



**Interreg**



UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME



## Composante T3

### OUTPUT T3.2

**Zone équipée pour le traitement de  
sédiments de dragage contaminés**

La coopération au cœur de la Méditerranée

Ce projet est cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional

## INDEX

1.	Zone équipée pour le traitement des sédiments de dragage contaminés.....	3
2.	Espace équipé pour le traitement de lavage des sols .....	3
3.	Zone équipée pour l'électrokinésie et le traitement d'landfarming .....	11
4.	Biobibliographie.....	23

## 1. Zone équipée pour le traitement des sédiments de dragage contaminés

La zone équipée a été développée pour appliquer un schéma de traitement basé sur un processus préliminaire de lavage et de séparation granulométrique suivi de l'application de l'électrokinésie et de l'enfouissement sur des fractions granulométriques spécifiques issues de la première phase de traitement. La zone sera un outil/ressource très utile pour l'étude des schémas de traitement à appliquer, même en différentes combinaisons, aux sédiments produits par les futures activités de dragage.

Les zones équipées sont situées sur deux sites différents :

- l'usine pilote de lavage des sols à Livourne, gérée par l'ISPRA
- les usines pilotes Elettrocinesi et Landfarming de Pise, gérées par l'UNIFI.

## 2. Espace équipé pour le traitement de lavage des sols

L'installation de lavage et de séparation granulométrique (figure 1) est située dans la zone portuaire de Livourne (figure 2).

Compte tenu de la forte présence de la composante sableuse dans les échantillons et sur la base des résultats des essais préliminaires, l'usine expérimentale de lavage et de séparation granulométrique, propriété d'ISPRA, a été mise en service pour séparer et récupérer les différentes fractions sableuses/péltiques présentes dans les sédiments soumis aux opérations de dragage.



Figure 1 : Installation de lavage et séparation granulométrique



Figure 2 : Emplacement de l'installation de lavage et séparation granulométrique

L'objectif principal du procédé mis en œuvre par l'usine est, en effet, de séparer des quantités expérimentales de sédiments marins dans les différentes fractions granulométriques qui les composent, afin de récupérer à la fois la partie sableuse, c'est-à-dire la partie des sédiments considérée comme moins contaminée et réutilisable, et la partie fine (fractions pelitiques), considérée comme étant plus contaminée et plus difficile à réutiliser.

Le premier noyau de cette usine, utilisé pour le projet LIFE Coast-Best ("Traitement des sédiments et réutilisation bénéfique dans les petits réseaux portuaires") a été installé dans le port de Livourne entre décembre 2012 et janvier 2013 ; récemment (octobre-novembre 2018) une section supplémentaire de criblage composée d'un Rotovaglio a été ajoutée à l'usine et les autres sections déjà présentes ont été revues pour adapter les opérations aux sédiments choisis pour le projet. L'usine a été autorisée conformément à l'article 211 du décret législatif 152/2006 par la Région Toscane par le décret n° 8493 du 30/05/2018.

La séparation du sable s'effectue par une classification humide des sédiments, basée sur la vitesse limite de déplacement des grains dans un champ de force gravitationnelle (classificateurs de sédimentation) et/ou dans un champ de force centrifuge (hydrocyclones). La fraction fine des sédiments est finalement envoyée à la phase de déshydratation, tandis que l'eau de traitement est recueillie dans des conteneurs spéciaux et éliminée de manière appropriée.

L'installation d'essai se compose des sections/modules suivants :

- a) Trémie de chargement de 1 m<sup>3</sup> pour l'alimentation des sédiments en l'état (2,40x1,30 m). La trémie de chargement sert à alimenter le lit de tamisage, ce qui permet de réguler le débit du matériau entrant dans l'installation.
- b) Module by-passable pour l'élimination des posidonies/fractions plastiques dispersées dans les sédiments à traiter. Si le sédiment entrant contient des pourcentages élevés de matières végétales telles que des fibres et/ou des fragments d'algues et de plantes aquatiques, comme la posidonie océanique, et de fragments de plastique, il sera soumis à une phase de criblage spécifique, au moyen d'un tamis rotatif, visant à l'éliminer. Ce module est placé entre les sections d'homogénéisation (boîte amovible) et le tamis vibrant. Le module se compose d'un tambour rotatif

perforé de trous de différents diamètres qui permettent le lavage et la séparation du sédiment des matériaux les plus grossiers.



Figure 3 : Tamis rotatif

c) Tamis vibrant avec toile de tamisage de 2 mm de diamètre (dimensions : 2,40x1,60 m). Le crible vibrant sépare le matériau grossier du matériau fin. La séparation s'effectue par le passage du matériau le plus fin sur une grille vibrante. Le mouvement vibratoire de l'écran est assuré par deux moteurs, fixés à la structure de l'écran, auxquels sont reliées des masses excentriques rotatives. Le sédiment est pulvérisé simultanément avec 4 jets d'eau à haute pression pour faciliter la séparation des tissus et permettre le mouvement de ces derniers à travers les sections suivantes de la plante.



Figure 4 :

d) N. 2 cellules d'attrition, (dimensions : 1,20x0,70 m - vol. 0,125 mc chacune). Le turbide (eau plus sédiments) qui sort du classificateur en spirale est transporté, dans des conditions de forte turbulence, dans deux cellules de frottement d'un volume de 125 litres qui déterminent la désintégration des éventuels agglomérats boueux encore présents.



