (niveau chimique de référence le plus élevé), les sédiments de Gênes ont une contamination absente (blanc), Cagliari une contamination moyenne (jaune) et Pise une contamination très élevée (noire).

Après le traitement par mycoremédiation (au Temps 3), une amélioration générale de la qualité des sédiments est observée. Pour Gênes cependant, l'amélioration s'est limitée à une réduction de classe de contamination par rapport à L1 : d'une forte contamination à une contamination modérée.

S'agissant des sédiments de Livourne, Centuri et Toulon, il n'a pas été possible de calculer le quotient de danger (HQc) des sédiments car les concentrations en métaux considérées par la législation dépassant les limites de détection au Temps 0 étaient trop peu nombreuses et auraient donné des résultats non significatifs. En ce qui concerne les HAP, tous les sédiments ont présenté une contamination initiale négligeable et l'évaluation n'a donc pas été appliquée.

L'évaluation de la qualité a mis en évidence une amélioration de la qualité des sédiments après la mycoremédiation, néanmoins insuffisante pour abaisser la classe de risque sédimentaire à un niveau acceptable pour une réutilisation éventuelle.

Cela pourrait signifier que pour des niveaux élevés de contamination métallique, comme dans le cas de Pise, l'effet positif de la mycoremédiation et/ou le temps de traitement utilisé dans ce pilote n'ont pas été suffisants pour obtenir une amélioration significative.

Cela pourrait être dû à des facteurs environnementaux externes ou aux caractéristiques physiques des sédiments (taille des grains, teneur en matière organique, pH, température ambiante, humidité). Il sera donc nécessaire d'approfondir cet aspect dans le processus de traitement et de trouver une possible amélioration.

La sélection des souches fongiques a été déterminante pour l'utilisation des champignons indigènes, car ils sont certainement les plus adaptés pour vivre dans et tolérer le milieu contaminé étudié. D'autre part, il est possible que les champignons adoptent l'exclusion comme stratégie de survie vis-à-vis d'un certain contaminant. C'est ce qui fait que chaque espèce est habile et très efficace dans l'accumulation de certains métaux, et l'exclusion complète d'autres éléments.

Les tests de mycoremédiation réalisés ont permis de caractériser mycologiquement un milieu particulier, celui des sédiments dragués, dont on sait aujourd'hui très peu de choses. En outre, les travaux ont permis de sélectionner des souches de champignons marins indigènes qui peuvent être utilisées dans les processus de biorestoration des sédiments de dragage contaminés en raison de leur excellente biodégradation des substances toxiques et, en particulier, de la bioconcentration des métaux lourds.

Les faibles valeurs de contamination constatées sur presque tous les sites ont montré que les champignons sont également potentiellement utilisables dans le traitement des contaminations résiduelles, principalement métalliques. L'étude d'une membrane absorbante poreuse sur laquelle le mycélium fongique peut facilement s'enraciner et se développer, en restant chimiquement en contact avec le substrat sous-jacent et en accumulant les métaux, y compris les métaux résiduels, représente un objectif intéressant et important qui pourrait réduire de manière significative les coûts d'élimination et de stockage des sédiments dragués à l'extérieur du port, ainsi qu'ajouter de la valeur et transformer ces sédiments en une ressource de manière totalement naturelle et durable directement *in situ*.

Ce projet doit encore être perfectionné et mis en oeuvre pour faciliter son utilisation à grande échelle et directement *in situ*, en transférant ainsi l'activité à une échelle réelle et non à une échelle de laboratoire, en l'adaptant à chaque type de sédiment à traiter et en essayant de la rendre applicable dans n'importe quelles conditions climatiques (même défavorables à la survie des champignons).

3.3) TRAITEMENT DES SÉDIMENTS PAR DÉSHYDRATATION (DEWATERING) - LIVRABLE T2.3.5 - NAVICELLI / PROVINCE DE PISE

Ce livrable décrit l'activité pilote mise en oeuvre par la société Navicelli di Pisa, tiers conventionné de la Province de Pise dans le projet SEDITERRA.

Navicelli di Pisa S.r.l. est une société publique créée dans le but de gérer le Canal Navicelli (reliant Pise au port de Livourne) et les zones publiques environnantes. La mission de Navicelli consiste à maintenir l'efficacité d'utilisation du canal via la mise en oeuvre des opérations de dragage des sédiments nécessaires et l'ouverture des ponts pour assurer le passage des bateaux.

- PRINCIPES ET OBJECTIFS DU TRAITEMENT

L'activité pilote a consisté à réaliser un dragage hydraulique (par pompage) d'environ 500m³ de sédiments, prélevés dans le lit du canal, et de tester l'efficacité et vérifier l'impact environnemental de leur déshydratation (« traitement par dewatering ») par utilisation de géotextiles drainants (*i.e.* géotubes). Le contrôle environnemental a été mené en effectuant une caractérisation physico-chimique des eaux de rejet.

- MATÉRIELS ET MÉTHODES DU TRAITEMENT

Les sédiments ont été dragués par des moyens hydrauliques et pompés à l'intérieur de 2 géotextiles drainants (taille de chaque géotextile : 4,0 m x 30,0 m x Hr < 1,7 m). L'essai a été réalisé en installant le système le long de la rive droite du canal Navicelli dans les zones de rattachement hydraulique du canal fluvial, dans le tronçon entre l'Incile et la Darsena Pisana.

L'installation du système a été précédée d'un aménagement morphologique minutieux de la zone afin d'assurer un bon drainage des eaux de lixiviation et de faciliter l'accès à la zone d'intervention.

Les géotextiles sont produits avec des caractéristiques de résistances mécaniques adaptées au confinement définitif du matériau pompé. Ils permettent de confiner à l'intérieur la partie solide du matériau dragué tout en facilitant le drainage de l'eau présente.

Les tubes géotextiles sont équipés de trappes de remplissage spécifiques (diamètre minimum DN100) placées à une distance d'environ 10 m les unes des autres afin de permettre leur remplissage au moyen d'un équipement de pompage approprié.

Les tubes sont équipés de buses spécifiques permettant de les remplir avec un mélange eau/sédiment, contenant un maximum de 15 % V/V de sédiment.

Le dragage hydraulique a été effectué avec une pompe d'aspiration et de refoulement de type DragFlow, dans une conduite de 100 m de long maximum, avec un débit de mélange boues/eau compris dans la plage 150-300 mc/h, adaptée à l'excavation de matériaux de type limoneux-argileux. Le débit horaire du mélange dragué à l'intérieur de chaque géotube fourni était d'environ un quart du volume de confinement maximum de celui-ci, afin de garantir un temps de libération adéquat du surnageant séparé à l'intérieur.

Le suivi environnemental a été mis en place en effectuant un contrôle physico-chimique quotidien des eaux rejetées tout au long du processus de pompage et dans les jours qui ont suivi la fin des travaux. Les sédiments ont, quant à eux, été caractérisés moins fréquemment, dans les phases les plus significatives du processus de déshydratation (début, moyen terme et fin du traitement).

Pendant la phase de pompage, deux échantillons d'eau ont été prélevés quotidiennement pour analyse : au début et à la fin des activités. Le pompage dans les géotextiles drainants a duré 3 jours. Après remplissage (*ie.* Fin du pompage), un prélèvement d'eau quotidien a été effectué et cela pendant 4 jours consécutifs. Deux échantillons d'eau supplémentaires ont également été prélevés pour contrôle 7 et 10 jours après la fin de la surveillance quotidienne.

L'eau (échantillons de 1000 mL) a été prélevée en différents points du géotube afin d'avoir un échantillon composite moyen représentatif de toute l'eau expulsée.

Les résultats d'analyse obtenus se réfèrent aux limites réglementaires du tableau 2 de l'annexe 5, partie IV du D.-L. 152/2006 pour les eaux usées.

- **SYNTHÈSE DES RÉSULTATS OBTENUS PAR NAVICELLI**

L'examen des résultats analytiques montre que les concentrations maximales mesurées dans les eaux émises et libérées dans le milieu adjacent (*ie.* l'eau du canal) sont supérieures aux limites établies par la législation en vigueur pour les eaux usées (Concentrations Seuils de Contamination (CSC)) en ce qui concerne les sulfates (7 à 8 fois le seuil), le nickel (1.8 fois), l'arsenic (3 à 30 fois), le plomb (2 fois) et le cuivre (2.3 fois).

Ces dépassements constatés dans les eaux ne sont pas intimement reliés aux teneurs présentes dans le sédiment qui, elles, sont bien en deçà des seuils autorisés par la législation (Tableau 1 de l'annexe 5 - partie IV - Décret Législatif 152/2006).

Enfin, il est constaté en fin de suivi, soit 10 jours après la fin du pompage, que, hormis pour les teneurs en sulfates (liées à la nature saumâtre des sédiments), les valeurs mesurées dans les eaux de ressuyage redeviennent toutes bien inférieures aux seuils législatifs pour les eaux usées.



3.4) TRAITEMENT PAR CALCINATION DES FRACTIONS DE FIBRES DE POSIDONIE - LIVRABLE T2.3.6 – PROVADEMSE / INSA LYON

Ce livrable T2.3.6 synthétise les résultats obtenus par PROVADEMSE - prestataire principal de l'INSA de Lyon dans le projet SEDITERRA – lors de l'étude de faisabilité de préparation et de valorisation par gazéification des résidus végétaux issus du traitement des sédiments marins.

- PRINCIPES ET OBJECTIFS DU TRAITEMENT

Les opérations de dragage des sédiments marins entraînent, dans certains cas, la récupération de quantités importantes de biomasse marine, à l'instar des résidus de posidonies. Les opérations de traitement des sédiments dragués permettent de séparer une fraction principalement minérale, valorisable, et de produire des résidus végétaux, qui malgré la présence de sable pourraient être également valorisés énergétiquement et éviter ainsi leur mise en décharge.

L'étude réalisée traite de la possibilité de la valorisation énergétique de ces résidus de biomasse marine. Pour cela une expérience pilote de traitement thermique des fractions de fibres et grains de résidus végétaux a été menée afin d'en déterminer le potentiel de valorisation énergie et d'en assurer l'évaluation.

- MATÉRIELS ET MÉTHODES DU TRAITEMENT

Production des résidus de biomasse marine

Les sédiments étudiés acheminés sur le CPEM ENVISAN de La Seyne s/ mer ont fait l'objet, par ENVISAN, d'un traitement en deux étapes permettant la séparation de la fraction principalement minérale des sédiments, susceptible de faire l'objet d'autres modes de valorisation, de la fraction principalement organique, destinée à la valorisation énergétique.

La première étape consiste à envoyer les sédiments dans une cuve d'eau possédant des plans inclinés et une vis sans fin qui permet par différence de densité de séparer les résidus organiques les plus grossiers. Un deuxième traitement est ensuite effectué sur les résidus qui consiste en 2 trommels sous eau qui permettent de séparer les résidus végétaux.

Les résidus végétaux qui ont fait l'objet de cette étude sont issus de cette deuxième étape de traitement.

Préparation des résidus de biomasse marine

Les parties valorisables énergétiquement des résidus végétaux sont les parties fibreuse et granulaire non sableuse. Comme la technologie visée en traitement thermique est la pyro-gazéification à lit fixe, les déchets sous forme de fibres et grains ne sont pas adaptés du fait de leur faible densité. Il est donc indispensable que les déchets soient préparés (tamisage, séparation et pelletisation) afin de correspondre aux caractéristiques physiques adéquates pour le traitement en lit fixe.

Pour préparer les échantillons de résidus de biomasse marine afin de les gazéifier, nous avons, au préalable déterminé le taux d'humidité et étudié la cinétique de séchage des échantillons, déterminé la composition des échantillons par nature (fibres, grains) et leur distribution granulométrique. Nous avons aussi étudié leurs caractéristiques physico-chimiques et reconditionné les échantillons avant de les pelletiser avec un taux d'humidité optimal.

Ainsi les résidus de biomasse marine ont été préparés après optimisation de leur valeur énergétique par séchage et extraction par tamisage de la fraction supérieure à 500 µm qui représente plus de 90% de la masse sèche des résidus végétaux, dont le taux de cendre (21%) est réduit par rapport à l'échantillon brut et dont la valeur énergétique (>17 MJ/kg) est supérieure à celle de l'échantillon brut et proche de celle de combustibles tels que le bois. La fraction inférieure à 500 µm, quant à elle, essentiellement sableuse, pourrait faire l'objet d'une valorisation matière qui reste à étudier. Après élimination de la fraction inférieure à 500 µm, les échantillons ont été reconstitués au prorata de chaque fraction (fibres : 25% et grains : 75%), et humidifiés à 30% avant d'être pelletisés. Les pellets ont été ensuite séchés à l'air libre pour atteindre une humidité résiduelle inférieure à 20% avant la gazéification.

Dispositif expérimental de gazéification

Le dispositif expérimental de gazéification utilisé pour les essais de faisabilité de valorisation énergétique est un réacteur de pyro-gazéification à lit fixe co-courant d'une puissance de 100 kW spécifiquement mis au point pour les besoins de PROVADEMSE afin de l'adapter au traitement de certains déchets et de disposer de l'ensemble des données nécessaire pour vérifier le comportement de la matière dans le réacteur, évaluer les performances de la gazéification et établir un bilan matière énergie de l'opération. Ce réacteur est complété par un échangeur permettant le refroidissement du syngaz produit ainsi qu'une chaudière destinée à la combustion du syngaz refroidit et un aérotherme pour la dissipation des calories produites par la chaudière.

Suivi de la gazéification

Le fonctionnement du réacteur de gazéification a été suivi par la mesure des paramètres suivants :

- Débit d'air injecté au niveau des différentes zones du réacteur (séchage/pyrolyse, oxydation, réduction)
- Température des différentes zones, y compris du gaz produit (syngaz) depuis la sortie du réacteur jusqu'à son introduction dans la chaudière via son refroidissement
- Pression et perte de charge en différents points du réacteur
- Combustion du syngaz, évolution des débits de syngaz, d'air de combustion et des fumées
- Récupération de chaleur et détermination de la puissance du syngaz

Caractérisation des produits entrants et résultants de gazéification

La caractérisation des produits entrants (pellets) et des différents produits issus du procédé, résidus solides, syngaz et fumées a été réalisée au moyen d'analyses physico-chimiques, analyses élémentaires et analyses de la composition des inorganiques.

L'analyse du syngaz a été menée par le prélèvement des goudrons (tar-Protocol), dont l'analyse spécifique a été confiée au CIRAD de Montpellier, et la mesure en continu des gaz permanents en micro-chromatographie en phase gazeuse.

PRINCIPAUX RÉSULTATS OBTENUS

Caractéristiques des pellets de biomasse marine

Ces pellets présentent une composition en chlore supérieure à la limite fixée pour une valorisation énergétique en chaudière à biomasse. En revanche, leur composition (analyse élémentaire et teneur en métaux) est compatible avec leur valorisation énergétique comme CSR (Combustible Solide de Récupération). Ces pellets peuvent donc être valorisés dans les installations relevant de la rubrique ICPE 2971 comme par exemple une unité de pyro-gazéification.

Compte tenu de l'important taux de cendre de ces résidus de biomasse marine, malgré l'élimination de la fraction <500µm, l'étude du comportement à la fusion des cendres s'est avérée nécessaire et a montré que la gazéification de ces résidus végétaux peut présenter un risque de production d'importantes quantités de cendres fondues susceptibles de se solidifier par refroidissement avec des conséquences graves sur l'écoulement de la matière dans le réacteur ou dans le système d'évacuation des cendres. Cet aspect constitue une limite opérationnelle à vérifier et éventuellement résoudre dans le cadre du développement industriel de cette solution de valorisation énergétique des résidus de biomasse marine.

Résultats des essais de gazéification

Ces essais ont permis de valider le bon comportement mécanique du lit de gazéification (écoulement, perte de charge, tassement, voûtage, etc) malgré la formation observée de solidifiats parmi les résidus. Par comparaison avec la mise en œuvre des mêmes essais à partir de déchets de bois A voire plaquettes de bois B, la conduction des essais apparaît même plus aisée.

Les essais ont montré que la chaleur produite en sortie de réacteur de gazéification des résidus de biomasse marine peut être utilisés pour les opérations de séchage des résidus végétaux avant leur préparation et gazéification.

Les caractéristiques de combustion du syngaz produit sont similaires à celles observées à partir d'autres combustibles comme des plaquettes de bois.

La combustion du syngaz dans la chaudière a permis de produire une puissance moyenne autour de 50 kW dont 17 kW apporté par du propane. Une optimisation pourrait permettre de fonctionner sans apport de propane. Le bilan énergétique de la chaudière montre que les goudrons contenus dans le syngaz constituent une part non négligeable du contenu énergétique produit par la gazéification.

La mise en œuvre des essais de pyro-gazéification et les opérations de maintenance qui ont suivi ont permis de mettre en évidence des phénomènes de corrosion de la chaudière utilisée pour la combustion du syngaz produit. Ceci constitue une nouvelle limite opérationnelle à vérifier et éventuellement résoudre dans le cadre du développement industriel de cette solution de valorisation énergétique des résidus de biomasse marine.

Caractéristiques de produits de gazéification

Les résidus solides issus du procédé de gazéification de pellets de biomasse marine présentent des teneurs en chlorures et en métaux relativement importantes du fait d'un effet de concentration dans la matière débarrassée d'une partie de son contenu en matière organique.

Cette composition les rend impropres à une valorisation énergétique secondaire dans une installation de combustion de biomasse.