Figure 5 : Cellule d'attrition

e) Unité d'hydrocyclage (dimensions : 3,50 x 1,3 m). Il se compose de 2 hydrocyclones distincts (dont l'un est by-passable). L'hydrocyclone sépare le sable fin de la fraction limono-argileuse par force centrifuge. Il se compose d'un cylindre à fond conique, équipé d'une vis sans fin latérale pour l'alimentation du mélange sédiments/eau, d'une section de sortie des fines particules traînées par le fluide, ainsi que d'une section de sortie des matériaux à granulométrie supérieure placée au sommet du cône.

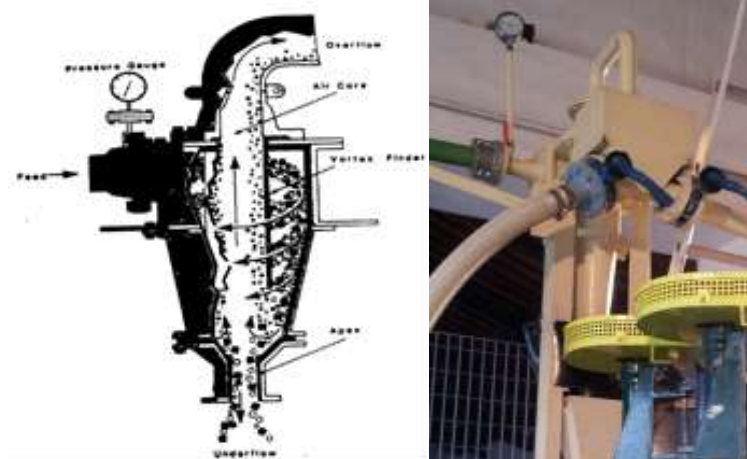


Figure 6 : Hydrocyclone

f) Classeur en spirale (dimensions : 2,90x1,00 m - diamètre 300 mm). Le classificateur en spirale est utilisé comme unité de classification. Le principe de fonctionnement dépend du taux de dépôt différent des particules solides pour la différence de densité.



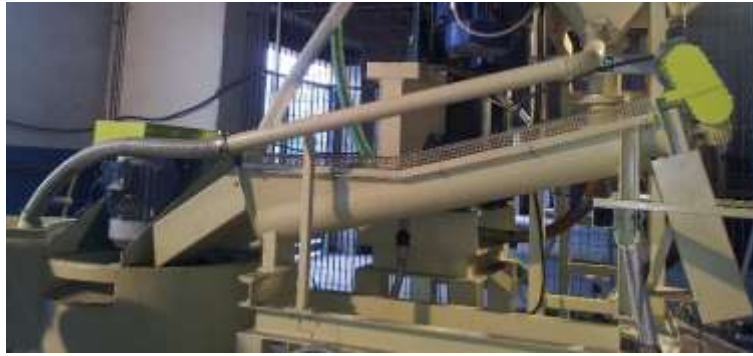


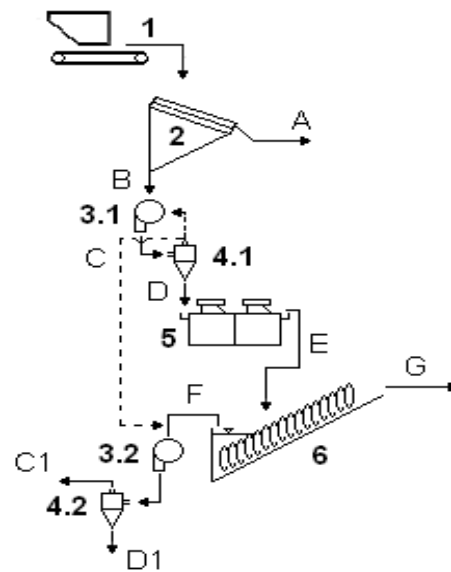
Figure 7 : Classeur en spirale

Bien que la capacité maximale de l'unité d'hydrocyclage seule soit supérieure aux quantités nécessaires à l'expérimentation proposée, la mise en place, avec les autres unités de l'appareil d'ingénierie de l'usine, réduit la capacité globale de traitement à des quantités de sédiments de l'ordre de quelques unités de mètres cubes (2-3 mètres cubes) pour une heure de fonctionnement.

Outre les limites techniques de l'installation dues à la trémie de chargement et à l'unité de déshydratation, l'activité expérimentale vise à optimiser la gestion des sédiments traités et permet donc l'utilisation de petites quantités de sédiments à cadencer dans un temps de traitement assez long (environ 60-90 minutes pour chaque essai expérimental).

La figure 3 montre un diagramme simplifié des sections de l'usine et les photos de la figure 4 mettent en avant quelques activités réalisées avec l'usine pilote pour le lavage et la séparation granulométrique.

Alimentazione



Légende

1 Alimentation électrique

2 tamis

3.1 Pompe d'alimentation cyclone I

4.1 Cyclone I

3.2 Pompe d'alimentation Cyclone II

4.2 Cyclone II

5 Cellules d'Attrition

6 classificateur à vis

A - au-dessus de l'écran

B - sous l'écran

C sur (fin) premier cyclone

D sous le (grand) premier cyclone

Et produit attritionné (alim. Cochlée)

F "fine" cochlée

G "grande" cochlée

C1 au-dessus du deuxième cyclone (fin)

D1 sous (grand) deuxième cyclone

Figure 1- Disposition simplifiée de l'installation de séparation granulométrique





Figura 2: Phases du traitement des sédiments avec installation de lavage et séparation granulométrique.

Après le traitement de lavage et de séparation granulométrique (LSG), les échantillons provenant de la cuve Colmata du port de Livourne ont été transportés par le personnel d'ISPRA au laboratoire de notre département, où ils ont été homogénéisés, échantillonnés et envoyés à un laboratoire externe (Geochim di Rosi e C. s.a.s. - Gualdo Tadino (PG)) pour une analyse spécifique du point de vue chimique. Les échantillons arrivés à notre laboratoire sont ainsi composés :

- échantillon brut: résultat de l'homogénéisation des différents échantillons provenant des 3 points de prélèvement et non traités physiquement par LSG ;
- Post-traitement sablonneux : fin et grossier ;
- Post-traitement pélitique : en phase aqueuse pour éviter le séchage.

La figure 5 ci-dessous montre les chiffres correspondant aux échantillons cités plus haut et les analyses chimiques spécifiques des différents échantillons par rapport aux valeurs limites exprimées dans le décret législatif 152/2006, relatif à la réutilisation pour les "sites A à usage public, privé et résidentiel vert" et pour les "sites B à usage commercial et industriel".



Figure 3: Echantillon brut - sable grossier - sable fin - pelite en phase aqueuse



### 3. Zone équipée pour l'électrokinésie et le traitement d'landfarming

La zone équipée est située au siège de DESTEC - UNIPI, via gabba 22, Pise.

Dans cette zone équipée seront réalisés les essais pilotes d'électrokinésie (EK) et d'enfouissement à l'échelle pilote.

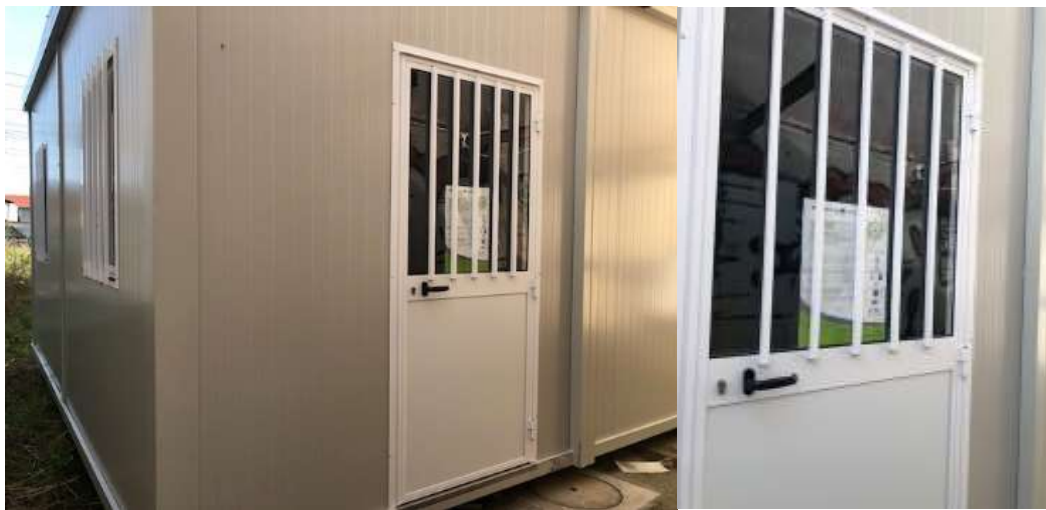


Figure 11 : indication de la zone d'intérêt (indicateur rouge) - détail de la boîte de location

#### Système expérimental de décontamination électrocinétique

Les essais en laboratoire y ont été réalisés pour reproduire les phénomènes qui contribuent au transfert des contaminants au cours du processus électrocinétique, pour évaluer le pourcentage d'enlèvement et le comportement des sédiments pendant le traitement lui-même et pour évaluer les paramètres opérationnels nécessaires au dimensionnement hydraulique et électrique de la future installation pilote.

Les essais ont été réalisés dans un réacteur rectangulaire en plexiglas de 50 cm (longueur) x 9 cm (hauteur) x 7 cm (largeur) conçu, développé et utilisé par Masi et.al (2015) lors des essais en laboratoire du projet Life + Sekret. L'installation se compose de six parties principales : le compartiment réservé aux sédiments, les compartiments où sont logées les électrodes, les réservoirs d'eau et d'acide, les réservoirs en excès de la solution électrolytique, le système d'alimentation électrique et le système de contrôle du pH. La taille de l'échantillon à traiter est de 30 cm (longueur) x 9 cm (hauteur) x 7 cm (largeur) et le poids du sédiment humide utilisé dans chaque expérience est d'environ 3,5 kg. Les deux chambres latérales, où sont positionnées les électrodes et la solution électrolytique, ont une longueur de 10 cm chacune. Une grille en nylon (maille de 2 mm) et du papier filtre ont été utilisés pour séparer le compartiment à sédiments des compartiments à électrodes.