La composition du syngaz produit à partir de pellets de biomasse marine montre que celui-ci est de moins bonne qualité qu'un syngaz produit à partir de plaquettes forestières ce qui se traduit par un PCI plus faible (3,85 MJ/Nm³ contre 4,65 MJ/Nm³ pour le syngaz produit à partir de plaquettes forestières). De plus, la gazéification des pellets de biomasse marine conduit à la production, dans le syngaz, d'une teneur de 0,12% en H₂S, en partie responsable des phénomènes de corrosion observés lors des opérations de maintenance.

Le syngaz des pellets de biomasse marine contient une teneur en goudrons de 4,1 g/Nm³, proche de celle de syngaz de plaquettes de bois B. Ces goudrons sont principalement constitués de composés aromatiques et de HAP pour environ 70%. Selon les applications visées par le syngaz, une étape d'épuration (non nécessaire dans notre cas d'alimentation d'une chaudière adaptée) pourrait s'avérer nécessaire.

L'analyse des fumées de combustion du syngaz révèle des teneurs en NO_x, SO_x, HCl, plomb et somme des métaux (Sb, Cr, Co, Cu, Sn, Mn, Ni, V, Zn) supérieures aux valeurs limites d'émission fixées pour les installations de combustion de biomasse et de combustibles solides soumises à la réglementation ICPE 2910. Ainsi, si l'application visée du syngaz doit être la combustion, il est indispensable de mettre en place un traitement de fumées, notamment des équipements de Denox des fumées afin de se mettre en adéquation avec les limites d'émission fixées par la réglementation.

Performances du procédé de gazéification

En termes de performances, les essais réalisés ont permis de convertir 91,2% de la matière organique sous la forme de gaz combustible. Ce taux de conversion est relativement important mais pourrait être amélioré par des actions sur la conduite de procédé pour se rapprocher des taux de conversion (de l'ordre de 96%) obtenus avec des déchets de bois A ou des plaquettes forestières.

Le bilan matière montre que 93% de l'alimentation (charge brute et air de process) est transformé en syngaz alors que les résidus solides représentent 3,8% de la matière entrante.

Le bilan énergétique de ces essais, qui ne correspondent pas à des conditions optimisées de fonctionnement, montre que la puissance entrante (47 kW) basée sur le PCI de la charge, a permis de produire 30 kW de syngaz, 3,2 kW d'énergie dans les résidus (PCI), 3 kW de chaleur issue du refroidissement du syngaz et 10,7 kW d'énergie spécifique des résidus et pertes pariétales.

- SYNTHÈSE GÉNÉRALE FORMULÉE PAR PROVADEMSE (INSA LYON)

Cette étude réalisée au sein de la plateforme technologique PROVADEMSE de l'INSA de Lyon avait pour objectif de réaliser des recherches de R&D sur la faisabilité technique et environnementale de traitement des résidus de biomasse marine par gazéification. Un accent a été mis sur la préparation de la charge avant traitement. Ces opérations de préparation ont montré qu'il était indispensable que les résidus de biomasse marine subissent quelques opérations unitaires avant gazéification. Les principales opérations unitaires identifiées et réalisées avant gazéification sont :

- *Séchage*
- *Tamissage et séparation des fractions fines (fraction <0,5mm)*
- *Densification par pelletisation*

❖ **Séchage** : Les opérations de séchage ont été précédées d'une étude de la cinétique de séchage suivant diverses conditions opératoire (température de séchage, durée du séchage, épaisseur de la couche, etc.). En phase de préparation, il a été démontré qu'il fallait ramener l'humidité des résidus de biomasse marine de plus de 60% à environ 15 à 20%.

❖ **Tamissage / séparation** : une étude granulométrique fine a été réalisée sur les résidus de biomasse marine et des analyses (MOT, PCI, taux de cendres) réalisées sur chaque fraction. L'interprétation des résultats obtenus a permis de constater que les fractions fines (en deçà de 500 μ m) représentaient environ 10% de la masse totale. Mais ce qui a été important c'est que cette fraction concentrait la grande partie des matières minérale de la charge brute tandis que la quasi-totalité de la fraction organique, donc de l'énergie, était concentrée dans la fraction opposée (sup. à 500 μ m). Cela a justifié le bien fondé de réaliser en phase de préparation la séparation des fractions fines inférieures à 500 μ m.

❖ **Densification** : La masse volumique des résidus de biomasse marine séchés ne représente que 119 kg/m³. Cette valeur est trop faible pour que ce déchet convienne à un réacteur de gazéification à lit fixe, dont l'écoulement dans le réacteur est gravitationnel. Il était donc nécessaire de procéder à la pelletisation de cette charge. Cette opération a permis d'obtenir des pellets d'une densité de plus de 480 kg/m³, densité qui convient mieux pour ce genre de procédés de gazéification à lit fixe.

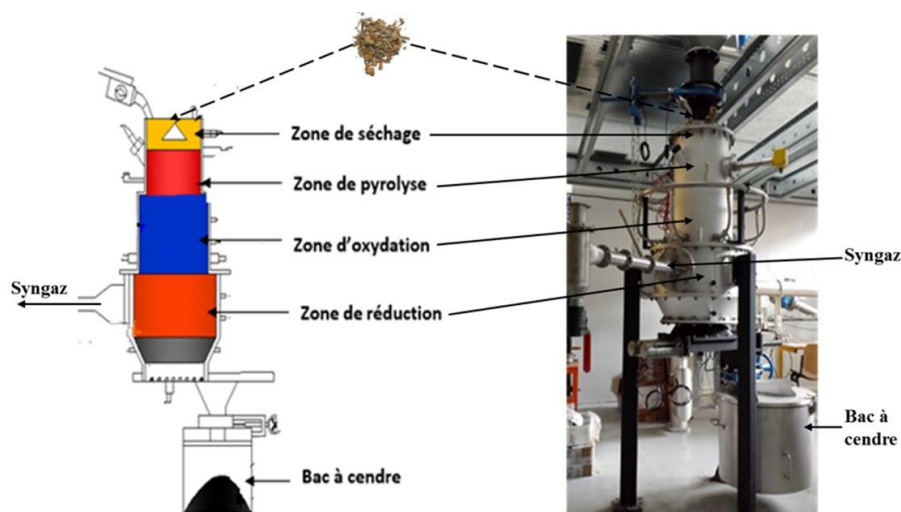
Après les opérations de préparation suivant la démarche ci-dessus synthétisée, plusieurs heures d'essais de gazéification s'étalant sur plus de 2 jours ont été menés. Ces essais ont été précédés par une phase de caractérisation fine des pellets de biomasse marine obtenus après préparation.

L'étude proprement dite de faisabilité de gazéification à l'échelle pilote a porté sur des pellets de biomasse marine. Ces essais ont permis de valider le bon comportement mécanique du lit de gazéification (écoulement, perte de charge, tassement, voûtage, etc.).

L'analyse de tous les effluents solides, liquides et gazeux issus du procédé a ensuite été réalisée. Une attention particulière a été portée à l'analyse du syngaz et l'identification des goudrons (composés considérés comme tels). En termes d'émissions gazeuses (émissions atmosphériques) l'analyse des fumées a permis de confronter les résultats obtenus à la réglementation en vigueur. Il a été noté particulièrement que les teneurs élevées en NOx dépassent les valeurs limites préconisées par les diverses réglementations.

Les résidus solides ont été caractérisés, et il s'est avéré qu'ils ne respectaient pas les valeurs limites préconisées pour les cendres issues des installations relevant de la rubrique ICPE 2910-B.

Il a donc pu être démontré que la gazéification des résidus végétaux issus du traitement des sédiments marins présentait un fort potentiel. Cependant, une autre filière devra être trouvée pour les fractions fines (<500µm), en majorité du sable, mais qui représente moins de 10% en masse des résidus végétaux bruts. Par ailleurs, si le gaz a pour vocation à être brûlé, une attention particulière devra être portée aux émissions atmosphériques. Il serait même plus judicieux d'envisager des équipements de traitement de fumées (NOx, HCl, métaux).



Aperçu du réacteur de gazéification de la plateforme PROVADEMSE avec les différentes zones de réactions

IV. SYNTHÈSE DES PILOTES DE TRAITEMENT ET VALORISATION DES SÉDIMENTS (T2.4) - LIVRABLE T2.4.7 - PROVADEMSE / INSA LYON ; ISPRA LIVOURNE ; RAS / CAGLIARI

Le livrable T2.4.7 présente les résultats expérimentaux obtenus par les partenaires du projet SEDITERRA en charge de la mise en œuvre et des suivis environnemental et géotechnique des pilotes de valorisation élaborés à partir des sédiments de dragage bruts et traités étudiés durant le projet. Ces partenaires sont les suivants :

- INSA de LYON via son prestataire PROVADEMSE
- ISPRA LIVOURNE
- Région Autonome de Sardaigne / Cité Métropolitaine de Cagliari

PRINCIPES ET OBJECTIFS

La gestion des sédiments méditerranéens dragués fait l'objet de procédures d'évaluation différentes en France et en Italie. Les deux démarches ont été appliquées en vue d'en évaluer les conditions acceptables de gestion.

La finalité recherchée pour ces sédiments est en premier lieu de les valoriser en tant que matière première de substitution dans des ouvrages de génie civil comme des remblais techniques, des mortiers de remblaiement de tranchée ou encore des bétons courants.

L'évaluation environnementale de l'utilisation de sédiments dans de telles application peut faire l'objet, en France d'une procédure allant jusqu'à la mise en œuvre d'essais de simulation à une échelle pilote.

Le rapport T2.4.7 décrit les procédures d'évaluation française et italienne, leur application aux sédiments étudiés, la préparation de matériaux à base de sédiments, l'évaluation des propriétés techniques de ces matériaux ainsi que leur évaluation environnementale afin d'identifier les paramètres susceptibles de rendre de tels ouvrages non conformes aux conditions acceptables de valorisation et d'envisager d'éventuelles adaptations des procédures françaises et italienne d'évaluation environnementale de sédiments marins dans une perspective de valorisation.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les quatre sédiments qui ont fait l'objet des essais pilotes de traitement et de valorisation ont été sélectionnés parmi les 16 échantillons caractérisés en phase préliminaire. Ces échantillons sont identifiés ainsi par leur provenance :

- Centuri
- Toulon
- Cagliari
- Livourne

Les méthodologies française et italienne employées et les résultats des caractérisations des sédiments sur les plans physico-chimiques, écotoxicologiques et géotechniques sont présentées dans le détail dans le livrable T2.4.7. Ce livrable T2.4.7 présente également la méthodologie et les résultats des différents essais de formulation et les contrôles géotechniques menés en laboratoire permettant *in-fine* de sélectionner celles à mettre en œuvre et à suivre à l'échelle pilote.

Les ouvrages pilotes de valorisation élaborés à partir des 4 sédiments sélectionnés (deux sédiments italiens et deux sédiments français) ; de conception identique ; ont été réalisés sur deux sites distincts :

- Dans des containers thermo-régulés sur la plateforme environnementale dédiée à la R&D du CPEM ENVISAN à la Seyne sur mer pour les ouvrages à base des sédiments français de Centuri et Toulon
- Sous abri dans les locaux d'ISPRA à Livourne pour les ouvrages à base de sédiments italiens de Livourne et Cagliari

Traitement effectué

Les traitements des sédiments ont été réalisés par lavage / hydrocyclonage avec le matériel ISPRA sur le site de Livourne pour les sédiments de Livourne et Cagliari ; et sur le site de Toulon pour le sédiment de Centuri ; et avec le matériel ENVISAN sur le site de Toulon (CPEM) pour le sédiment « Toulon ». Ces traitements ont eu pour objectifs d'extraire des sédiments les éléments fins et les résidus végétaux pour conserver les fractions sableuses, utilisées par la suite dans les formulations.

Pilotes de valorisation testés

Dans le cas des sédiments italiens, les scénarii et les types de pilotes de valorisation retenus sont les suivants :

- Deux lysimètres simulant un remblai, élaborés avec :
 - le sédiment de Cagliari brut
 - le sédiment de Livourne traité

- Quatre dalles en mortier ou béton :
 - Deux dalles en mortier avec les sédiments de Cagliari brut et traité
 - Deux dalles en béton avec les sédiments de Livourne brut et traité

Dans le cas des sédiments français, les scénarii et les types de pilotes de valorisation retenus sont les suivants :

- Trois lysimètres simulant un remblai, élaborés avec :
 - le sédiment de Centuri brut
 - le sédiment de Centuri traité sur Toulon (par ISPRA)
 - le sédiment de Toulon brut

- 6 dalles en mortier ou béton
 - Deux dalles en mortier avec les sédiments de Toulon brut et traité
 - Deux dalles en béton avec les sédiments de Toulon brut et traité
 - Deux dalles en mortier avec les sédiments de Centuri brut et traité

- 2 dalles en mortier ou béton témoin
 - Une dalle en mortier témoin avec le ciment et le sable français
 - Une dalle en béton témoin avec le ciment, le gravier et le sable français

Description de la mise en œuvre des lysimètres pilotes

À Livourne, les pilotes remplis avec les sédiments consistent en des bacs en bois OSB de 2,5 m de long par 1,75 m de large et 0,83 cm de haut ; soit une surface de 4,375 m². À Toulon, les dimensions des lysimètres ont été adaptées pour maintenir la même surface soit 2,26 x 1,94 m. Le détail de la réalisation de ces bacs « casiers lysimétriques » est présenté dans le livrable T2.4.7.

Le système d'arrosage consiste en 48 buses de brumisation réparties en 3 réseaux de 16 buses permettant d'exposer l'entièreté de la surface des lysimètres expérimentaux. Les 3 réseaux sont gérés par un ensemble de minuteries et d'électrovannes. Les 3 réseaux sont déclenchés, un par un, toutes les 6 minutes et 40 secondes, soit un arrosage complet toutes les 20 minutes.

Le premier jour les buses sont déclenchées manuellement afin d'imbiber la masse totale de sédiment, l'arrosage est arrêté dès que l'eau arrive à la sortie d'évacuation (fond du lysimètre).

Description de la mise en œuvre des dalles pilotes

Les dalles mortier et béton pilotes sont réalisées selon les formulations mises au point en laboratoire (voir livrable T2.4.7). Le gâchage est réalisé dans une bétonnière standard. Le coulis est versé dans des contenants en PE de dimensions L x l x h = 555 x 355 x 235 mm soit une surface de 0,20 m². Les dalles réalisées font environ 11 cm de hauteur.

Les formulations mises en œuvre sont résumées dans les tableaux suivants :

Composition en % de masse sèche des mortiers et béton issue des essais de formulation et réalisés pour les dalles pilotes

	Mortier avec les sédiments de Cagliari & Toulon & Centuri		Béton avec les sédiments de Livourne & Toulon	
	<i>brut</i>	<i>traité</i>	<i>brut</i>	<i>traité</i>
Sédiment	29,43%	42,04%	20,19%	40,38%
sable	54,65%	42,04%	20,19%	0,00%
gravier	0,00%	0,00%	44,09%	44,09%
ciment	15,76%	15,76%	15,32%	15,32%
réducteur	0,16%	0,16%	0,21%	0,21%
total	100%	100%	100%	100%

Les pourcentages d'eau utilisés dans les formulations sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Teneur en eau des formulations de dalles pilotes

Pourcentage d'eau réel	Mortier		Béton	
	brut	traité	brut	traité
Toulon	19,7%	15,3%	10,86%	11,69%
Centuri	11,1%	13,3%	-	-
Cagliari	21,44%	16,50%	-	-
Livourne	-	-	12,30%	13,69%
Témoin	18,4%		10,9%	

Suivis des pilotes

Exposition à l'eau des lysimètres : La procédure retenue consiste à arroser les sédiments avec un volume équivalent à la pluviométrie moyenne annuelle en France soit 800 mm/m² sur 6 mois. Cela correspond à 30,77 mm/m²/semaine. Les lysimètres ont une surface de 4,375 m² et nécessitent chacun un arrosage par semaine d'un volume d'eau de 61,5 litres ; soit 1600 litres pour les 6 mois d'essai. Les éluats ont été recueillis chaque semaine et le volume de solution récupéré ainsi que son pH et sa conductivité ont été notés.

Exposition à l'eau des dalles : La procédure retenue pour les dalles de matériaux consiste à les couvrir de 10 mm d'eau durant 24 h une fois par semaine. Ce qui correspond à apporter 2 litres d'eau par dalle et par semaine. Le volume récupéré est mesuré pour tenir compte de l'évaporation et de l'eau d'infiltration. Cette procédure a été maintenue tant que la diminution des concentrations obtenues des éléments majeurs n'était pas significative. Ensuite, le temps de contact avec l'eau est passé à 48h par quinzaine et toujours 10 mm d'eau pour donner le temps à la dalle de recharger son eau des pores et d'obtenir des concentrations mesurables pour les éléments traces. Dans ce cas l'équivalent de pluviométrie est de 150 l/m², par contre toute l'eau reste au contact du matériau. Ce scénario représente des épisodes pluvieux fréquents et une configuration permettant le maintien d'une lame d'eau durant 24 à 48 h. Le relargage obtenu est probablement équivalent à celui de quelques années dans la réalité en fonction de la façon dont est estimée la pluie efficace pour une dalle.

Suivi analytique : Les éluats des lysimètres et des dalles ont fait l'objet d'une analyse chimique des métaux et des anions à l'issu des semaines suivantes :

semaines	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Analyse	1	2	3	4	mix 5-6		mix 7-8		mix 9- 10		mix 11 à 14			

semaines	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Analyse	mix 15 à 18				mix 19 à 22				mix 23 à 26			

Les paramètres analysés sont : pH, Conductivité, Chlorures, Sulfates, Fluorures, Antimoine (Sb), Arsenic (As), Baryum (Ba), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Etain (Sn), Mercure (Hg), Molybdène (Mo), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Sélénium (Se), Zinc (Zn).

Les éluats des lysimètres et des dalles ont fait l'objet d'une analyse écotoxicologique sur 3 prélèvements à l'issu des semaines 2 (1 prélèvement) ; 9-10 (mix de 2 prélèvements) ; 23 à 26 (mix de 4 prélèvements).

Le bioessai sélectionné pour faire l'objet du suivi écotoxicologique des éluats de lysimètres et de dalles est l'essai d'inhibition de la reproduction du rotifère *Brachionus calyciflorus* 48h (ISO 20666), qui s'est montré le plus sensible lors des essais préliminaires de caractérisation de la propriété de danger écotoxique (HP14). Il s'agit d'un essai de toxicité chronique dont l'indicateur utilisé dans le cadre de la procédure française HP14 est la CE20 avec un seuil de déclenchement du caractère dangereux de 1%.

Méthodologie d'interprétation des données analytiques environnementales :

L'évaluation des émissions de substances dans l'eau à partir des sédiments placés **en lysimètre** a été effectuée par comparaison des concentrations totales d'une part et de la masse relarguée cumulée rapportée à l'unité de surface d'autre part, avec les valeurs limites définies, dans le cadre de la démarche française d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière (niveau 3 de caractérisation environnementale – voir livrable T1.2.4).

La note d'information « Aide à la mise en œuvre du niveau 3 de caractérisation environnementale – Volet n°1 : les essais lysimétriques et plots expérimentaux » fourni ainsi deux gammes de seuils, la première exprimée en concentration maximale, la seconde en masse relarguée cumulée par unité de surface. Les valeurs limites en concentration à ne pas dépasser pour un matériau alternatif employé en technique routière dans le cadre d'essais lysimétrique ou de plots expérimentaux sont les suivantes :

Paramètre	Concentration maximale
	Valeur (mg/l)
As	0.3
Ba	20
Cd	0.3
Cr total	2.5
Cu	30
Hg	0.03
Mo	3.5
Ni	3
Pb	3
Sb	0.15
Se	0.2
Zn	15
Fluorure	40
Chlorure	8 500
Sulfate	7 000

Valeurs limites de concentration

Les valeurs limites en quantité surfacique relarguée cumulée à ne pas dépasser pour un matériau alternatif employé en technique routière dans le cadre d'essais lysimétrique ou de plots expérimentaux sont les suivantes :

Paramètre	Quantité surfacique relarguée cumulée
	Valeur (mg/m ²)
As	10
Ba	700
Cd	4
Cr total	50
Cu	625
Hg	1
Mo	70
Ni	20
Pb	10
Sb	5
Se	6
Zn	625
Fluorure	750
Chlorure	125 000
Sulfate	125 000

}

$$X \min \left(d \cdot \frac{P_{eff}}{P_{ref}} \right)$$

d est la durée du suivi (an)
P_{eff} est la pluie efficace mesurée sur la durée du suivi (mm).
P_{ref} est la pluie efficace annuelle de référence qui vaut :

- 100 mm/an dans le cas d'un usage revêtu
- 300 mm/an dans le cas d'un usage recouvert

Valeurs limites de quantité surfacique relarguée

La définition de ces valeurs est dépendante d'un facteur correctif prenant en compte la plus faible valeur entre la durée d'exposition (en année) et le rapport de la pluie efficace sur une pluie de référence définie comme étant égale à 100 mm/an dans le cas d'un usage revêtu (surmonté d'un enrobé) ou à 300 mm/an dans le cas d'un usage recouvert (surmonté de 30 cm de terre végétale)

Dans notre cas, la durée d'exposition prise pour référence est la pluviométrie d'1 an et la pluie efficace est proche de 800 mm/an. Le facteur correctif est donc de 1.

L'évaluation environnementale de **matériaux de construction** intégrant des sédiments en substitution partielle du sable (ex. dalles) ne fait l'objet d'aucune procédure réglementaire à l'heure actuelle, ni en France ni en Italie. L'évaluation des émissions de substances dans l'eau à partir des matériaux formulés à base de sédiments exposés sous forme de dalles a donc été effectuée par comparaison des concentrations d'une part et de la masse relarguée cumulée rapportée à l'unité de surface d'autre part, avec les valeurs d'émission observées à partir de matériaux réalisés selon les mêmes formulations sans sédiments et exposés dans les mêmes conditions (matériaux témoins).

Évaluation géotechnique et mécanique des matériaux :

Les sédiments utilisés pour les pilotes de valorisation en béton et mortier ont également été utilisés pour élaborer, dans les mêmes conditions de formulation, des éprouvettes destinées à l'analyse géotechnique (par RAS-Cité Métropolitaine de Cagliari).

Entres autres analyses (voir livrable T2.4.7), les Résistances à la Compression moyennes et les Masses Volumiques moyennes ont été mesurées dans l'optique de classer les écomatériaux élaborés afin de déterminer leur domaine possible de réemploi. Ce classement s'appuie en particulier sur les valeurs suivantes :

Classe	M1	M2,5	M5	M 10	M 15	M 20	Md
Résistance à la compression à 28 jours [N/mm ²]	1	2,5	5	10	15	20	d*
* d= résistance à la compression déclarée par le fabricant > 25 N/mm ²							

Différentes classes de mortier en fonction de la résistance à la compression à 28 jours

PRINCIPAUX RÉSULTATS OBTENUS

Analyse géotechnique (partenaire RAS) :

- **Dalle Béton** : Les résultats montrent que l'utilisation des sédiments bruts, mélangés à un pourcentage égal de sable, a entraîné une réduction significative des valeurs de résistance à la compression, qui ont été presque divisées par deux par rapport à celles de l'échantillon d'essai. Les valeurs de résistance obtenues permettent en tout cas de faire entrer les mélanges de sédiments et de ciment dans le champ des matériaux utilisables. En particulier, les valeurs de résistance à la compression permettent de classer les bétons adaptés à un usage non structurel, c'est-à-dire aux produits pour lesquels une valeur de résistance à la compression élevée n'est pas requise.

Il est également à noter que même dans les spécimens faits à partir des sédiments traités, les valeurs de résistance sont sensiblement similaires à celles faites avec les sédiments bruts.

- **Dalle Mortier** : Même dans le cas des échantillons de mortier, la valeur de résistance des éprouvettes témoins est presque le double de celle des éprouvettes faites avec des sédiments.

En ce qui concerne la possibilité d'utiliser les sédiments dans la production de mortier, les valeurs de résistance obtenues permettent néanmoins de faire entrer les mélanges sédiments-ciment dans le champ des matériaux utilisables (avec de faibles exigences mécaniques).

Suivi environnemental des lysimètres :

- L'écotoxicité des éluats de lysimètre n'apparaît que dans les premiers éluats des lysimètres des sédiments Toulon brut, Centuri brut et Centuri traité. Le classement des sédiments en fonction de l'écotoxicité des premiers éluats reflète les niveaux de relargage de chlorures et sulfates entre les trois sédiments. La toxicité des éluats disparaît dans les prélèvements suivants.

L'interprétation des analyses écotoxicologiques des éluats des lysimètres suivis à Livourne n'a pas été possible en raison d'une durée de stockage des éluats trop importante.

- Les paramètres susceptibles de rendre les ouvrages étudiés non conformes aux conditions acceptables d'un point de vue environnemental pour une valorisation en technique routière sont :
- Les chlorures
 - Les sulfates
 - Le molybdène dans le seul cas du sédiment de Cagliari

Pour être conforme aux conditions d'acceptabilité définies en France pour leur valorisation en remblai technique, les sédiments marins étudiés nécessitent un lavage préalable efficace des chlorures et sulfates.

Suivi environnemental des dalles :

- L'écotoxicité des éluats de dalles de matériaux n'apparaît que dans les éluats prélevés au point intermédiaire. En effet, ces éluats ne présentent pas de toxicité vis-à-vis de *Brachionus calyciflorus* au démarrage de l'exposition et un seul des matériaux (Mortier de Toulon Traité) présente une toxicité en fin de durée d'exposition.

Les niveaux de toxicité observés dans le prélèvement intermédiaire sont peu différents entre les matériaux à base de sédiments et les matériaux témoin. Il s'agit donc, pour une part au moins, d'un effet de la matrice cimentaire.

- Les éluats des dalles pilotes présentent tous un pH basique compris entre 9 et 10,5 pour Toulon et Centuri et entre 8,5 et 10,5 pour Cagliari et Livourne. Ce niveau de pH correspond à celui observé pour les matériaux témoins. Il correspond à l'effet de la matrice qui contient un excès d'éléments alcalins solubles. L'évolution du pH des éluats ne présente pas de signe évident de carbonatation (diminution du pH) sur la période de suivi.
- Les paramètres susceptibles de rendre les ouvrages non conformes aux conditions acceptables d'un point de vue environnemental pour une valorisation en matériaux de type béton ou mortier :
- Les chlorures
 - L'arsenic et le molybdène dans le cas du sédiment de Toulon Traité, en particulier dans la formulation Mortier.

La texture (fine ou sableuse) et les conditions de préparation des sédiments (lagunage, traitement, exposition à l'eau de pluie) peuvent influencer sur la teneur en chlorures et éventuellement d'autres éléments facilement lixiviables, en particulier dans des conditions de pH basique (arsenic).

SYNTHÈSE GÉNÉRALE FORMULÉE ET PERSPECTIVES

Les approches française et italienne de caractérisation et de classement des sédiments étudiés ont été menées sur les mêmes sédiments.

La démarche française, construite selon une approche de gestion de déchets, a conduit à identifier les sédiments de Toulon, Centuri et Cagliari comme des déchets non dangereux. Le sédiment de Livourne a quant à lui été jugé dangereux de par son caractère écotoxique (propriété HP14). En l'état, ce dernier n'est pas valorisable selon les conditions de gestion établies en France.

L'application de la procédure française d'Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière à chacun des quatre sédiments a montré qu'aucun des quatre sédiments n'est valorisable en l'état en remblai simplement recouvert du fait de dépassements des valeurs limites d'émission de chlorures et de sulfates. Seul le sédiment de Livourne serait conforme (s'il était non dangereux) aux conditions requises pour une valorisation en sous-couche de chaussée ou d'accotement revêtu.

Néanmoins, cette procédure laisse la possibilité de justifier l'acceptabilité des sédiments en technique routière sur la base d'une étude spécifique nécessitant la réalisation de lysimètres ou de planches d'essai. C'est pourquoi des lysimètres de remblai de sédiment ont été réalisés dont certains sur des sédiments traités.

La démarche italienne, construite selon une approche de gestion des impacts sur le milieu marin, a conduit à classer le sédiment de Cagliari comme pouvant faire l'objet d'un confinement en vasque ou en capping de zone portuaire, et le sédiment de Livourne comme pouvant faire l'objet d'opérations de rechargement de plages ou d'immersion en mer.

Une étude de formulation a été réalisée avec l'objectif d'incorporer dans une formulation de mortier de remblaiement de tranchées et dans une formule de béton courant, des sédiments marins dragués dont certains ont été traités par écrêtage sur des tamis de différentes mailles, en vue d'en évaluer l'acceptabilité environnementale.

L'évaluation environnementale de matériaux de construction intégrant des sédiments en substitution partielle du sable ne fait l'objet d'aucune procédure réglementaire à l'heure actuelle, ni en France ni en Italie. En France, en complément de la procédure d'Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière mentionnée ci-dessus et utilisée dans cette étude pour l'évaluation des résultats des essais lysimétriques, des travaux sont en cours avec le Ministère en charge de l'Environnement pour proposer un guide d'utilisation de matières alternatives (dont les sédiments pourraient logiquement faire partie) en construction. Toutefois les seuils recommandés ne sont pas encore diffusables.

Les essais de formulation ont permis de montrer que les chlorures semblent très concentrés dans les fines particules (< 63 µm) et l'élimination des fines permet de diminuer très nettement la teneur en chlorures. Elle permet également de diminuer la demande en eau et d'obtenir de meilleures performances mécaniques.

L'évaluation géotechnique et mécanique des matériaux formulés a montré que les bétons et mortiers formulés à base de sédiments présentent une résistance à la compression plus faible que celle de matériaux témoins mais que les bétons de sédiments sont adaptés à un usage non structural et que les mortiers formulés à base de sédiments sont également utilisables dans des applications ayant de faibles exigences mécaniques.

L'évaluation environnementale des matériaux en conditions pilote a consisté à réaliser des ouvrages pilotes permettant de simuler le comportement environnemental des sédiments utilisés en matériaux de remblaiement, d'une part et en matériaux de construction de type mortier ou béton d'autre part, après traitement ou non.

Le traitement des sédiments a été réalisé par lavage / hydrocyclonage sous la supervision d'ISPRA sur le site de Livourne d'une part (sédiments Livourne et Cagliari) et sur le site de Toulon d'autre part (sédiments de Toulon par ENVISAN et Centuri par ISPRA) pour en extraire les éléments fins ainsi que les résidus végétaux comme notamment des fibres de posidonies.

Les ouvrages pilotes ont consisté en des bacs lysimétriques construits et exposés à l'eau selon les recommandations de la procédure française d'évaluation de l'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière, et des dalles de matériaux monolithiques (mortier et béton) exposés alternativement à une lame d'eau en surface et à l'air. Le suivi environnemental a consisté à réaliser des analyses physico-chimiques et écotoxicologiques régulières sur les eaux ayant été au contact de ces matériaux.

Les résultats du suivi environnemental des ouvrages pilotes de remblai montrent que les paramètres susceptibles de rendre les ouvrages non conformes aux conditions acceptables d'un point de vue environnemental pour une valorisation en remblai sont les chlorures, les sulfates et, dans le cas du sédiment Cagliari, le molybdène. Pour être conformes aux conditions d'acceptabilité définies en France pour leur valorisation en remblai technique, ces sédiments nécessiteraient un lavage complémentaire des chlorures et des sulfates.

Les conditions spécifiques d'emploi de ces matériaux dans des ouvrages maritimes peuvent être envisagées pour les matériaux présentant un relargage en chlorures supérieur au niveau acceptable pour des ouvrages terrestres. Les caractéristiques environnementales acceptables pour des ouvrages maritimes restent à définir.

Les résultats du suivi environnemental des ouvrages pilotes de matériaux monolithiques (mortier et béton) montrent que les matériaux testés présentent dans l'ensemble un relargage peut différent de celui de matériaux témoins. Néanmoins les paramètres susceptibles de rendre les ouvrages non conformes aux conditions acceptables d'un point de vue environnemental pour une valorisation en matériaux de type béton ou mortier sont les chlorures et, dans le cas du sédiment de Toulon Traité, en particulier dans la formulation mortier, l'arsenic et le molybdène.

Il est à noter toutefois que les niveaux de relargage sont très inférieurs par unité de surface d'ouvrage à ceux obtenus pour les sédiments utilisés seuls en remblais. Pour une utilisation en génie civil il apparaît donc que la quantité de sédiments incorporée est cruciale (les matériaux qui relarguent le plus sont ceux contenant le plus de sédiments (de l'ordre de 40% pour les sédiments traités) ainsi que la surface d'échange puisque les matériaux monolithiques (mortier ou béton) permettent une limitation significative du relargage, compatibles avec les seuils pour les ouvrages routiers (à surface identique d'exposition).

Le choix des sédiments et leur traitement peuvent permettre d'améliorer la qualité environnementale des matériaux. En particulier la texture (fine ou sableuse) et les conditions de préparation des sédiments (lagunage, traitement, exposition à l'eau de pluie) peuvent influencer sur la teneur en chlorures et éventuellement d'autres éléments facilement lixiviables, en particulier lorsqu'ils sont placés dans des conditions de pH basique (arsenic) comme c'est le cas dans les matériaux cimentaires.

Enfin, les conditions spécifiques d'emploi de ces matériaux dans des ouvrages maritimes peuvent être envisagées pour les matériaux présentant un relargage en chlorures supérieur à celui de matériaux témoins. Les caractéristiques environnementales acceptables pour des ouvrages maritimes restent à définir.

Il résulte par conséquent de l'ensemble de ces travaux que l'utilisation de sédiments marins dans des ouvrages (remblais ou matériaux de construction) en milieu connecté avec des eaux marines ou saumâtres nécessite une procédure d'évaluation adaptée, ce type d'application n'étant pas prévu dans le cadre de la procédure française d'évaluation environnementale de l'utilisation de matériaux alternatifs en technique routière.

De plus, la présentation des démarches françaises et italienne d'évaluation environnementale des sédiments a permis de mettre en évidence leur complémentarité et d'envisager des perspectives de développement des procédures françaises et italiennes qui pourraient aboutir, pour les deux pays, à l'élaboration d'une procédure (voire l'emploi d'un outil logiciel) de classement des sédiments intégrant l'ensemble des critères physico-chimiques et écotoxicologiques et permettant de déterminer l'acceptabilité du sédiment dans ses différents scénarios de valorisation et de gestion tels que :

- La valorisation en technique routière continentale
- La valorisation en ouvrages côtiers ou maritimes
- La valorisation en matériaux monolithiques continentaux
- La valorisation en matériaux monolithiques côtiers ou maritimes
- Le rechargement de plages
- L'immersion en zone marine non côtière

La complémentarité des essais écotoxicologiques français et italiens dédiés aux organismes continentaux d'une part et marins d'autre part permet d'envisager ce type de procédure intégrée couvrant l'ensemble des scénarios de gestion, qu'ils soient connectés ou non au milieu marin.

DELIVERABLE T3.1.1 : SINTESI DELLA VALUTAZIONE COMPARATIVA DEI PILOTI DI TRATTAMENTO E VALORIZZAZIONE

V. INTRODUZIONE

Il Deliverable T3.1.1 del progetto INTERREG MARITTIMO SEDITERRA raccoglie i vari risultati sperimentali ottenuti dai partner responsabili delle attività pilota T2.3 : « impianto pilota di trattamento dei sedimenti non immergibili » e T2.4 : "Piloti di trattamento e di valorizzazione dei sedimenti non immergibili ".