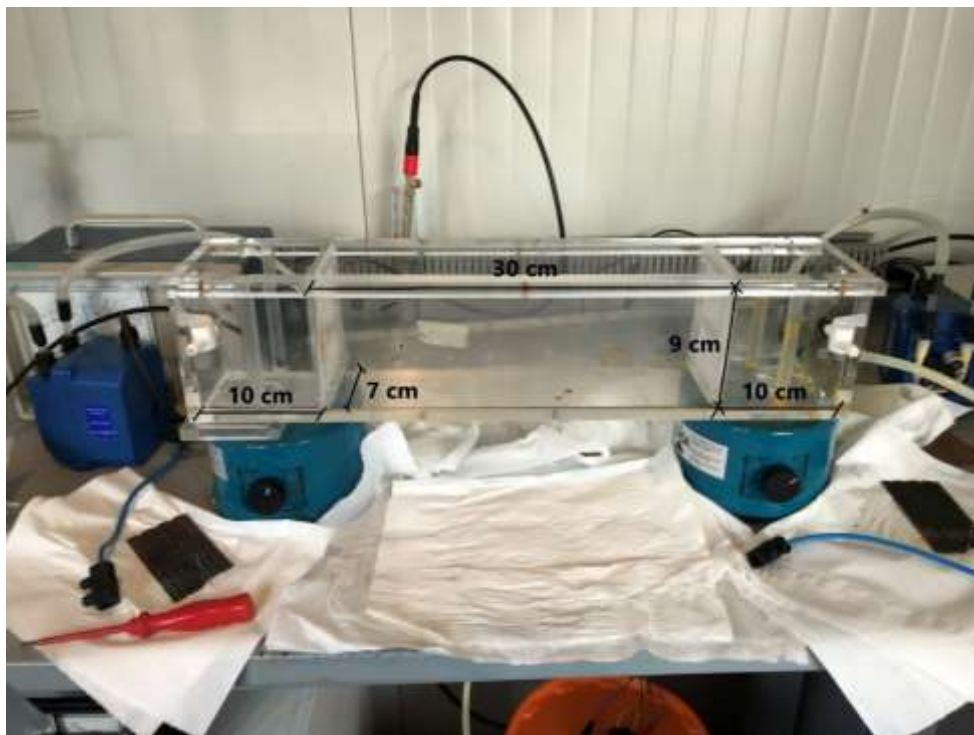


Figure 12: Dimensions des cellules électrocinétiques à l'échelle du laboratoire



Figure 4: Sections de la cellule électrocinétique

Les sédiments ont été insérés dans la cellule électrocinétique et compactés statiquement en appliquant une pression de 40 g/cm<sup>2</sup> pendant au moins 3 jours avant le début du test. La chambre anodique et la chambre cathodique sont en surface libre et les niveaux d'électrolyte sont maintenus constants grâce à 2 déversoirs placés à une hauteur de 7 cm du fond de la cellule. Les électrolytes des deux chambres sont maintenus en agitation grâce aux "ancres" mises en mouvement grâce aux agitateurs mécaniques. Le matériau compacté doit être environ 2 cm plus haut que le niveau de l'électrolyte pour éviter l'écoulement hydraulique de ce dernier à la surface du sédiment. Les deux électrodes (anode et cathode) sont constituées d'un treillis de titane revêtu d'un oxyde métallique mixte (MMO - Mixed Metal Oxide) fourni par Industrie De Nora s.p.a, Italie.



Figure 14 : Électrode

Pendant les expériences, le catholyte est maintenu à pH constant (pH = 3) au moyen d'un système de contrôle automatisé : une sonde pH est insérée dans la cellule cathodique et les valeurs sont enregistrées en temps réel par un logiciel de mesure et d'automatisation développé sur mesure qui

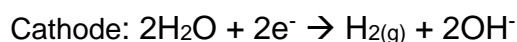
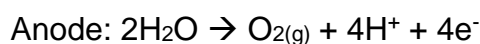
commande automatiquement une valve pour l'injection de la solution acide dans la cellule elle-même.

Les deux chambres latérales, au moyen d'une pompe péristaltique, sont d'abord remplies d'eau désionisée à une vitesse constante (4 litres/heure) afin de compenser les pertes d'eau dues, par exemple, à l'électrolyse et à l'évaporation. Pendant le processus, la solution dans la cellule anodique sera spontanément enrichie en ions  $\text{H}_3\text{O}^+$ , tandis que la solution dans la cellule cathodique aura tendance à être basique et donc un dosage continu d'une solution d'acide nitrique 3,7 M doit être fourni pour maintenir, comme mentionné ci-dessus, le pH à des valeurs égales à 3.



Figure 15 : Système de contrôle du pH

Un courant constant de 0,5 A (densité de courant d'environ 80 A/m<sup>2</sup>) a été appliqué aux électrodes afin de créer une circulation de courant électrique à l'intérieur du sédiment qui provoque une séparation électrocinétique et donc la migration des polluants (voir chapitre 3 : "Technologies de traitement électrocinétique"). L'écoulement du courant provoque l'électrolyse de l'eau, qui modifie le pH du catholyte et de l'anolyte selon les réactions suivantes :



Naturellement, le catholyte, en l'absence d'"interventions", atteindrait rapidement un état de nette basicité qui conduirait à une lente désorption des contaminants présents dans le sédiment : cependant, grâce au dosage contrôlé et automatisé de la solution acide, qui est effectué lorsque le pH de l'électrolyte dépasse la valeur 3, il est possible de contrer ce processus qui augmente significativement le temps de décontamination.

Vous trouverez ci-dessous le diagramme de laboratoire pour les tests électrocinétiques.