L'attività T2.3 riunisce i vari test di trattamento effettuati nel tentativo di migliorare le caratteristiche dei sedimenti dragati studiati e quindi di facilitarne la gestione.

L'attività T2.4 riguarda in particolare i test di valutazione in ingegneria civile e stradale s condotta sui sedimenti del progetto (grezzi e trattati).

Questo deliverable, che presenta le principali conclusioni dei trattamenti e delle prove di recupero condotte durante il progetto, si basa sui seguenti 5 deliverable sperimentali :

- 1. DELIVERABLE T2.3.3 (ISPRA LIVORNO) - TRATTAMENTO DI SEPARAZIONE GRANULOMETRICA E « SOIL WASHING »**
- 2. DELIVERABLE T2.3.4 (DISTAV GENOVA) - TRATTAMENTO DEI SEDIMENTI CON MYCOREMEDIATION**
- 3. DELIVERABLE T2.3.5 (NAVICELLI / PROVINCIA DI PISA) - TRATTAMENTO DEI SEDIMENTI CON DISIDRATAZIONE (DEWATERING)**
- 4. DELIVERABLE T2.3.6 (PROVADEMSE / INSA LYON) - TRATTAMENTO CON CALCINAZIONE DI FRAZIONI DI FIBRE DI POSIDONIA**
- 5. DELIVERABLE T2.4.7 (PROVADEMSE / INSA LYON ; ISPRA LIVORNO ; RAS / CAGLIARI) - SINTESI DI TRATTAMENTI PILOTA E VALORIZZAZIONE**

VI. SEDIMENTI STUDIATI NEL PROGETTO SEDITERRA

I sedimenti utilizzati per i test di trattamento e di valorizzazione sono stati raccolti presso i siti dei partner, e precisamente :

- **Porto di Centuri (Corsica - Francia)**
- **Vasca di stoccaggio di Livorno (Toscana - Italia)**
- **Vasca di stoccaggio di Cagliari (Sardegna - Italia)**
- **Centro di trattamento (CPEM) di La Seyne/sur mer (Var - Francia)**
- **Porto di Genova (Liguria - Italia)**
- **Canale Navicelli a Pisa (Toscana - Italia)**

Va notato che non tutti questi diversi lotti di sedimenti, derivanti da operazioni di dragaggio, non sono stati utilizzati per realizzare tutti gli esperimenti effettuati nel progetto SEDITERRA.

Le prove di trattamento dei sedimenti mediante separazione granulometrica e lavaggio del suolo sono state effettuate presso ISPRA Livorno sui sedimenti provenienti da Livorno e Cagliari, e presso La Seyne/mer sui sedimenti provenienti da Centuri e sui sedimenti prelevati dal CPEM ENVISAN - successivamente denominato sedimento di Tolone (vedi deliverable T2.3.3).

Le prove di trattamento con mycoremediation sono state condotte su tutti i sedimenti disponibili : Genova, Livorno, Cagliari, Centuri, Tolone e il Canale dei Navicelli a Pisa (vedi deliverable T2.3.4).

Le prove di trattamento di disidratazione sono state effettuate sui sedimenti del Canale dei Navicelli a Pisa (vedi deliverable T2.3.5).

I test di calcinazione (pirogassificazione) sono stati effettuati sulle fibre vegetali estratte dal sedimento di Tolone (vedi il deliverable T2.3.6).

Infine, sono state effettuate prove pilota di valorizzazione a La Seyne/mer su sedimenti provenienti da Centuri e Tolone, e a Livorno su sedimenti prelevati da Cagliari e Livorno.

Le caratteristiche fisico-chimiche, ecotossicologiche e geotecniche dei vari sedimenti studiati sono dettagliate nel deliverable T2.1.1 del progetto intitolato "Rapporto di sintesi del confronto incrociato delle caratterizzazioni dei sedimenti". Questo deliverable T2.1.1 presenta i risultati delle caratterizzazioni effettuate secondo le metodologie francese e italiana.

VII. SINTESI DEI TRATTAMENTI (T2.3) EFFETTUATI IN SEDITERRA

7.1 TRATTAMENTO DI SEPARAZIONE GRANULOMETRICA E « SOIL WASHING » – DELIVERABLE T2.3.3 - ISPRA LIVORNO

Presso la sede dell'ISPRA di Livorno è stata allestita un'area sperimentale dedicata all'applicazione del trattamento, sia su scala pilota che di laboratorio.

- PRINCIPI E OBIETTIVI DEL TRATTAMENTO

L'obiettivo principale del processo operato dall'impianto è separare quantitativi sperimentali di sedimento marino nelle diverse frazioni granulometriche che lo costituiscono, in modo da recuperare la componente sabbiosa, cioè la parte di sedimento solitamente meno contaminata e riutilizzabile. Secondo quanto riportato in letteratura, le granulometrie di taglio su cui si opera la separazione vanno dai 63 a 40 μm , dimensioni che rispondono ad esigenze di tipo tecnologico ed economico e ad esigenze relative al contenuto di inquinante che le sabbie possono contenere.

- MATERIALI E METODI DI TRATTAMENTO

La separazione della sabbia può avvenire tramite una classificazione per via umida del sedimento, classificazione che in un mezzo fluido è basata sulla velocità limite di spostamento dei grani in un campo di forze gravitazionali (classificatori a sedimentazione) e/o in un campo di forze centrifughe (idrocloni). La frazione fine del sedimento (più contaminata) viene avviata alla fase di dewatering mentre le acque di processo sono raccolte in appositi contenitori ed idoneamente smaltite da ditte autorizzate.

L'impianto sperimentale è costituito dalle seguenti sezioni/moduli :

1. Modulo per la rimozione di materiali a basso peso specifico, quali posidonia oceanica e Frammenti di plastica
2. Vibrovagliatura
3. Idrocloni
4. Celle di attrizione
5. Classificatore a spirale

Ogni prova sperimentale di separazione meccanica nelle diverse frazioni granulometriche ha visto l'utilizzo di circa 4 mc di sedimento (corrispondenti a circa 6 tonnellate).

L'acqua di processo, preventivamente stoccata in apposite cisterne di raccolta del volume di 2,5m³, segue un ciclo chiuso, senza scarichi durante il processo di trattamento. Difatti l'acqua utilizzata per il lavaggio dei sedimenti è stata raccolta solamente a valle del trattamento in apposito silos a tenuta stagna del medesimo volume di 2,5 m³ e in seguito smaltita come rifiuto liquido secondo le disposizioni della normativa vigente.

Allo scopo di recuperare tutte le frazioni granulometriche maggiormente suscettibili di riutilizzo quali peliti, sabbie e ghiaie, dopo i pretrattamenti di cui ai punti precedenti, il materiale è stato sottoposto al processo di separazione e classificazione meccanica vero e proprio costituito dalle seguenti sezioni :

1. **Tramoggia di carico** da 1 mc, per l'alimentazione del sedimento tal quale (2,40x1,30 m). La tramoggia di carico serve ad alimentare il letto vagliante permettendo la regolarizzazione della portata del materiale in ingresso all'impianto.
2. **Modulo by-passabile** per la rimozione della posidonia/frazioni di plastica disperse nel sedimento da trattare. Qualora il sedimento in ingresso presenti elevate percentuali di materiali vegetali quali fibre e/o frammenti di alghe e piante acquatiche e di frammenti di plastica, viene sottoposto ad una specifica fase di vagliatura, mediante un rotovaglio, finalizzata alla rimozione degli stessi. Tale modulo è posto tra le sezioni di omogeneizzazione (cassone scarrabile) ed il vibrovaglio. Il modulo è costituito da un tamburo ruotante perforato con fori di diametro differenziato che permette il lavaggio e la separazione dal sedimento dei materiali più grossolani.
3. **Vibrovaglio** con tela vagliante di diametro 2 mm (dimensioni : 2,40x1,60 m). Il vibrovaglio separa il materiale grossolano da quello più fine. La separazione avviene attraverso il passaggio del materiale più fine su una griglia vibrante. Il moto di vibrazione della griglia è assicurato da due motori, fissati alla struttura del vaglio, ai quali sono collegate masse eccentriche in rotazione. Il sedimento viene contemporaneamente irrorato con 4 getti d'acqua ad alta pressione per facilitare la separazione tessiturale e consentire la movimentazione di quest'ultimo attraverso le successive sezioni dell'impianto.
4. **Celle di attrizione** (dimensioni : 1,20x0,70 m - vol. 0,125 mc cad.). La torbida (acqua più sedimento) in uscita dal classificatore a spirale, viene convogliata, in condizioni di elevata turbolenza, all'interno di due celle di attrizione del volume di 125 litri che determinano la disgregazione di eventuali agglomerati fangosi ancora presenti.

5. **Unità di idrociclonatura** (dimensioni : 3,50x1,3 m). E' costituita da 2 distinti idrocycloni (di cui uno by-passabile). L'idrociclone opera la separazione tra sabbia fine e frazione limoso-argillosa attraverso l'azione della forza centrifuga. È costituito da un cilindro a fondo conico, dotato di un ugello laterale per l'alimentazione della miscela sedimento/acqua, di una sezione di uscita delle particelle fini trascinate dal fluido, nonché di una sezione di uscita dei materiali a granulometria maggiore posta nel vertice del cono.
6. **Classificatore a spirale** (dimensioni : 2,90 x 1,00 m - diam. 300 mm). Il classificatore a spirale (Foto 5) è impiegato come unità di classificazione. Il principio di funzionamento dipende dalla differente velocità di deposito delle particelle solide per differenza di densità.

Le frazioni uscenti dall'impianto (solide e liquide) sono state campionate miscelando più aliquote raccolte durante il funzionamento dell'impianto ed avviate ad attività analitica, attribuendo ai campioni le seguenti sigle :

TQ = SEDIMENTO TAL QUALE

SG = SABBIE GROSSOLANE

SF = SABBIE FINI

PE = PELITI

Alla fine del processo di trattamento le frazioni di sedimento recuperate, separate per classi granulometriche, sono state analizzate dal punto di vista chimico, fisico e biologico per la valutazione qualitativa dei materiali e l'individuazione delle opzioni di gestione e riutilizzo.

* **Nota** : A seguito delle difficoltà amministrative incontrate in Italia per ottenere l'autorizzazione al trasferimento transfrontaliero dei sedimenti, le prove di separazione granulometrica del sedimento corso di Centuri hanno dovuto essere effettuate sulla piattaforma di Tolone (CPEM ENVISAN) da ISPRA Livorno. A tal fine, l'Impianto Pilota di Livorno ha subito una serie di adattamenti, tra cui l'installazione di un rotovaglio come equipaggiamento aggiuntivo che permette la separazione delle fibre di posidonia dal resto del sedimento. L'elemento rotovaglio dell'impianto pilota ISPRA è stato quindi smontato, trasportato e rimontato a Tolone, al fine di effettuare le operazioni di cernita previste per la separazione delle fibre di posidonia dai sedimenti.

I risultati, purtroppo, non sono stati quelli attesi, probabilmente a causa del fatto che si è riscontrata una scarsa presenza di fibre di Posidonia nel sedimento dragato e, in ogni caso, forse a causa del dragaggio, tali fibre erano completamente disgregate. Inoltre, c'è da considerare che il rotovaglio ha lavorato senza il supporto del resto dell'impianto come avrebbe dovuto essere. Si può concludere dunque, che la sperimentazione può considerarsi andata a buon fine ma con una bassa efficacia di separazione. Sarebbe opportuno riprovare ad effettuare il trattamento con un sedimento più ricco di fibre di posidonia e meno disgregate.

- **PRINCIPALI CONCLUSIONI FORMULATE DA ISPRA LIVORNO**

Il soil washing sfrutta la tendenza delle sostanze inquinanti a concentrarsi maggiormente nella frazione fine, a causa della sua maggiore superficie specifica, quindi maggiormente interessata ai fenomeni di adsorbimento riguardanti sia la sostanza organica, sia i contaminanti stessi.

Rispetto alla matrice sabbiosa, costituita principalmente da silice e carbonati, la frazione limoargillosa è caratterizzata tendenzialmente da minerali argillosi, ossidi e idrossidi di ferro e alluminio e materiale organico, tutte specie chimiche molto attive nei processi di scambio ionico e complessazione.

Dal processo di soil washing si è ottenuta una sabbia caratterizzata da una buona qualità ambientale, idonea per le attività di riutilizzo indicate dagli altri partner del progetto SEDITERRA, e una frazione fine quale principale sede di destinazione nella migrazione dei contaminanti.

L'esecuzione di test di cessione condotti sulle acque di processo e sull'eluato dei sedimenti è stata ritenuta utile per analizzare la mobilità degli inquinanti in matrici complesse come i sedimenti marini, al fine di capire come possa variare il rilascio di questi elementi nell'ambiente marino-costiero e nel riutilizzo in ambito terrestre.

Oltre che per la valutazione qualitativa dei sedimenti, tali test sono stati utili anche per valutare la capacità di trasferimento dei contaminanti dal sedimento alle acque di processo, simulando i potenziali impatti che le differenti opzioni di gestione e riutilizzo (es. Sottofondi stradali, ripascimenti arenili, materiali edili, etc...) potrebbero avere sull'ambiente.

Oltre alla concentrazione di partenza degli elementi chimici indagati nei sedimenti e alla grande variabilità ambientale del sito di prelievo dei sedimenti trattati, alcuni fattori chimico-fisici, quali pH, potenziale Redox, solubilità, temperatura, concentrazioni di Ossigeno e Carbonio organico, interagendo tra loro potrebbero influire sui processi di mobilità degli inquinanti e creare alcune difficoltà nella valutazione qualitativa dei diversi parametri indagati e quindi del processo di trattamento utilizzato. Tali fattori interferenti potrebbero essere oggetto di ulteriore approfondimento in successive sperimentazioni.

La “relazione conclusiva sulle attività di monitoraggio a carico di arpat” si trovano le considerazioni espresse da ARPAT che, sintetizzando, denotano nelle acque di processo “una generale tendenza ad una migrazione degli inquinanti monitorati, con aumento della loro concentrazione” e nelle frazioni solide recuperate “un generale aumento della concentrazione degli inquinanti monitorati nelle frazioni pelitiche rispetto alle frazioni sabbiose”.

Il confronto con i valori chimici di riferimento per aree limitrofe con bassa contaminazione e con frazione pelitica paragonabile, hanno evidenziato una situazione di partenza (TQ) non particolarmente compromessa.

Applicando il processo di separazione meccanica si evidenzia una concentrazione dei metalli nelle frazioni più fini (PE) a favore delle sabbie grossolane (SG), che risultano fondamentalmente non più contaminate e quindi riutilizzabili : i valori riscontrati risultano generalmente inferiori a L1, ad eccezione del cadmio per il quale peraltro non è evidente un’associabilità alla composizione granulometrica.

Al fine del riutilizzo dei materiali recuperati, l’attenzione va comunque posta ai processi di trasferimento e solubilizzazione di alcuni elementi chimici, poiché si è registrato nelle prove condotte l’aumento di concentrazione di alcuni metalli nelle acque di processo, rispetto a quelle in entrata, a testimonianza del passaggio di alcuni metalli dal sedimento alle acque.

La valutazione delle concentrazioni dei composti organostannici evidenziano valori diversi tra Livorno e Cagliari. In particolare per Livorno : partendo da livelli superiori a L1, nelle peliti si arriva a valori maggiori di L2, ottenendo comunque frazioni sabbiose SG e SF riutilizzabili, poiché si ha un abbattimento della contaminazione.

Per quanto riguarda la contaminazione degli idrocarburi, si pone l’attenzione solamente sulle concentrazioni degli idrocarburi pesanti (C>12) che risultano superiori al valore “L2” in tutte le frazioni ma comunque con valori trascurabili nelle sabbie grossolane. Non vi è evidenza di trasferimento dal sedimento alle acque di processo.

Per gli IPA di Cagliari, nonostante nelle acque di processo non si rilevino particolari aumenti della concentrazione dei cogeneri risultati a concentrazioni più elevate ma essendo quest’ultimi sostanze pericolose prioritarie, particolare attenzione deve esser data alla gestione delle frazioni sabbiose, nonostante l’ottima efficienza di abbattimento da parte dell’impianto pilota riguardo ad altri contaminanti.

Gli idrocarburi pesanti non sono indice di preoccupazione, anche derivante dal fatto che essendo una contaminazione aspecifica andrebbe indagato, con ulteriori analisi, a quali composti sia veramente imputabile l’elevato contenuto.

Dalle indagini relative al contenuto di PCB, si rileva una concentrazione degli stessi nelle frazioni pelitiche e rilascio trascurabile dal TQ alla matrice acquosa.

L'impianto pilota ha svolto in maniera efficiente e precisa la propria funzione di separazione meccanica dei sedimenti nelle diverse classi granulometriche di cui si compongono. I risultati ottenuti indicano che i sedimenti portuali trattati attraverso l'impianto pilota possono fornire materiali idonei e di buona qualità chimico-fisica : sono quindi possibili interventi di riutilizzo delle frazioni sabbiose SG recuperate.

- **SINTESI GENERALE DI ISPRA LIVORNO**

L'impianto pilota per il trattamento sperimentale dei sedimenti ha svolto in maniera efficiente e precisa la propria funzione di separazione meccanica dei sedimenti nelle diverse classi granulometriche di cui si compongono.

I risultati ottenuti indicano che i sedimenti portuali trattati attraverso l'impianto pilota possono fornire materiali idonei e di buona qualità chimico-fisica: sono quindi possibili interventi di riutilizzo delle frazioni sabbiose grossolane [SG] recuperate (es. sottofondi stradali, ripascimenti arenili, materiali edili, etc...).