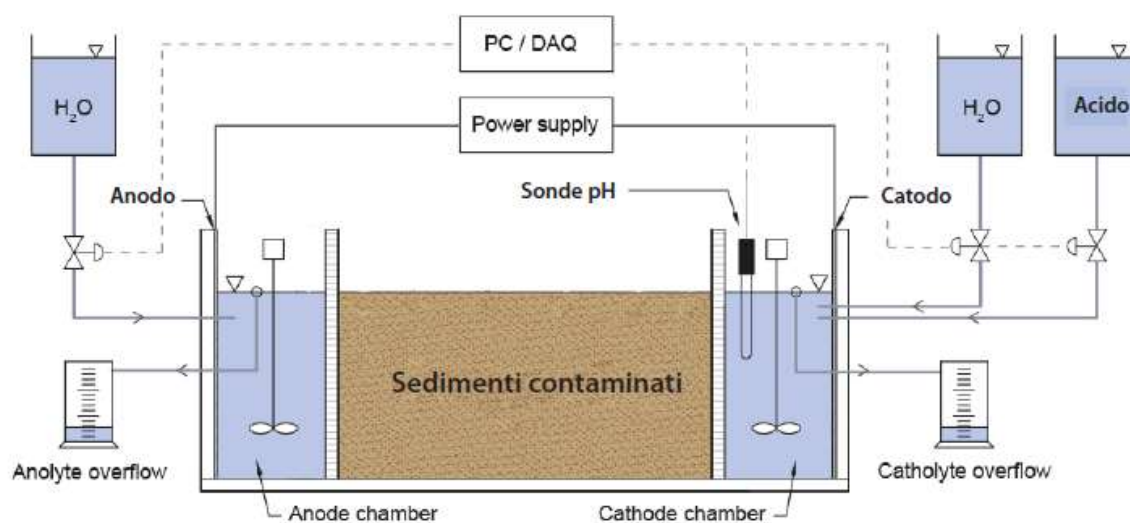


Figure 16 : Schéma de laboratoire

Il est important de souligner le développement, en particulier pendant la première phase de traitement, de quantités importantes de chlore gazeux, selon le rapport suivant :



En effet, en raison de la teneur en sel de l'eau de mer, la concentration en chlorure est assez élevée et il conviendrait de collecter et de transporter le gaz développé dans un laveur contenant une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) afin de transformer le chlore gazeux en hypochlorite.

Plus précisément, l'équipement représenté a été utilisé pour 3 expériences :

L'expérience n°1 - concernant les sédiments provenant du chantier naval Lucchini du port de Piombino - a débuté le 11 février 2019 et a duré 30 jours ;

L'expérience n°2 - concernant les sédiments provenant de la Zone du Petit Bassin du Port de Piombino - a débuté le 19 mars 2019 et a duré également 30 jours ;

L'expérience n° 3 - concernant les sédiments de la zone d'amarrage des navires du port de Piombino, réalisée en mars 2019, a débuté le 14 mai 2019, d'une durée d'au moins 60 jours et donc actuellement en service.

La première opération à effectuer lors de la mise en œuvre des essais électrocinétiques consiste à homogénéiser le sédiment à décontaminer à l'intérieur des seaux puis à le placer dans la "cellule centrale de décontamination". Ensuite, le sédiment est compacté statiquement en appliquant une pression de 40 g/cm<sup>2</sup> pendant au moins 3 jours avant le début de l'essai afin d'éliminer l'excès d'eau présente dans le matériau. Ensuite, les solutions électrolytiques sont automatiquement pompées dans les deux chambres latérales au moyen d'une pompe péristaltique et les électrodes sont connectées à un "bloc d'alimentation stabilisé" qui fonctionne en régulation de courant. Pendant l'expérience, un courant constant de 0,5 A est appliqué, ce qui produit une densité de courant de 80 A/m<sup>2</sup>. Ci-dessous se trouvent les photos des phases de préparation de l'essai EKR des sédiments provenant de la Zone du Petit Bassin du Port de Piombino.





Figure 5: Sédiments homogénéisés et mise en place dans la chambre centrale



Figure 6: Compactage des sédiments et début de l'expérience

### Critères de conception de l'installation pilote EK

La dernière partie de l'article qui suit porte sur la conception et le prototypage d'une installation pilote de décontamination électrocinétique cylindrique. L'objectif principal était d'étendre les essais à

l'échelle du laboratoire à une échelle pilote et d'essayer d'évaluer les conditions de fonctionnement de l'usine afin d'optimiser et d'affiner le traitement de décontamination pour les développements futurs.

Le projet consiste en la réalisation d'une installation pilote de forme cylindrique creuse, composée essentiellement d'une électrode unique (+) placée au centre et de six électrodes (-) placées à l'extrémité du cylindre lui-même. Cette forme particulière a été choisie de telle sorte que le flux électrique généré par l'application de courants électriques de faible intensité est dirigé radialement de la zone centrale vers la zone externe. L'objectif est de passer d'une configuration à mailles carrées/rectangulaires à une configuration à mailles hexagonales : au centre de chaque hexagone, il y a une anode (+) et à l'extrémité, 6 cathodes (-). Chacune des 6 cathodes est partagée par 3 cellules en même temps et donc le flux électrique à proximité de la cathode est le double de celui de l'anode. Les expériences à venir auront pour but de vérifier et d'étudier les effets bénéfiques possibles de la décontamination électrocinétique à l'aide d'une configuration à mailles hexagonales.

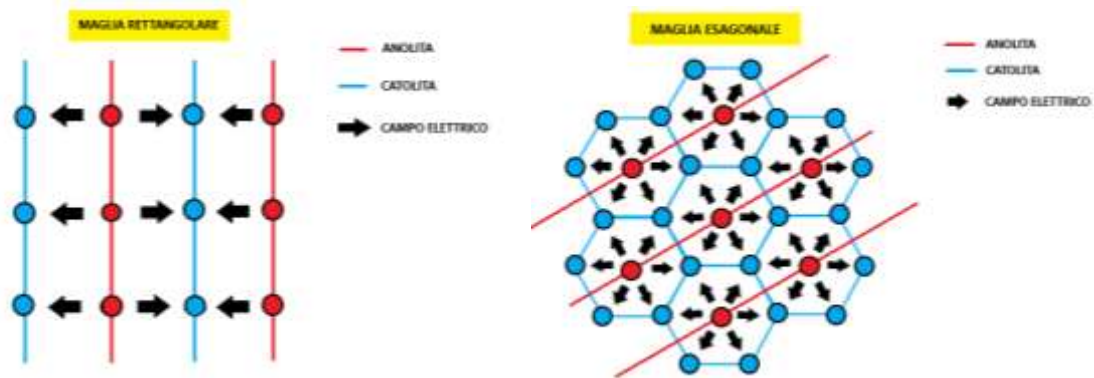


Figure 7: Différences entre mailles rectangulaires et hexagonales

Après une étude approfondie de la littérature et grâce à l'expérience acquise dans le cadre du projet Life+ Sekret, les principaux paramètres de dimensionnement peuvent être énumérés comme suit :

mobilité des ions (électromigration), des molécules d'eau (électrosmose) ou des particules chargées (électrophorèse) : exprimée en  $m^2/(V*s)$  et représente la vitesse à laquelle les ions/molécules/particules se déplacent dans une matrice solide soumise à une différence potentielle spécifique. Lagemann indique les valeurs moyennes de mobilité suivantes :

H<sup>+</sup> cations (électromigration) :  $\approx 33 \times 10^{-8} m^2/Vs$  ;

anions OH<sup>-</sup> (électromigration) :  $\approx 18 \times 10^{-8} m^2/Vs$  ;

ions métalliques (électromigration) :  $\approx 5 \times 10^{-8} m^2/Vs$

molécules d'eau (électrosmose) :  $\approx 0,5 \times 10^{-8} m^2/Vs$

particules d'argile polarisée (électrophorèse) :  $\approx$  entre 0,01 et  $0,3 \times 10^{-8} m^2/Vs$

En fait, le déplacement réel des ions métalliques est probablement plus lent que celui indiqué ci-dessus et en considérant une valeur conservatrice, une mobilité ionique égale à celle choisie pour le projet Life+ Sekret est établie, égale à  $MI=0.1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  ;

Résistivité du sol (R) : s'exprime en  $\Omega\cdot\text{m}$  et est l'inverse de la conductivité exprimée en S/m. Pour un sol normal, la résistivité varie généralement entre 10 et 1000  $\Omega\cdot\text{m}$ , pour les sédiments marins, cependant, les choses empirent : en fait, la conductivité de l'eau de mer est de  $\approx 5 \text{ S/m}$  correspondant à une résistivité de 0,2  $\Omega\cdot\text{m}$  ;

Densité maximale de courant : suite à l'expérience et aux résultats obtenus lors d'essais électrocinétiques en laboratoire, une densité de courant de 80 A/m<sup>2</sup> est fixée ;

distance entre électrodes : dans l'installation pilote conçue, la distance entre l'anode centrale et les cathodes externes est de 200 mm ;

hypothèse de dimensionnement : le dimensionnement consiste à fixer une durée maximale admissible de décontamination et sur la base de la distance entre les électrodes, la résistivité du sédiment et la densité de courant permettent de calculer la puissance nécessaire en kWh et donc le coût total de l'énergie (considérant un coût d'énergie égal à 0,3 €/kWh). La résistivité peut être augmentée en lavant les sédiments avant de commencer le traitement.

La tension est égale à  $= \text{Résistivité}[\Omega\text{m}] \cdot \text{Distance}[\text{m}] \cdot \text{Densité}[\text{A}/\text{m}^2]$  .

La puissance, calculée en kW est égale à  $= (\text{Volume}[\text{m}^3]) / (\text{Distance}[\text{m}] \cdot \text{Densité}[\text{A}/\text{m}^2] \cdot \text{Tension}[\text{V}] \cdot 1000$

## Conception de l'installation pilote EK

Les critères de conception de l'installation pilote ont déjà été définis au chapitre 4.4, auquel il convient de se référer. Le projet consiste en la réalisation d'une installation pilote de forme cylindrique creuse, choisie pour que le flux électrique généré par l'application de courants électriques de faible intensité soit dirigé radialement de la zone centrale vers la zone externe. La conception a été réalisée à l'aide du logiciel de conception mécanique Autodesk Inventor.

## Dimensionnement géométrique

L'installation pilote a été conçue pour le traitement d'une matrice solide d'un poids total d'environ 60 kg, correspondant à un cylindre creux de 100 mm d'épaisseur et de hauteur  $\approx 460 \text{ mm}$ . La hauteur de la solution électrolytique à l'intérieur du prototype a été jugée inférieure d'environ 30 mm (430 mm) au niveau du sédiment lui-même, afin d'éviter la formation d'un écoulement hydraulique de l'électrolyte à la surface du sédiment. De plus, comme dans l'installation de laboratoire, il est nécessaire de prévoir deux géotextiles qui ont pour fonction fondamentale de séparer le compartiment du sédiment des compartiments des électrodes. Le géotextile à utiliser est construit par le "BOODE waterwell system" avec une épaisseur d'environ 2 mm et est le même que celui utilisé lors du projet européen Life+ Sekret.



Figure 20. Enveloppe géotextile

Ci-dessous est présentée une image du fichier "PDF 3D" générée lors de la planification de l'installation, dans lequel les différents éléments qui composent le réacteur sont mis en évidence.