Dal processo di soil washing si è ottenuta una sabbia caratterizzata da una buona qualità ambientale, idonea per le attività di riutilizzo e una frazione fine quale principale sede di destinazione nella migrazione dei contaminanti.

Con un materiale di partenza tale quale [TQ] di buona qualità ambientale, anche la frazione sabbiosa fine [SF] potrebbe essere riutilizzata ; la residua frazione pelitica [PE] rappresenta un esiguo volume di sedimento da smaltire rispetto alla totalità del sedimento tal quale, con benefici economici e ambientali.

Tramite l'esecuzione dei test di cessione è stata valutata, inoltre, la capacità di trasferimento dei contaminanti dal sedimento alle acque di processo, simulando i potenziali impatti che le differenti opzioni di gestione e riutilizzo potrebbero avere sull'ambiente.

E' apparso evidente che sia la concentrazione di partenza degli elementi chimici indagati nei sedimenti, sia la grande variabilità ambientale del sito di prelievo dei sedimenti trattati, anche altri fattori chimico-fisici, quali pH, potenziale Redox, solubilità, temperatura, concentrazioni di Ossigeno e Carbonio organico, interagendo tra loro, influiscono sui processi di mobilità degli inquinanti, apportando ulteriori difficoltà nella valutazione qualitativa dei diversi parametri indagati nonché del processo di trattamento utilizzato. Lo studio di tali fattori interferenti potrebbero essere oggetto di ulteriore approfondimento in successive sperimentazioni, specialmente se applicate a sedimenti marini con livelli di contaminazione di partenza più elevati rispetto a quelli testati all'interno di questo progetto.

Ulteriori esperimenti simili a quelli condotti nell'ambito del progetto SEDITERRA sono necessari e auspicabili al fine di implementare e promuovere il recupero e l'utilizzo dei materiali trattati in opere di riutilizzo benefico.

7.2 TRATTAMENTO DEI SEDIMENTI CON MYCOREMEDIATION - DELIVERABLE T2.3.4 – DISTAV GENOVA

- PRINCIPI E OBIETTIVI DEL TRATTAMENTO

Nell’ottica di migliorare le caratteristiche chimiche dei sedimenti dragati dai porti per un loro futuro riutilizzo, il DISTAV ((Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita)) dell’Università di Genova ha proposto l’attività pilota di trattamento dei sedimenti tramite mycoremediation. La mycoremediation (attraverso l'uso di micomiceti) fa parte dei trattamenti noti come bioremediation, una alternativa “verde” ai tradizionali metodi di trattamento degli inquinanti presenti nei sedimenti e nelle acque.

Le strategie di bioremediation consistono nella stimolazione e nello sfruttamento di microorganismi componenti dei cicli biogeochimici naturali. Questi microorganismi sono in grado di degradare gli inquinanti organici e bio-immobilizzare quelli inorganici (metalli) attraverso processi biologici che realizzano naturalmente (secrezione di enzimi e acidi organici da parte di microrganismi che possono interagire con gli inquinanti).

- MATERIALI E METODI DI TRATTAMENTO

L’attività di mycoremediation del DISTAV è stata portata a termine sui sedimenti prelevati da 6 aree differenti : porto di Genova, cassa di colmata del porto di Livorno, Canale dei Navicelli di Pisa, cassa di colmata del porto di Cagliari, porto di Centuri e porto di Tolone. Nello specifico, per ciascun sito sono stati campionati 30 kg di sedimento successivamente sottoposti al processo di mycoremediation.

Inizialmente, l’attività ha previsto la caratterizzazione della flora fungina autoctona, presente all’interno di ciascun sedimento. In base alle informazioni contenute in bibliografia, sono state selezionate le specie di microfunghi, individuate all’interno dei sedimenti di ciascuna area, più efficienti nella degradazione dei composti organici e nell’accumulo dei metalli. Infine, le specie indigene selezionate in ciascun sito sono state sfruttate per valutare la capacità di questi microrganismi di diminuire o eliminare gli inquinanti presenti nei sedimenti da cui sono state estratte.

La caratterizzazione della flora fungina è stata svolta al fine di utilizzare i microfunghi naturalmente presenti in ciascuna area senza introdurre nuove specie, in vista della possibile applicazione del protocollo di mycoremediation direttamente in ambiente.

Nello specifico, i sedimenti prelevati dalle casse di colmata (casi di Livorno e Cagliari) sono stati esposti alle condizioni atmosferiche per lunghi periodi di tempo, i sedimenti prelevati nel Canale dei Navicelli di Pisa sono salmastri e i sedimenti del porto di Centuri sono caratterizzati dalla presenza di Posidonia Oceanica.

Ogni campione è stato dapprima omogeneizzato e, successivamente, sono state prelevate le seguenti aliquote di sedimento :

- 5 g per la caratterizzazione micologica del sedimento e quindi per la selezione dei microfunghi per l'attività di mycoremediation
- 215 g per la caratterizzazione fisica del sedimento
- 1.5 kg per la caratterizzazione chimica del sedimento
- 25 kg per svolgere l'attività di mycoremediation (15 Kg per quanto riguarda il porto di Centuri)

I ceppi fungini sono stati isolati dai sedimenti mediante il metodo delle diluizioni in Piastra. Il campione è stato diluito in acqua sterile in proporzione 1:10 (w/v). In seguito ad agitazione meccanica per 10-20 min, la soluzione ottenuta è stata a sua volta diluita tramite un fattore 10. In ciascuna piastra Petri è stato inoculato 1 mL di sospensione. Infine, le piastre sono state incubate per una settimana al buio a una temperatura di 24 °C. Per favorire la crescita fungina sono stati utilizzati dei terreni di coltura specifici, addizionati con antibiotici in modo da limitare la crescita di ceppi batterici. Settimanalmente sono state contate le colonie fungine e i morfotipi sono stati isolati in colture pure in provetta. A questo punto, mediante approccio polibacico, si è proceduto all'identificazione morfologica e molecolare dei ceppi isolati.

Una volta identificate correttamente tutte le specie trovate, si sono selezionate, in base alla frequenza di isolamento e alle conoscenze bibliografiche, quelle più idonee ai saggi di mycoremediation per ciascun sedimento, sia per quanto riguarda i contaminanti organici, sia per quelli inorganici. Individuati i pool di specie da impiegare, sono stati realizzati inoculi liquidi di terreno colturale impoverito (a ridotto contenuto di sostanze nutritive), al fine di favorire la crescita fungina quanto basta perché i funghi stessi nel sedimento fossero attivati e stimolati a degradare e/o accumulare altre sostanze. Per ciascuna vaschetta si è realizzato un inoculo di 0.5 L. Quest'ultimo, una volta preparato e inoculato con i funghi selezionati, è stato posto in agitazione per 4 giorni, prima di essere addizionato al sedimento stesso.

L'aliquota di sedimento per svolgere l'attività di mycoremediation, pari a 25 kg (15 kg per il porto di Centuri), è stata a sua volta suddivisa in 5 aliquote da 5 kg ciascuna. Queste aliquote sono state riposte all'interno di 5 vaschette in plastica con dimensioni 50x34x10 cm (3 aliquote da 5 kg ciascuna riposte in 3 vaschette in plastica per il porto di Centuri).

I sedimenti contenuti nelle vaschette 1 e 2 sono stati trattati con i microfunghi per saggiare l'efficacia dell'azione di questi organismi sui metalli contenuti nel sedimento. L'attività ha previsto l'utilizzo di un telo di feltro che è stato fatto aderire inumidito alla superficie del sedimento e in quanto permette di separare meccanicamente ma non chimicamente i microfunghi dal sedimento. I microfunghi selezionati tra quelli che presentavano le caratteristiche migliori per l'accumulo dei metalli sono stati inoculati sul telo. I sedimenti presenti nelle vaschette 1 e 2 sono stati analizzati anche relativamente agli inquinanti organici per avere un quadro più completo della situazione nonostante i microfunghi siano stati selezionati tra quelli più adatti ad accumulare i metalli.

I sedimenti nelle vaschette 3 e 4 sono stati trattati con i microfunghi per testare l'efficacia della loro azione sugli inquinanti organici. I microfunghi, selezionati per la loro capacità di agire efficacemente su questi composti sono stati inoculati nel sedimento.

Il sedimento inserito nella vaschetta 5 ha rappresentato il campione di controllo. Infatti, non è stato trattato con i microfunghi ed è stato mantenuto alle stesse condizioni dei sedimenti contenuti nelle altre vaschette in termini di temperatura, umidità e luce (condizioni al contorno) per l'intero periodo di attività.

Una volta terminata la preparazione delle vaschette, i sedimenti provenienti dalle 6 aree sono stati trattati diversamente durante l'attività e, nello specifico, come riportato di seguito.

- Sedimenti del porto di Genova, Livorno e Pisa : il sedimento contenuto in ciascuna vaschetta è stato inizialmente irrorato con acqua, allo scopo di mantenere un'umidità del sedimento circa del 60% necessaria alle attività vitali dei funghi, in quantità pari a 50 mL. Questi sedimenti sono stati inumiditi quotidianamente utilizzando la stessa quantità di acqua per tutta la durata dell'attività. Nei periodi di assenza (> di 5 giorni) dell'operatore incaricato di svolgere questa mansione, i sedimenti sono stati irrorati abbondantemente con 200 ml di acqua e le vaschette sono state avvolte con un telo nero in plastica bucato in modo tale da mantenere l'umidità e, contemporaneamente, permettere l'aerazione del sedimento.
- Sedimenti del porto di Cagliari, Centuri e Tolone : il sedimento contenuto in ciascuna vaschetta è stato inizialmente inumidito con acqua, necessaria alle attività vitali dei funghi, in quantità pari a 2.5 L. Le vaschette sono state subito coperte con teli neri di plastica bucati in modo tale da mantenere l'umidità e, contemporaneamente, permettere l'aerazione del sedimento ; questi teli sono stati mantenuti per tutta la durata dell'attività. Pertanto, dopo l'aggiunta di acqua iniziale (2.5 L) questi sedimenti non hanno più avuto la necessità di essere irrorati con acqua, mantenendo l'umidità necessaria alla crescita dei funghi per tutta la durata della sperimentazione.

Le vaschette con i sedimenti sono state mantenute in laboratorio, a temperatura ambiente per tutta la durata dell'attività (60 giorni).

Nell'arco di questo periodo, è stato seguito un protocollo di campionamento comune a tutti i sedimenti saggiati che ha previsto analisi chimiche del sedimento, del telo di feltro inoculato con i funghi e del telo senza funghi. Inoltre, sono state svolte analisi del contenuto organico e inorganico del sedimento proveniente da Centuri al fine di valutare l'azione dei microfunghi sulla degradazione della *Posidonia Oceanica* che caratterizza questi sedimenti.

In quattro tempi consecutivi (Tempo 0 : al momento dell'inoculo ; Tempo 1 :: dopo 15 gg dall'inoculo; Tempo 2 :: dopo 30 gg dall'inoculo ;; Tempo 3: dopo 60 giorni dall'inoculo) sono state effettuate le analisi chimiche sui sedimenti e sul telo per valutare l'efficacia del trattamento. Le analisi chimiche sui metalli nel sedimento sono state fatte sia nei primi centimetri di sedimento a stretto contatto con il telo, sia sullo strato di sedimento sottostante.

- PRINCIPALI RISULTATI E PROSPETTIVE FORMULATO DI DISTAV GENOVA

I saggi di mycoremediation hanno reso evidente come il trattamento fungino sia stato più efficace nell'accumulo dei metalli pesanti, rispetto che nella degradazione dei contaminanti organici. Uno dei principali limiti delle sperimentazioni effettuate è stato quello di lavorare con tassi di contaminazione piuttosto bassi : sia i metalli sia i contaminanti organici erano spesso sotto i livelli di tolleranza normati. La contaminazione su cui effettivamente si è lavorato può definirsi, infatti, residua. Tuttavia, almeno per quanto riguarda i metalli, i risultati sono stati molto incoraggianti e promettenti.

Nella maggior parte dei sedimenti si è avuta una riduzione dei contaminanti e un incremento della concentrazione metallica sulle membrane di feltro inoculate con funghi autoctoni. Trattandosi di organismi viventi, è emerso un certo grado di selettività nell'accumulo metallico : infatti, le specie fungine sono capaci di assorbire meglio determinati metalli rispetto ad altri, e non tutte hanno evoluto la capacità di bioaccumulare. Esistono, infatti, i cosiddetti metalli con funzione biologica che i funghi sanno assorbire poiché decisivi per garantire il buon funzionamento cellulare (es. Fe e Zn), mentre esistono poi i metalli indifferenti che soltanto alcune specie sono capaci di chelare e assorbire grazie all'evoluzione di meccanismi specifici e anche grazie all'adattamento e/o all'esposizione a questi metalli stessi (es. Cr, As, Pb, Hg).

Seguendo la strategia di valutazione ponderata della qualità e della pericolosità dei sedimenti riportata nel D.M. Italiano 173/2016, è stata fatta una valutazione quantitativa dell'efficacia della mycoremediation sui sedimenti trattati.

Considerando il valore limite L1 (il livello chimico di riferimento più basso), prima del trattamento (Tempo 0) i sedimenti di Genova avevano un'alta contaminazione di metalli (rosso), Pisa e Cagliari una contaminazione (HQC) molto alta (nero). Considerando L2 (il più alto livello chimico di riferimento), i sedimenti di Genova avevano una contaminazione assente (bianco), Cagliari una contaminazione media (giallo), e Pisa una contaminazione molto elevata (nero).

Dopo il trattamento (al Tempo 3), c'è stato un miglioramento generale dei sedimenti, ma solo per Genova il miglioramento è corrisposto ad una riduzione della classe di contaminazione per L1 (da alta a media contaminazione).

Per quanto riguarda i sedimenti di Livorno, Centuri e Tolone, non è stato possibile calcolare la pericolosità dei sedimenti in quanto le concentrazioni dei metalli (tra quelli considerati dalla normativa) che superavano i limiti di deteazione al Tempo 0 erano troppo pochi e avrebbero dato risultati non significativi. Per quanto riguarda gli IPA, tutti i sedimenti riportavano una contaminazione trascurabile iniziale e quindi la valutazione non è stata applicata.

La valutazione della qualità ha mostrato quindi un miglioramento dei sedimenti dopo la mycoremediation, anche se non tale da abbassare la classe di rischio dei sedimenti a una condizione accettabile per un eventuale riutilizzo.

Ciò potrebbe significare che per alti livelli di contaminazione dei metalli, come nel caso dei sedimenti di Pisa, l'effetto positivo del mycoremediation o il tempo del trattamento non sono stati sufficienti per ottenere un possibile riutilizzo dei sedimenti.

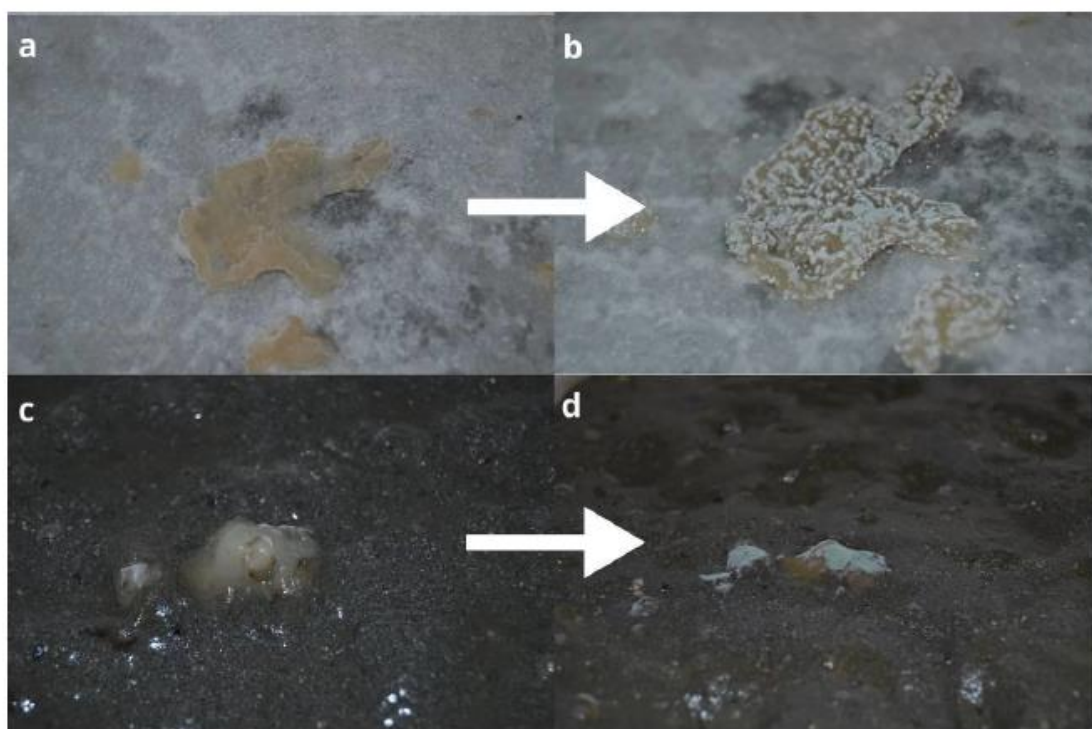
Ciò potrebbe essere dovuto a fattori ambientali esterni o a caratteristiche fisiche dei sedimenti (granulometria, contenuto di sostanza organica, pH, temperatura ambientale, umidità). Pertanto, sarà necessario approfondire questo aspetto nel processo di trattamento e trovare un possibile miglioramento.

La selezione dei ceppi fungini è risultata determinante per l'impiego dei funghi autoctoni, perché essi sono sicuramente i più adattati a vivere e tollerare l'ambiente contaminato oggetto di studio. D'altro canto, esiste la possibilità che i funghi assumano come strategia di sopravvivenza, nei confronti di un determinato contaminante, l'esclusione. Questo fa sì che ciascuna specie sia abile e molto efficiente nell'accumulo di determinati metalli, mentre ne escluda completamente altri.

I saggi di mycoremediation effettuati hanno permesso la caratterizzazione micologica di un particolare ambiente estremo, quello dei sedimenti dragati, di cui ad oggi si hanno ben poche conoscenze. Inoltre, il lavoro ha permesso la selezione di ceppi fungini marini autoctoni impiegabili in processi di biorisanamento dei sedimenti dragati contaminati grazie alle loro ottime capacità di biodegradazione di sostanze organiche tossiche e, in particolare, di bioconcentrazione di metalli pesanti.

I bassi valori di contaminazione riscontrati in quasi tutti i siti hanno messo in evidenza come i funghi siano potenzialmente impiegabili anche in trattamenti di contaminazioni residue soprattutto metalliche. Lo studio, infatti, di una membrana assorbente porosa su cui il micelio fungino possa facilmente attecchire e crescere rimanendo chimicamente a contatto col substrato sottostante accumulando i metalli anche residuali, rappresenta un interessante e importante obiettivo che potrebbe diminuire notevolmente i costi di smaltimento e stoccaggio dei sedimenti dragati fuori dal Porto, oltre che aggiungere valore e trasformare questi sedimenti in una risorsa in modo del tutto naturale e sostenibile direttamente in situ.

Tale progetto deve ancora essere perfezionato e implementato per favorire il suo utilizzo su ampia scala e direttamente in situ, trasferendo quindi l'attività a una scala reale e non di laboratorio, adattandolo di volta in volta ad ogni tipologia di sedimento da trattare e cercando di renderlo applicabile con qualunque condizione climatica (anche sfavorevole alla sopravvivenza dei funghi).



Croissance des microchampignons pendant les quatre premiers jours d'activité de mycoremédiation sur les sédiments du port de Gênes / Crescita dei microfunghi durante i primi quattro giorni di attività di mycoremediation sui sedimenti del porto di Genova

7.3 TRATTAMENTO DEI SEDIMENTI CON DISIDRATAZIONE (DEWATERING) - DELIVERABLE T2.3.5 – NAVICELLI / PROVINCIA DI PISA

Questo deliverable descrive l'attività pilota realizzata da Navicelli di Pisa, un terzo contrattuale dalla Provincia di Pisa nell'ambito del progetto SEDITERRA.

La Navicelli di Pisa S.r.l. è una società pubblica costituita al fine di gestire il Canale dei Navicelli (che collega Pisa al porto di Livorno) e le aree demaniali limitrofe. Provvede al mantenimento dell'efficienza e dell'utilizzo del canale, in particolare per quanto riguarda gli interventi di dragaggio e l'apertura dei ponti per il passaggio delle imbarcazioni.

- PRINCIPI E OBIETTIVI DEL TRATTAMENTO

L'attività pilota è consistita nell'effettuare il dragaggio idraulico (mediante pompaggio) di circa 500 m³ di sedimenti, prelevati dal fondo del canale, e di testare l'efficienza e verificare l'impatto ambientale della loro disidratazione (« Dewatering ») attraverso l'utilizzo di geotessili drenanti (« geotubi »). Il monitoraggio ambientale è stato effettuato effettuando una caratterizzazione fisico-chimica delle acque di scarico.

- MATERIALI E METODI DI TRATTAMENTO

I sedimenti sono stati dragati con mezzi idraulici e pompati in 2 geotessili drenanti (dimensioni di ogni geotessile : 4,0 m x 30,0 m x Hr < 1,7 m). La prova è stata effettuata installando l'impianto lungo la riva destra del Canale Navicelli nelle zone di collegamento idraulico del canale fluviale, nel tratto tra l'Incile e la Darsena Pisana.

La posa in opera del sistema è stata preceduta da un'accurata sistemazione morfologica della zona con lo scopo di favorire il corretto drenaggio delle acque di percolazione e al fine di rendere agevole l'accesso all'area di intervento.

I geotessili sono prodotti con caratteristiche di resistenza meccanica adattate al contenimento finale del materiale pompato. Permettono di confinare all'interno la parte solida del materiale dragato, facilitando al contempo il drenaggio dell'acqua presente.

I tubi in geotessile sono dotati di specifici boccaporti di riempimento (diametro minimo DN100) posti ad una distanza di circa 10 m l'uno dall'altro per consentirne il riempimento mediante l'impiego di idonei apparati di pompaggio.

I tubi sono dotati di specifici bocchettoni per consentirne il riempimento con una miscela acqua/sedimento, contenente un massimo di sedimenti del 15% V/V.

Il dragaggio idraulico è stato eseguito con pompa aspirante e refluyente tipo DragFlow (Vedi documentazione fotografica che segue), in tubazione di lunghezza fino 100 m, con portata di miscela fango/acqua compresa nell'intervallo 150-300 mc/h, idonea allo scavo di materiale di tipo limosoargilloso. La portata oraria di caricamento della miscela dragata all'interno di ogni singolo tubolare drenante previsto, è stata di circa un quarto del volume massimo di contenimento dello stesso, al fine di garantire un adeguato tempo di rilascio del surnatante separatosi all'interno.

Il monitoraggio ambientale è stato impostato effettuando un controllo fisico-chimico giornaliero delle acque scaricate durante tutto il processo di pompaggio e nei giorni successivi alla fine dei lavori. I sedimenti sono stati caratterizzati meno frequentemente nelle fasi più significative del processo di disidratazione (inizio, medio termine e fine del trattamento).

Durante la fase di pompaggio sono stati prelevati due campioni d'acqua al giorno per l'analisi : all'inizio e alla fine delle attività. Il pompaggio nei geotessili drenanti è durato 3 giorni. Dopo il riempimento (cioè la fine del pompaggio), è stato prelevato un campione d'acqua giornaliero per 4 giorni consecutivi. Sono stati inoltre prelevati altri due campioni d'acqua per il monitoraggio 7 e 10 giorni dopo la fine del monitoraggio giornaliero.

L'acqua (1000 mL di campioni) è stata prelevata in diversi punti del geotubo per ottenere un campione medio composito rappresentativo di tutta l'acqua espulsa.

I risultati analitici ottenuti si riferiscono ai limiti normativi di cui alla Tabella 2 dell'Allegato 5, Parte IV del DL 152/2006 per le acque reflue.

- **SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI DA NAVICELLI**

Dall'esame dei risultati analitici emerge che le concentrazioni massime misurate nelle acque emesse e rilasciate nell'ambiente circostante (acque di canale) sono superiori ai limiti stabiliti dalla normativa vigente per le acque reflue (Concentrazioni Soglie di Contaminazione (CSC)), per quanto riguarda i solfati (da 7 a 8 volte la soglia), il nichel (1.8x), l'arsenico (3 à 30x), il piombo (2x) e il rame (2.3x).

Questi superamenti in acqua non sono strettamente correlati ai livelli presenti nei sedimenti, che sono ben al di sotto delle soglie consentite dalla legislazione (Tab. 1 dell'All. 5, Parte IV del D. Lgs. 152/2006).

Infine, al termine del monitoraggio, ossia 10 giorni dopo la fine del pompaggio, si osserva che, ad eccezione del contenuto di solfati (a causa della natura salmastra dei sedimenti), i valori misurati nelle acque sudate sono tutti ben al di sotto delle soglie legislative per le acque reflue.

7.4 TRATTAMENTO CON CALCINAZIONE DI FRAZIONI DI FIBRE DI POSIDONIA - DELIVERABLE T2.3.6 – PROVADEMSE / INSA LYON

Questo deliverable T2.3.6 sintetizza i risultati ottenuti da PROVADEMSE - principale fornitore di servizi dell'INSA di Lione nel progetto SEDITERRA - durante lo studio di fattibilità della preparazione e valorizzazione mediante gassificazione dei residui vegetali provenienti dal trattamento dei sedimenti marini a Tolone.

- PRINCIPI E OBIETTIVI DEL TRATTAMENTO

Le operazioni di dragaggio dei sedimenti marini comportano, in alcuni casi, il recupero di quantità significative di biomassa marina, come i residui di posidonia. Le operazioni di trattamento dei sedimenti dragati consentono di separare una frazione prevalentemente minerale, che può essere recuperata, e di produrre residui vegetali che, nonostante la presenza di sabbia, possono essere recuperati anche energeticamente evitando lo smaltimento in discarica.

Lo studio effettuato si occupa della possibilità di recupero energetico da questi residui di biomassa marina. A tal fine è stato effettuato un esperimento pilota di trattamento termico delle fibre e delle grano dei residui vegetali per determinare il loro potenziale di recupero energetico e per garantirne la valutazione.

- MATERIALI E METODI DI TRATTAMENTO

Produzione dei residui di biomasse marine

I sedimenti provenienti da Tolone e inoltrati al CPEM ENVISAN di La Seyne-sur-Mer sono stati sottoposti da parte di ENVISAN a un trattamento in due fasi, che ha consentito di separare la frazione minerale dei sedimenti, indirizzata verso altri canali di recupero, da quella organica, destinata alla valorizzazione energetica.

La prima fase consiste nel collocare i sedimenti all'interno di un serbatoio d'acqua, munito di piani inclinati e di una coclea che permette di separare i residui organici più grossolani in base alla densità. La seconda parte del trattamento viene eseguita sui residui ottenuti e consiste nella separazione sott'acqua dei residui vegetali con l'ausilio di due setacci a tamburo.

I residui organici oggetto del presente studio sono stati ricavati grazie a questa seconda fase.

Preparazione dei residui di biomasse marine

Le parti di residui vegetali che possono essere destinate alla valorizzazione energetica sono quella fibrosa e quella granulare non sabbiosa. La tecnologia utilizzata nel trattamento termico è la pirogassificazione in letto fisso, per la quale i rifiuti sotto forma di fibre e granuli non sono adatti, a causa della loro scarsa densità. Risulta dunque indispensabile la preparazione dei rifiuti (setacciatura, separazione e pellettizzazione), affinché questi rispondano alle caratteristiche fisiche necessarie per il trattamento in letto fisso.

Per preparare i campioni di residui di biomasse marine ai fini della gassificazione, abbiamo prima stabilito il tasso di umidità e studiato la cinetica di essiccazione dei campioni, ne abbiamo determinato la composizione in base alla loro natura (fibre e granuli) e la rispettiva distribuzione granulometrica. Abbiamo inoltre studiato le loro caratteristiche fisico-chimiche e ricondizionato i campioni a un tasso d'umidità ottimale, prima della loro pellettizzazione.

I residui di biomassa marina sono stati dunque preparati, dopo l'ottimizzazione del loro valore energetico mediante essiccazione e l'estrazione mediante setacciamento della frazione superiore a 500 μm . Questa rappresenta più del 90% della massa secca di residui vegetali, il cui contenuto di cenere (21%) è ridotto rispetto al campione grezzo e il cui valore energetico (>17 MJ/kg) è superiore a quello del campione grezzo e simile a quello di combustibili come il legno. Quanto alla frazione inferiore a 500 μm , essenzialmente sabbiosa, potrebbe essere oggetto di una valorizzazione ancora da studiare. Dopo aver eliminato la frazione inferiore a 500 μm , i campioni sono stati ricostituiti in proporzione a ciascuna frazione (fibre 25% e granuli: 75%) e umidificati al 30%, prima di essere ridotti in pellets. I pellets sono stati poi essiccati all'aria aperta per raggiungere un'umidità residua inferiore al 20%, prima della gassificazione.

Dispositivo sperimentale di gassificazione

Il dispositivo sperimentale di gassificazione utilizzato per le prove di fattibilità della valorizzazione energetica è un reattore di pirogassificazione a letto fisso equicorrente, della potenza di 100 kW. Il reattore è stato specialmente predisposto per le esigenze di PROVADEMSE, per poterlo adattare al trattamento di determinati rifiuti e di disporre dell'insieme dei dati necessari per la verifica del comportamento della materia nel reattore, la valutazione del rendimento della gassificazione e la determinazione del bilancio di materia ed energia dell'operazione. Il reattore è completato da uno scambiatore per il raffreddamento del syngas prodotto, da una caldaia destinata alla combustione del syngas raffreddato e da un aerotermostato per la dissipazione delle calorie prodotte dalla caldaia.

Monitoraggio della gassificazione

Il funzionamento del reattore di gassificazione è stato monitorato attraverso la misurazione dei seguenti parametri:

- flusso d'aria iniettato nelle varie zone del reattore (essiccazione o pirolisi, ossidazione, riduzione)
- temperature di zone diverse, compreso il gas prodotto (syngas), dalla sua fuoriuscita dal reattore fino all'ingresso in caldaia al momento del raffreddamento
- pressione e perdita di carico in diversi punti del reattore
- combustione del syngas, andamento dei flussi di syngas, dell'aria di combustione e dei fumi
- recupero del calore e determinazione della potenza del syngas

Caratterizzazione degli ingressi e delle uscite di gassificazione

La caratterizzazione dei prodotti in entrata (pellet) e dei diversi prodotti risultanti dal processo, residui solidi, syngas e fumo, sono stati effettuati mediante analisi fisico-chimiche, analisi elementari e analisi della composizione degli inorganici.

L'analisi del syngas è stata condotta attraverso il prelievo dei catrami (*Tar Protocol*), la cui analisi specifica è stata affidata al CIRAD di Montpellier, e la misurazione costante dei gas permanenti in fase gassosa, mediante micro gascromatografo.

PRINCIPALI RISULTATI OTTENUTO

Caratteristiche dei pellets di biomasse marine

I pellets di biomasse marine presentano un contenuto di cloro superiore alla soglia stabilita per la valorizzazione energetica in caldaia a biomassa. La loro composizione (analisi degli elementi e del contenuto di metalli) è, invece, compatibile con la loro valorizzazione energetica come CSS (combustibile solido secondario). Tali pellets possono dunque essere recuperati negli impianti elencati nella lista ICPE 2971, come per esempio gli impianti di pirogassificazione.

Considerato l'elevato contenuto di cenere di questi residui di biomasse marine, nonostante l'eliminazione della frazione inferiore a 500µm, si è reso necessario uno studio del comportamento alla fusione delle ceneri che ha dimostrato che la gassificazione di tali residui vegetali può presentare il rischio di produrre quantità importanti di ceneri fuse, che potrebbero solidificarsi per raffreddamento, con conseguenze gravi sul deflusso del materiale nei reattori o nei sistemi d'evacuazione delle ceneri. Questo aspetto costituisce un limite operativo da verificare ed eventualmente risolvere nell'ambito dello sviluppo industriale di questa soluzione di valorizzazione energetica dei residui di biomasse marine.

Risultati degli esperimenti di gassificazione

Questi esperimenti hanno permesso di verificare il comportamento meccanico del letto di gassificazione (deflusso, perdita di carico, ristagno, curvatura, etc...), nonostante l'osservata formazione di solidificazioni tra i residui. Rispetto all'esecuzione degli stessi test con gli scarti di legno A o anche con cippato di legno B, i test sono ancora più facili da eseguire.

Le prove hanno dimostrato che il calore in uscita prodotto dal reattore di gassificazione di biomassa marina residuale può essere utilizzato per le operazioni di essiccazione dei residui vegetali, che precedono la gassificazione.

Le caratteristiche di combustione del syngas prodotto sono simili a quelle osservate in altri combustibili come il cippato.

La combustione del syngas all'interno della caldaia ha permesso di produrre una potenza media intorno ai 50 kW, di cui 17 kW apportati dal propano. Un'ottimizzazione del processo potrebbe consentire un buon funzionamento anche senza l'apporto di propano. Il rapporto energetico della caldaia mostra che i catrami contenuti nel syngas costituiscono una parte non trascurabile del contenuto energetico prodotto dalla gassificazione.

La realizzazione delle prove di pirogassificazione e le operazioni di manutenzione successive hanno permesso di mettere in evidenza fenomeni di corrosione all'interno della caldaia impiegata per la combustione del syngas. Questo costituisce un limite operativo da verificare e, eventualmente, risolvere nell'ambito dello sviluppo industriale di questa soluzione di valorizzazione energetica dei residui di biomassa marina.

Caratteristiche dei prodotti della gassificazione

I residui solidi derivati dal processo di gassificazione di pellets di biomasse marine presentano contenuti di cloruro e di metalli relativamente importanti, per via della loro concentrazione all'interno della materia, privata di una parte del suo contenuto organico.

Tale composizione li rende inadeguati per una valorizzazione energetica secondaria all'interno di impianti di combustione di biomasse.

La composizione del syngas prodotto a partire da pellets di biomasse marine dimostra che esso è di qualità inferiore rispetto a un syngas ottenuto dal cippato, il che si traduce in un PCI più scarso (3,85 MJ/Nm³ contro i 4,65 MJ/Nm³ del syngas derivato dal cippato). Inoltre, la gassificazione dei pellets di biomasse marine conduce alla produzione, nel syngas, di un contenuto dello 0,12% di H₂S, in parte responsabile dei fenomeni di corrosione osservati al momento delle operazioni di manutenzione.

Il syngas derivato da pellets di biomasse marine ha un contenuto di catrami pari a 4,1 g/Nm³, simile a quello del syngas derivato da cippato di legno B. Questi catrami sono principalmente costituiti da composti aromatici e da IPA, per circa il 70%. Secondo le applicazioni previste per il syngas, potrebbe rendersi necessaria una fase di depurazione (non necessaria nel nostro caso di alimentazione di una caldaia adattata).