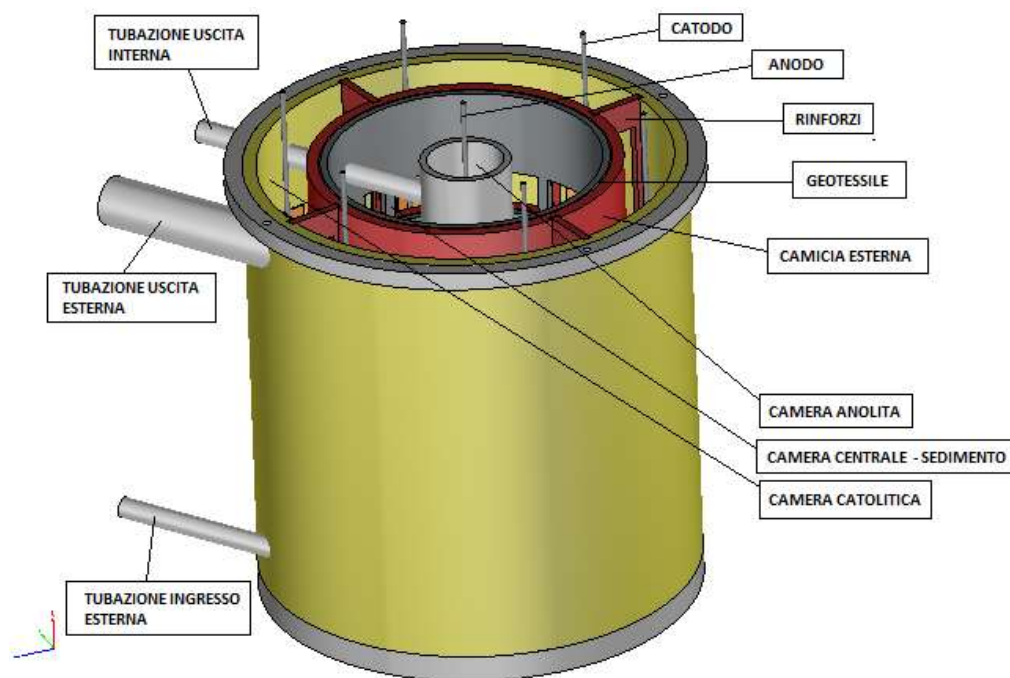


Figure 21 : Système pilote et composants individuels

Il était absolument nécessaire de concevoir une "chemise" à insérer entre le matériau à décontaminer et le compartiment extérieur du catholyte dans le but fondamental de bloquer et d'arrêter le géotextile en contact avec le sédiment lui-même, afin qu'il ne puisse pas bouger et que tout déversement de matériau soit ainsi évité. La chemise a également été munie d'une boutonnière pour permettre son insertion correcte et facile autour du boîtier cylindrique. Des trous à mailles carrées ont également été prévus sur la chemise et sur les deux composants à l'intérieur du cylindre creux : ils ont été conçus pour avoir un pourcentage de perçage d'environ 50 %. Elle n'est pas

excessive afin de ne pas compromettre la stabilité et la résistance du prototype lui-même. Afin d'améliorer la résistance du système, 4 renforts ont été prévus, également perforés pour permettre le passage de l'électrolyte, pour être logés dans la chambre externe du catholyte.

Les chambres anolite et catholyte sont en surface libre et les niveaux d'électrolyte sont maintenus constants grâce à 2 tuyaux de trop-plein. La chambre centrale (anolitique) est d'abord remplie d'eau désionisée grâce à une pompe péristaltique avec un débit fixe de 60 litres/heure (1 litre/minute), afin de permettre un bon échange d'eau à l'intérieur du département anolitique et pour compenser les pertes d'eau dues par exemple à l'électrolyse et l'évaporation. La pompe est fabriquée par "SEKO", qui conçoit des pompes doseuses et des systèmes de mesure pour les marchés du traitement des eaux et des procédés industriels. Le modèle PSH a été choisi avec un fonctionnement tout ou rien et une contre-pression de service maximale de 0,1 bar. L'annexe V contient la fiche technique de la pompe.

### **Méthodes de vérification du prototype**

Il faut garder à l'esprit le développement de quantités importantes de chlore gazeux, comme le démontrent les expériences de laboratoire, en particulier pendant les premiers jours de traitement : pour cette raison, l'usine est équipée d'un capuchon étanche dans lequel est prévu un trou de fil de gaz ¼" nécessaire pour transporter et traiter le chlore gazeux développé dans un épurateur. Un trou est également prévu sur le bouchon pour permettre le passage d'une sonde pH/température dont les valeurs seront enregistrées en temps réel par un logiciel de mesure et d'automatisation qui pilotera automatiquement une "vanne trois voies" pour le dosage de la solution acide.

La sonde de pH/température sera achetée à la société "Mettler-Toledo S.p.A." qui produit des capteurs utilisés dans les unités d'électrolyse d'importantes installations industrielles ici en Toscane. En parallèle, sera également acheté un émetteur multi-paramètres. L'achat d'un capteur pour mesurer le niveau de remplissage des chambres à l'intérieur de l'installation pilote doit également être envisagé. Ce dernier sera acheté auprès de "SICK Italia" qui est l'un des principaux fabricants de capteurs et de systèmes d'automatisation. Pour la sonde de pH/température, le modèle "NPRO4260I/SG/225" a été choisi, pour le transmetteur, le modèle "M300 PROCESS 2-CH, 1/4 DIN" a été choisi et pour le capteur de niveau, le modèle "LFP0500-A4NMB". Les annexes VII/VIII/IX contiennent les fiches techniques correspondantes.