L'analisi dei fumi di combustione del syngas rileva contenuti di NO_x, SO_x, idrocarburi, piombo e somme di elementi metallici (Sb, Cr, Co, Cu, Sn, Mn, Ni, V, Zn) superiori alle soglie di emissione stabilite per gli impianti di combustione delle biomasse e dei combustibili solidi, soggette al regolamento per gli impianti classificati per l'ambiente (ICPE 2910). Dunque, se il syngas è destinato alla combustione, è indispensabile effettuare un trattamento dei fumi, in particolare mediante impianti di abbattimento delle emissioni di NO_x (DeNO_x), per adeguarsi alle soglie di emissione consentite dal regolamento.

Rendimento del processo di gassificazione

In termini di rendimento, i test realizzati hanno consentito di convertire il 91,2% della materia organica in gas combustibile. Tale tasso di conversione è piuttosto importante ma potrebbe essere migliorato con alcuni interventi sulla condotta del procedimento, in modo tale da avvicinarsi al tasso di conversione ottenuto con scarti di legno A o cippato (96%).

Il bilancio di materia mostra che il 93% dell'alimentazione (carico lordo e aria di processo) è trasformato in syngas, mentre i residui solidi rappresentano il 3,8% della materia in ingresso.

Il bilancio energetico di questi esperimenti, che non corrispondono a delle condizioni ottimali di funzionamento, mostra che la potenza in ingresso (47 kW), basata sul PCI del carico, ha permesso di produrre 30 kW di syngas, 3,2 kW di energia nei residui (PCI), 3 kW di calore derivato dal raffreddamento del syngas e 10,7 kW di energia specifica dei residui e delle perdite parietali.

- **SINTESI GENERALE FORMULATA DA PROVADEMSE (INSA LYON)**

Il presente studio, realizzato in seno alla piattaforma PROVADEMSE dell'INSA di Lione, aveva come obiettivo quello di eseguire delle ricerche sulla fattibilità tecnica e ambientale del trattamento dei residui di biomasse marine mediante gassificazione. L'accento è stato posto sulla preparazione del carico prima del trattamento. Le operazioni di preparazione hanno dimostrato che era indispensabile che i residui di biomasse marine subissero alcune operazioni unitarie prima della gassificazione. Le principali operazioni unitarie individuate ed effettuate precedentemente alla gassificazione sono :

- *Essiccazione*
- *Setacciatura e separazione delle frazioni fini (frazione <0,5mm)*
- *Addensamento mediante pellettizzazione*

- ❖ **Essiccazione:** Le operazioni di essiccazione sono state precedute da uno studio della cinetica di essiccazione seguendo diverse condizioni operative (temperatura, durata di essiccazione, spessore dello strato, etc.). Durante la fase di preparazione è stato dimostrato che l'umidità dei residui di biomasse marine doveva essere portata da oltre 60% a circa 15% o 20%.
- ❖ **Setacciatura/separazione:** uno studio della granulometria fine è stato condotto sui residui di biomasse marine e alcune analisi (MOT, PCI, contenuto di ceneri) sono state eseguite su ciascuna frazione. L'interpretazione dei risultati ottenuti ci ha consentito di constatare che le frazioni fini (al di sotto dei 500 μ m) rappresenterebbero circa il 10% della massa totale. A rivelarsi importante è stato il fatto che in questa frazione si concentrava la gran parte delle sostanze minerali del carico lordo, mentre la quasi totalità della frazione organica, e quindi dell'energia, si concentravano nella frazione opposta (superiore a 500 μ m). È questo che nel nostro procedimento ha giustificato il buon fondamento di realizzare, in fase di preparazione, la separazione delle frazioni fini inferiori a 500 μ m.
- ❖ **Addensamento:** La massa volumica dei residui di biomasse marine essiccate rappresenta soltanto 119 kg/m³. Questo valore è troppo scarso perché il rifiuto possa essere affidato a un reattore di gassificazione a letto fisso, in cui il deflusso nel reattore è gravitazionale. Era dunque necessario procedere alla pellettizzazione del carico e abbiamo potuto ottenere, in seguito a questa operazione, dei pellets di una densità maggiore di 480 kg/m³, adatta per questo genere di processi di gassificazione a letto fisso.

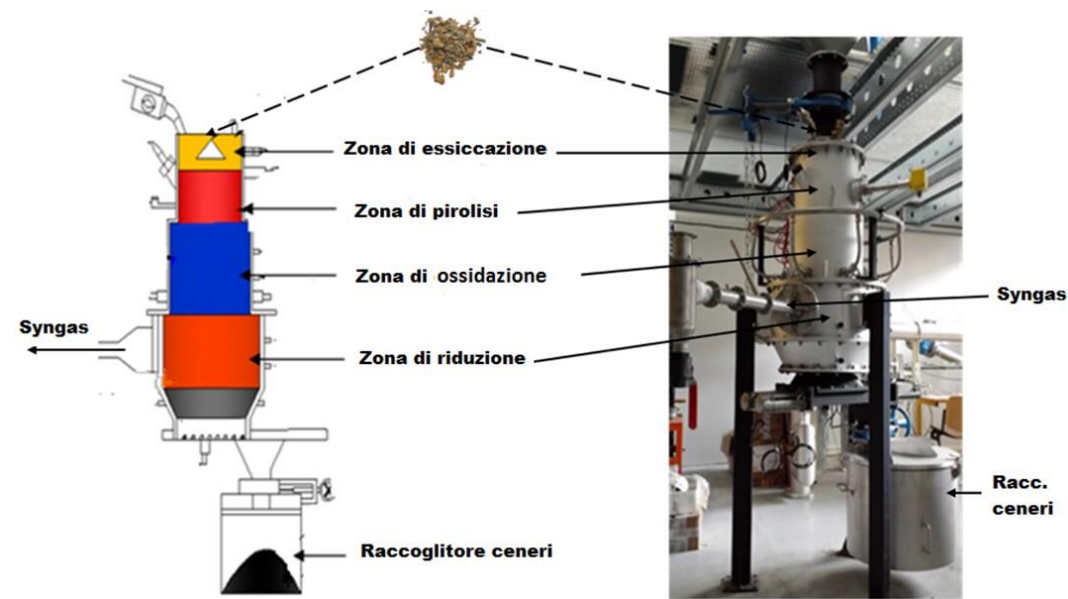
Successivamente alle operazioni di preparazione, che hanno seguito il procedimento riassunto sopra, abbiamo effettuato alcuni test di gassificazione durati svariate ore e distribuiti su più di due giorni. Infine, il vero e proprio studio di fattibilità di gassificazione su scala sperimentale è stato effettuato sui pellets di biomasse marine.

Le prove hanno permesso di verificare il buon comportamento meccanico del letto di gassificazione (deflusso, perdita di carico, compattazione, curvatura, etc.).

Abbiamo in seguito analizzato tutti gli effluenti solidi, liquidi e gassosi derivati dal processo. Un'attenzione particolare è stata rivolta all'analisi del syngas e all'identificazione dei catrami (composti considerati tali). In termini di emissioni gassose (emissioni atmosferiche) abbiamo eseguito un'analisi dei fumi, la quale ci ha permesso di confrontare i risultati ottenuti con la normativa in vigore. Abbiamo notato in particolare le alte concentrazioni di NOx che superano le soglie stabilite dalle varie normative.

I residui solidi sono stati esaminati, il che ha permesso di notare che essi non rispettavano le soglie previste per le ceneri prodotte in impianti annoverati nella rubrica ICPE 2910-B.

Abbiamo dunque dimostrato che la gassificazione dei residui vegetali derivati dal trattamento dei sedimenti marini presenta un forte potenziale. Tuttavia, un'altra filiera di recupero dovrebbe essere individuata per le frazioni fini (<500µm), costituite per la maggiore da sabbia, che rappresenta meno del 10% dei residui vegetali lordi. Inoltre, se il gas viene bruciato, particolare attenzione deve essere prestata alle emissioni atmosferiche. Sarebbe giudizioso prevedere delle attrezzature di trattamento dei fumi (NOx, IC, metalli).



Panoramica del reattore di gassificazione della piattaforma PROVADEMSE con le varie zone di reazione

VIII. SINTESI DI TRATTAMENTI PILOTA E VALORIZZAZIONE (T2.4) – DELIVERABLE T2.4.7 - PROVADEMSE / INSA LYON ; ISPRA LIVORNO ; RAS / CAGLIARI

Deliverable T2.4.7 riassume i risultati sperimentali ottenuti dai partner del progetto SEDITERRA incaricati dell'implementazione e del monitoraggio ambientale e geotecnico dei piloti di recupero sviluppati a partire dai sedimenti dragati grezzi e trattati studiati durante il progetto. Questi partner sono i seguenti :

- INSA de LYON tramite il suo fornitore di servizi PROVADEMSE
- ISPRA LIVORNO
- Regione Autonoma della Sardegna / Città Metropolitana di Cagliari

PRINCIPI E OBIETTIVI

La gestione dei sedimenti di dragaggio del Mar Mediterraneo è sottoposta a procedure di valutazione diverse in Francia e in Italia. Entrambi gli approcci sono stati messi in pratica, al fine di valutare le condizioni di accettabilità della gestione di tali sedimenti.

L'obiettivo primario è il recupero dei sedimenti in quanto materia prima sostitutiva nelle opere di ingegneria civile come terrapieni, malte per il riempimento di trincee e calcestruzzi comuni.

In Francia, la valutazione ambientale dell'impiego dei sedimenti in simili applicazioni può essere soggetta ad una procedura che può spingersi fino alla realizzazione di simulazioni pilota.

Il rapporto T2.4.7 descrive le procedure di valutazione francese e italiana, la loro applicazione ai sedimenti esaminati, la preparazione dei materiali a base di sedimenti, lo studio delle proprietà tecniche di tali materiali, nonché la loro valutazione ambientale. L'obiettivo è quello di identificare i parametri che potrebbero rendere certe opere non conformi alle condizioni di accettabilità per il recupero e di prevedere eventuali adattamenti delle procedure di valutazione ambientale dei sedimenti marini, in vista del loro recupero in entrambi i Paesi.

MATERIALI E METODI

I quattro sedimenti che sono stati oggetto delle prove pilota per il trattamento e il reimpiego di sedimenti marini sono stati selezionati tra i 16 campioni caratterizzati nella fase preliminare. Tali campioni sono identificati con il luogo di provenienza :

- ✓ Centuri
- ✓ Tolone
- ✓ Cagliari
- ✓ Livorno

Le metodologie francesi e italiane utilizzate e i risultati della caratterizzazione dei sedimenti a livello fisico-chimico, ecotossicologico e geotecnico sono presentati in dettaglio nel deliverable T2.4.7. Questo deliverable T2.4.7 presenta anche la metodologia e i risultati dei vari test di formulazione e dei controlli geotecnici condotti in laboratorio, permettendo una selezione in-fine di quelli da implementare e monitorare su scala pilota.

I lavori pilota di recupero sviluppati a partire dai 4 sedimenti selezionati (due italiani e due francesi), di identico disegno, sono stati realizzati in due siti separati :

- All'interno di container termoregolati sulla piattaforma ambientale dedicata alla R&S del CPEM ENVISAN a La Seyne-Sur-Mer per le opere a base di sedimenti di Centuri e Tolone
- All'interno dei locali dell'ISPRA a Livorno per le opere a base di sedimenti di Livorno e Cagliari.

Trattamento effettuato

I trattamenti dei sedimenti sono stati effettuati mediante lavaggio/idrociclonazione con attrezzature ISPRA sul sito di Livorno per i sedimenti di Livorno e Cagliari ; e sul sito di Tolone per i sedimenti di Centuri ; e con attrezzature ENVISAN sul sito di Tolone (CPEM) per i sedimenti di "Tolone". Gli obiettivi di questi trattamenti erano la rimozione di elementi fini e residui vegetali dai sedimenti per preservare le frazioni sabbiose, che sono state poi utilizzate nelle formulazioni.

Piloti di valutazione testati

Nel caso dei sedimenti italiani, gli scenari e le tipologie di piloti di recupero selezionati sono i seguenti :

- Due lisimetri che simulano un riempimento, realizzati con :
 - Sedimento grezzo di Cagliari
 - Sedimenti trattati di Livorno

- Quattro lastre di malta o calcestruzzo :
 - Due lastre di malta con sedimento di Cagliari grezza e trattata
 - Due lastre di cemento con sedimenti di Livorno grezzi e trattati

Nel caso dei sedimenti francesi, gli scenari e i tipi di piloti di recupero selezionati sono i seguenti :

- Tre lisimetri che simulano un argine, sviluppati con :
 - Sedimento grezzo di Cagliari
 - Sedimenti di Centuri trattati a Tolone (da ISPRA)
 - Sedimento grezzo di Tolone

- 6 lastre di malta o calcestruzzo
 - Due lastre di malta con i sedimenti di Tolone, grezze e trattate
 - Due lastre di calcestruzzo con sedimenti grezzi e trattati di Tolone
 - Due lastre di malta con sedimenti di Centuri grezzi e trattati

- 2 lastre di malta o calcestruzzo di controllo
 - Una lastra di malta di controllo con cemento e sabbia francese
 - Una lastra di controllo in calcestruzzo con cemento, ghiaia e sabbia francese

Descrizione dell'implementazione dei lisimetri pilota

A Livorno, i piloti riempiti di sedimenti sono costituiti da bidoni di legno OSB lunghi 2,5 m per 1,75 m di larghezza e alti 0,83 m, che coprono un'area di 4.375 m². A Tolone, le dimensioni dei lisimetri sono state adattate per mantenere la stessa superficie, cioè 2,26 x 1,94 m. I dettagli della realizzazione di questi "rack lisimetrici" sono presentati in T2.4.7.

Il sistema di irrigazione è costituito da 48 ugelli di nebulizzazione distribuiti in 3 array di 16 ugelli per esporre l'intera superficie dei lisimetri sperimentali. Le 3 reti sono gestite da un set di timer ed elettrovalvole. Le 3 reti vengono attivate, una ad una, ogni 6 minuti e 40 secondi, cioè un'irrigazione completa ogni 20 minuti.

Il primo giorno gli ugelli vengono attivati manualmente per immergere la massa totale di sedimenti, l'irrigazione viene interrotta non appena l'acqua raggiunge l'uscita (fondo del lisimetro).

Descrizione della realizzazione delle lastre pilota

Lastre pilota in malta e calcestruzzo sono realizzati secondo le formulazioni sviluppate in laboratorio (vedi il deliverable T2.4.7). La miscelazione viene effettuata in una normale betoniera. La malta viene versata in contenitori in PE con dimensioni L x L x A = 555 x 355 x 235 mm, ovvero una superficie di 0,20 m². Le lastre realizzate sono alte circa 11 cm.

Le formulazioni utilizzate sono riassunte nelle seguenti tabelle :

Composizione in percentuale di massa secca delle malte e dei calcestruzzi derivati dalle prove di formulazione e realizzati per le lastre sperimentali

	Mortier avec les sédiments de Cagliari & Toulon & Centuri		Béton avec les sédiments de Livourne & Toulon	
	<i>brut</i>	<i>traité</i>	<i>brut</i>	<i>traité</i>
Sédiment	29,43%	42,04%	20,19%	40,38%
sable	54,65%	42,04%	20,19%	0,00%
gravier	0,00%	0,00%	44,09%	44,09%
ciment	15,76%	15,76%	15,32%	15,32%
réducteur	0,16%	0,16%	0,21%	0,21%
total	100%	100%	100%	100%

Le percentuali di acqua utilizzate nelle formulazioni sono raggruppate nella tabella sottostante:

Contenuto d'acqua delle formulazioni delle lastre sperimentali

Pourcentage d'eau réel	Mortier		Béton	
	brut	traité	brut	traité
Toulon	19,7%	15,3%	10,86%	11,69%
Centuri	11,1%	13,3%	-	-
Cagliari	21,44%	16,50%	-	-
Livourne	-	-	12,30%	13,69%
Témoin	18,4%		10,9%	

Monitoraggio dei pilota

Esposizione all'acqua dei lisimetri : La procedura adottata consiste nell'irrigare i sedimenti con un volume d'acqua equivalente alla pluviometria media annua in Francia, cioè 800 mm/m² su 6 mesi. Questo dato corrisponde a 30,77 mm/m² a settimana. I lisimetri hanno una superficie pari a 4,375 m² e ciascuno di essi richiede un volume d'acqua di 61,5 litri a settimana, cioè 1600 litri sui 6 mesi di prova. Gli eluiti sono stati raccolti ogni settimana e si è preso nota del volume della soluzione recuperata, del suo pH e della conduttività.

Esposizione all'acqua delle lastre : La procedura adottata per le lastre di materiale consiste nel coprirle con 10 mm d'acqua per 24 ore, una volta a settimana, per un apporto complessivo di 2 litri d'acqua a settimana per ciascuna lastra. Il volume recuperato viene misurato per tenere il conto dell'evaporazione e dell'acqua d'infiltrazione. Questo procedimento è stato mantenuto finché le concentrazioni dei principali elementi non sono significativamente diminuite. In seguito, il tempo di contatto con l'acqua è stato aumentato a 48h ogni 15 giorni, sempre con 10 mm d'acqua, per dare il tempo alle lastre di ricaricare l'acqua dai pori e di ottenere concentrazioni misurabili degli elementi in traccia. In questo caso, l'equivalente pluviometrico è di 150 l/m², ma tutta l'acqua resta a contatto con il materiale. Questa situazione rappresenta degli episodi di precipitazione frequente e una configurazione che consente il mantenimento di una lama d'acqua per una durata che va dalle 24 alle 48 ore. Il rilascio ottenuto è probabilmente equivalente a quello di alcuni anni in situazioni reali a seconda delle modalità di stima della pioggia efficace per una lastra.

Monitoraggio analitico : Gli elutriati dei lisimetri e delle lastre sono stati sottoposti ad un'analisi chimica dei metalli e degli anioni nelle settimane successive :

semaines	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Analyse	1	2	3	4	mix 5-6		mix 7-8		mix 9- 10		mix 11 à 14			

semaines	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Analyse	mix 15 à 18				mix 19 à 22				mix 23 à 26			

I parametri dell'analisi chimica monitorati sono : pH, Conducibilità, Cloruri, Solfati, Fluoruri, Antimonio (Sb), Arsenico (As), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Rame (Cu), Stagno (Sn), Mercurio (Hg), Molibdeno (Mo), Nichel (Ni), Piombo (Pb), Selenio (Se), Zinco (Zn).

Il lisimetro e gli eluati delle lastre sono stati sottoposti ad analisi ecotossicologiche su 3 campioni alla fine delle settimane 2 (1 campione); 9-10 (mix di 2 campioni); 23-26 (mix di 4 campioni).

Il biosaggio scelto per la valutazione ecotossicologica degli eluiti lisimetrici e delle lastre è il saggio di inibizione della riproduzione del rotifero *Brachionus calyciflorus* a 48 h (ISO 20666), mostratosi il più sensibile al momento dei saggi preliminari di valutazione della caratteristica di pericolo ecotossico (HP14).

Si tratta di un saggio di tossicità cronica il cui indicatore utilizzato nell'ambito della procedura francese HP14 è la EC20, con una soglia di accettabilità inferiore a 1%.

Metodologia per l'interpretazione dei dati analitici ambientali :

La valutazione delle emissioni di sostanze nell'acqua da parte dei sedimenti posti **nel lisimetro** è stata effettuata mediante il confronto delle concentrazioni e della massa complessiva rilasciata rapportata all'unità di superficie, con i valori limite stabiliti nell'ambito della procedura francese di accettabilità dei materiali alternativi nelle tecniche stradali (terzo livello di caratterizzazione ambientale – Vedere deliverable T1.2.4).

In questo modo la nota informativa « Aide à la mise en oeuvre du niveau 3 de caractérisation environnementale – Volet n°1 : les essais lysimétriques et plots expérimentaux » (Ausilio per l'attuazione del terzo livello di caratterizzazione ambientale - Parte prima : prove lisimetriche e plot sperimentali) ha fornito due serie di soglie, la prima espressa in concentrazioni massime e la seconda in massa complessiva rilasciata per unità di superficie. I valori limite di concentrazione da non superare per un materiale alternativo impiegato nelle tecniche stradali, nell'ambito delle prove lisimetriche o dei plot sperimentali sono i seguenti :

Valori limite di concentrazione

Paramètre	Concentration maximale
	Valeur (mg/l)
As	0.3
Ba	20
Cd	0.3
Cr total	2.5
Cu	30
Hg	0.03
Mo	3.5
Ni	3
Pb	3
Sb	0.15
Se	0.2
Zn	15
Fluorure	40
Chlorure	8 500
Sulfate	7 000

I valori limite per la quantità cumulativa di rilascio per unità di superficie da non superare per un materiale alternativo utilizzato nella costruzione di strade in prove lisimetriche o in lotti sperimentali sono i seguenti :

Valori limite di emissione cumulativa in superficie

Paramètre	Quantité surfacique relarguée cumulée
	Valeur (mg/m ²)
As	10
Ba	700
Cd	4
Cr total	50
Cu	625
Hg	1
Mo	70
Ni	20
Pb	10
Sb	5
Se	6
Zn	625
Fluorure	750
Chlorure	125 000
Sulfate	125 000

$$\times \min \left(d ; \frac{P_{ref}}{P_{eff}} \right)$$

d est la durée du suivi (an)
 P_{ref} est la pluie efficace mesurée sur la durée du suivi (mm).
 P_{eff} est la pluie efficace annuelle de référence qui vaut :

- 100 mm/an dans le cas d'un usage revêtu
- 300 mm/an dans le cas d'un usage recouvert

La definizione di questi valori dipende da un fattore correttivo che prende in considerazione il valore più basso tra la durata d'esposizione (in anni) e il rapporto della pioggia efficace su una pioggia di riferimento, definita pari a 100 mm/anno nel caso di uso rivestito (sormontato da un rivestimento) o a 300 mm/anno nel caso di un uso ricoperto (sormontato da terreno vegetale).

Nel nostro caso, la durata dell'esposizione presa come riferimento è la pluviometria annua e la pioggia efficace è quasi pari a 800 mm/anno. Il fattore correttivo è quindi 1.

La valutazione delle emissioni di sostanze nell'acqua a partire da materiali formulati a base di sedimenti, esposti sotto forma **di lastre**, è stata effettuata comparando le concentrazioni e la massa rilasciata rapportata all'unità di superficie, con i valori di emissione osservati a partire da materiali realizzati secondo le stesse formulazioni senza sedimenti ed esposte alle stesse condizioni (materiali di controllo).

RISULTATI PRINCIPALI OTTENUTO

Analisi geotecnica (partner RAS) :

- **Lastra in calcestruzzo** : I risultati mostrano che l'uso di sedimenti grezzi, miscelati con una percentuale uguale di sabbia, ha portato ad una significativa riduzione dei valori di resistenza alla compressione, che sono stati quasi dimezzati rispetto a quelli del campione di prova. In ogni caso, i valori di resistenza ottenuti permettono di portare le miscele sedimento-cemento nel campo dei materiali utilizzabili. In particolare, i valori di resistenza a compressione permettono di classificare i calcestruzzi adatti ad un uso non strutturale, cioè prodotti per i quali non è richiesto un elevato valore di resistenza a compressione.

Va inoltre notato che anche nei campioni ottenuti da sedimenti trattati, i valori di resistenza sono sostanzialmente simili a quelli ottenuti da sedimenti grezzi.

- **Lastra di malta** : anche nel caso di campioni di malta, il valore di resistenza dei campioni di controllo è quasi il doppio di quello dei campioni realizzati con sedimenti.

Per quanto riguarda la possibilità di utilizzare i sedimenti nella produzione di malte, i valori di resistenza ottenuti permettono comunque alle miscele sedimento-cemento di entrare nel campo dei materiali utilizzabili (con bassi requisiti meccanici).

Monitoraggio ambientale dei lisimetri :

- L'ecotossicità degli eluiti di lisimetro compare soltanto nei primi eluiti dei lisimetri dei sedimenti di Tolone grezzo, Centuri grezzo e Centuri trattato. La classificazione dei sedimenti in base all'ecotossicità dei primi eluiti rispecchia i livelli di emissione di cloruri e solfati tra i tre sedimenti. La tossicità degli eluiti scompare nei prelievi successivi.

L'interpretazione delle analisi ecotossicologiche degli eluati dei lisimetri monitorati a Livorno non è stata possibile a causa dei lunghi tempi di conservazione degli eluati.

- I parametri che possono rendere le opere non conformi alle condizioni di accettabilità dal punto di vista ambientale per un reimpiego nelle tecniche stradali sono :
 - I cloruri
 - I solfati
 - Il molibdeno (solo nel caso del sedimento di Cagliari)

Per essere conformi alle condizioni di accettabilità stabilite in Francia per il reimpiego in riempimenti tecnici, i sedimenti marini studiati richiedono un lavaggio preliminare efficace dei cloruri e dei solfati.

Monitoraggio ambientale delle lastre :

- L'ecotossicità degli eluiti delle lastre di materiali compare soltanto in quelli prelevati nel punto intermedio. In effetti, tali eluiti non presentano alcuna tossicità nei confronti di *Brachionus calyciflorus* all'inizio dell'esposizione e uno solo tra i materiali (malta di Tolone trattato) presenta una tossicità alla fine della durata dell'esposizione.

I livelli di tossicità osservati nel prelievo intermedio dei materiali a base di sedimenti differiscono solo leggermente da quelli di controllo. Si tratta dunque, almeno in parte, di un effetto dovuto alla matrice cementizia.

- Gli eluiti delle lastre sperimentali presentano tutti un pH basico, compreso tra 9 e 10.5 per Tolone e Centuri e tra 8.5 e 10.5 per Cagliari e Livorno. Questi livelli di pH corrispondono a quelli osservati per i materiali di controllo. Rispecchiano l'effetto della matrice contenente elementi alcalini solubili in eccesso. L'evoluzione del pH degli eluiti non presenta alcun segno evidente di carbonatazione (diminuzione del pH) durante il periodo di monitoraggio.

- I parametri che possono rendere le opere non conformi alle condizioni di accettabilità ambientale per il reimpiego in materiali come malta e calcestruzzo sono :
 - I cloruri
 - L'arsenico e il molibdeno nel caso del sedimento di Tolone trattato, in particolare nella formulazione di malta.

La texture (fine o sabbiosa) e le condizioni di preparazione del sedimento (lagunaggio, trattamento, esposizione all'acqua piovana) possono influire sul contenuto di cloruri e di eventuali altri elementi facilmente lisciviabili, in particolare in condizioni di pH basico (arsenico).

SINTESI GENERALE FORMULATA E PROSPETTIVE

L'approccio francese e quello italiano per la caratterizzazione e la classificazione dei sedimenti studiati sono stati applicati sugli stessi campioni di sedimenti.

La procedura francese, costruita su un approccio di gestione dei sedimenti in quanto rifiuti, ha condotto a classificare i sedimenti di Tolone, Centuri e Cagliari come sedimenti non pericolosi. Il sedimento di Livorno, invece, è stato considerato pericoloso per via del suo carattere ecotossico (caratteristica di pericolo HP14). Quest'ultimo, al suo stato attuale, non è dunque recuperabile secondo le condizioni di gestione stabilite in Francia.

L'applicazione della procedura francese di accettabilità dei materiali alternativi nelle tecniche stradali a ciascuno dei quattro sedimenti ha dimostrato che nessuno di essi è riutilizzabile allo stato attuale in riempimenti ricoperti, poiché tutti superano i limiti di emissione di cloruri e solfati. Soltanto il sedimento di Livorno sarebbe conforme (se non fosse pericoloso) alle condizioni richieste dal recupero in sostrato rivestito di carreggiata o di corsia di accostamento.

Ciononostante, questa procedura lascia la possibilità di giustificare l'accettabilità dei sedimenti nelle tecniche stradali sulla base di uno studio specifico che richiede la realizzazione di lisimetri o di matrici di prova. È per questo motivo che con i sedimenti sono stati realizzati dei lisimetri di riempimento di cui alcuni con sedimenti trattati.

La procedura italiana, costruita invece secondo un approccio di gestione dell'impatto sull'ambiente marino, ha condotto a classificare il sedimento di Cagliari come idoneo per l'isolamento all'interno di vasche o per il capping in area portuale, e il sedimento di Livorno come idoneo per operazioni di ripascimento dei litorali o per l'immersione in mare.

Per questo, è stato condotto uno studio di formulazione, con l'obiettivo di incorporare nella formulazione di malta per il riempimento di trincee e in quella di calcestruzzo comune sedimenti di dragaggio marino, alcuni dei quali sono stati trattati mediante separazione su vagli con maglie diverse, ai fini della valutazione della loro accettabilità ambientale.

Al momento, l'elaborazione dei materiali di costruzione utilizzando il sedimento in sostituzione parziale della sabbia non è oggetto di nessuna procedura di valutazione, né in Francia né in Italia. In Francia, oltre alla procedura per l'Accettabilità dei materiali alternativi nell'ingegneria stradale già citata e utilizzata in questo studio per la valutazione dei risultati delle prove lisimetriche, sono in corso lavori con il Ministero dell'Ambiente per proporre una guida per l'utilizzo di materiali alternativi (di cui i sedimenti potrebbero logicamente far parte) nella costruzione. Tuttavia, le soglie raccomandate non sono ancora disponibili.

Le prove di formulazione hanno consentito di mostrare che i cloruri sembrano essere molto concentrati nelle particelle fini ($< 63 \mu\text{m}$) e che l'eliminazione della frazione fine permette di ridurre nettamente i contenuti di cloruri. Tale pratica consente inoltre di ridurre la richiesta d'acqua di formulazione e di ottenere migliori prestazioni meccaniche.

La valutazione geotecnica e meccanica dei materiali formulati ha rivelato che i calcestruzzi e le malte realizzate con i sedimenti presentano una resistenza a compressione inferiore rispetto a quella dei materiali di controllo. Si è inoltre evidenziato che i calcestruzzi contenenti sedimenti sono adatti a un utilizzo non strutturale e che anche le malte a base di sedimenti possono essere utilizzate per applicazioni che richiedono scarse prestazioni meccaniche.

La valutazione ambientale dei materiali in condizioni sperimentali è consistita nella realizzazione di opere pilota che permettessero di simulare il comportamento ambientale dei sedimenti utilizzati in materiali di riempimento da una parte e in materiali di costruzione come la malta e il calcestruzzo dall'altra, con o senza trattamento.

Il trattamento dei sedimenti è stato effettuato mediante lavaggio con idrociclone sotto la supervisione dell'ISPRA sul sito di Livorno da un lato (sedimenti di Livorno e Cagliari) e sul sito di Tolone dall'altro (sedimenti di Tolone e Centuri) per estrarre le frazioni fini e i residui vegetali come in particolare le fibre di posidonia.

Le opere pilota consistono in vasche lisimetriche, costruite ed esposte all'acqua secondo le raccomandazioni della procedura francese di valutazione dell'accettabilità dei materiali alternativi nelle tecniche stradali e in alcune lastre di materiali monolitici (malta e calcestruzzo) esposti alternativamente a una lama d'acqua in superficie e all'aria. Il monitoraggio ambientale è stato eseguito mediante analisi fisico-chimiche ed ecotossicologiche regolari sulle acque a contatto con i materiali.

I risultati del monitoraggio ambientale delle opere pilota di riempimento mostrano che i parametri che possono rendere le opere non conformi alle condizioni di accettabilità ambientale per il recupero sono i cloruri, i solfati e, nel caso del sedimento di Cagliari, il molibdeno. Per essere conformi alle condizioni di accettabilità stabilite in Francia per il recupero in terrapieni, i sedimenti necessitano di un precedente lavaggio efficace dei cloruri e dei solfati.

Le condizioni specifiche d'impiego di questi materiali nelle opere marittime possono essere previste per i materiali che presentano emissioni di cloruri superiori al livello accettabile per le opere terrestri. Le caratteristiche di accettabilità ambientale per le opere marittime restano tuttavia ancora da definire.

I risultati del monitoraggio ambientale delle opere pilota di materiali monolitici (malta e calcestruzzo) mostrano che i materiali testati presentano nel complesso emissioni non molto diverse da quelle dei materiali di controllo. I parametri che possono rendere le opere non conformi alle condizioni di accettabilità ambientale per il recupero nei materiali come il calcestruzzo o la malta sono i cloruri e, nel caso del sedimento di Tolone trattato, in particolare nella formulazione della malta, l'arsenico e il molibdeno.

Va notato, tuttavia, che i livelli di rilascio sono molto più bassi per unità di superficie della struttura rispetto a quelli ottenuti per i sedimenti utilizzati da soli come riempimento. Per l'impiego nell'ingegneria civile, appare quindi fondamentale la quantità di sedimenti incorporati (i materiali che rilasciano di più sono quelli che contengono più sedimenti (dell'ordine del 40% per i sedimenti trattati) così come la superficie di scambio in quanto i materiali monolitici (malta o calcestruzzo) consentono una significativa limitazione del rilascio, compatibile con le soglie per le strutture stradali (a parità di superficie di esposizione).

La selezione e il trattamento dei sedimenti può migliorare la qualità ambientale dei materiali. In particolare, la consistenza (fine o sabbiosa) e le condizioni di preparazione dei sedimenti (lagunaggio, trattamento, esposizione all'acqua piovana) possono influenzare il contenuto di cloruri ed eventualmente di altri elementi facilmente lisciviabili, soprattutto se posti in condizioni di pH basico (arsenico) come avviene nei materiali cementizi.

Infine, le condizioni specifiche di utilizzo di questi materiali nelle strutture marine possono essere considerate per i materiali con un maggiore rilascio di cloruro rispetto ai materiali di controllo. Le caratteristiche ambientali accettabili per le strutture marine restano da definire.

Da tutti questi lavori ne consegue che l'utilizzo di sedimenti marini in strutture (argini o materiali da costruzione) in un ambiente legato alle acque marine o salmastre richiede una procedura di valutazione adattata, in quanto questo tipo di applicazione non è previsto nella procedura di valutazione ambientale francese per l'utilizzo di materiali alternativi nell'ingegneria stradale.

Inoltre, la presentazione degli approcci francese e italiano alla valutazione ambientale dei sedimenti ha permesso di evidenziare la loro complementarietà e di prevedere prospettive di sviluppo di procedure francesi e italiane che potrebbero portare, per entrambi i paesi, allo sviluppo di una procedura (o anche all'utilizzo di un software) per la classificazione dei sedimenti che integri tutti i criteri fisico-chimici ed ecotossicologici e che permetta di determinare l'accettabilità del sedimento nei suoi diversi scenari di recupero e gestione come:

- Il recupero nelle tecniche stradali continentali
- Il recupero in opere costiere o marittime
- Il recupero in materiali monolitici continentali
- Il recupero in materiali monolitici costieri o marittimi
- Il ripascimento dei litorali
- L'immersione in area marina non costiera
- L'immersione in vasca marittima

La complementarità dei test ecotossicologici francesi e italiani, dedicati agli organismi continentali da una parte e marini dall'altra, permette di considerare questo tipo di procedura integrata che copra l'insieme delle situazioni di gestione, che siano connesse o meno all'ambiente marino.