Enfin, il est nécessaire de créer un logiciel personnalisé pour l'acquisition de ces capteurs et pour le contrôle du processus dans Labview, l'affichage sur un graphique, le réglage des points de consigne et la sauvegarde des données dans un fichier. Le système numérique sera développé et fourni par "Florence Engineering S.r.l.", une société spécialisée dans la résolution de problèmes liés à l'ingénierie électronique.

### **Le concept de l'amélioration de la mise en décharge**

L'enfouissement est un procédé de traitement des sédiments dragués qui peut être correctement défini comme étant sur le site puisqu'il consiste à placer les sédiments dragués dans un bassin confiné et scellé à la base. Les sédiments sont répartis sur toute la surface du bassin avec une épaisseur qui varie en fonction de la capacité technique des machines agricoles qui peuvent les traiter. Par conséquent, l'épaisseur est généralement inférieure à un mètre. Les sédiments sont



ensuite déplacés régulièrement pour assurer une oxygénation adéquate de ces derniers. En effet, l'enfouissement consiste à favoriser les processus biodégradables au détriment de l'écologie microbienne des sédiments eux-mêmes, avec un intérêt particulier pour les processus oxydatifs. Une plante de bordure de champ doit donc assurer le bon équilibre entre les nutriments du système et le transfert de l'oxygène aux populations microbiennes. Cela se fait généralement en mélangeant le matériau et en ajoutant des macroéléments tels que l'azote et le phosphore et des agents appropriés (agents de charge) pour faciliter l'échange de gaz dans une matrice, autrement à grains fins et réfractaires aux échanges gazeux, qu'il s'agisse d'oxygène ou de produits volatils éventuellement produits par la dégradation des contaminants primaires. En outre, une teneur en humidité et un pH appropriés de la matrice sous traitement doivent être maintenus, ce qui est en fait une condition préalable à l'activité métabolique microbienne. Les temps de séjour dans l'installation sont variables en fonction de la nature et de la concentration du polluant et des conditions environnementales.

L'amélioration de l'enfouissement consiste à inoculer à la matrice des isolats microbiens, qu'il s'agisse de bactéries ou de champignons, d'autochtones ou d'allochtones, qui présentent des activités métaboliques intéressantes, comme la capacité de dégrader les contaminants primaires des sédiments sous traitement.

Dans le cas spécifique du projet, les sédiments seront inoculés avec la souche de champignon *Sclerotinia* sp. MUT 5852, qui s'est déjà révélée capable de réduire significativement la teneur en TPH dans des expériences mésocosmiques dédiées à la modélisation d'installations d'enfouissement pour le traitement des sols et des sédiments de dragage des rivières, contaminés par des hydrocarbures lourds (Syracuse, 2018, Becarelli 2019).

L'expérimentation prévoit l'inoculation de la biomasse fongique à un pourcentage en poids de fraises de 10% dans les mésocosmes expérimentaux.

L'expérimentation du mésocosme implique la préparation de 3 vaisseaux par temps d'analyse dans deux trains de traitement : l'un inoculé avec le champignon candidat : une culture améliorée et l'autre non inoculé : une culture de terre, contenant un sédiment corrigé dans le rapport des macronutriments au rapport spécifique 100:10:1 respectivement de C:N:P et sali avec 10% en poids de matière lignocellulosique (copeaux de bois).

Un total de 18 mésocosmes est ensuite obtenu, maintenu en l'absence de lumière directe à température ambiante et homogénéisé une fois par semaine, avec correction de la teneur en eau, initialement corrigée à 80% de la capacité maximale de rétention d'eau, par pesée sur une balance de précision.

Le poids initial de chaque mésocosme individuel a été corrigé à 460 g, l'expérience a débuté le 28 juin 2019 et s'est terminée le 28 juillet 2019.

Ci-dessous des images relatives à la préparation des mésocosmes sont présentées.





---

#### 4. Bibliographie

Iannelli, R., M. Masi, A. Ceccarini, M. Ostuni, R. Lageman, A. Muntoni, D. Spiga, A. Poletti, A. Marini, and R. Pomi (2015). "Electrokinetic remediation of metal-polluted marine sediments: experimental investigation for plant design". In: *Electrochimica Acta* 181, pp. 146–159. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.04.093.

Iannelli, R., M. Masi, and A. Ceccarini (2016). "Gestione e trattamento degli elettroliti nella bonifica elettrocinetica di matrici contaminate da metalli pesanti". In: *Ingegneria dell'Ambiente* 3.2, pp. 140–152. DOI: 10.14672/ida.v3i2.466.

ICRAM (2006). Progetto preliminare di bonifica dell'area marina inclusa nella perimetrazione del sito di bonifica di interesse nazionale di Livorno. Tech. rep., p. 134.

Lageman, R and WPool (2009). "Experiences with field applications of electrokinetic remediation". In: *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater*, C. Cameselle and K. R. Reddy. John Wiley & Sons, Inc., pp. 697–717. DOI: 10.1002/9780470523650.ch7.

Lageman, R, W Pool, and G. A. Seffinga (1989). "In-Situ Bodensanierung durch elektrokinetischen Schadstofftransport". In: *Sanierung kontaminierter Standorte*. Ed. by E. S. Verlag. Vol. 33. *Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis*. Berlin, Germany, pp. 255–282.

Masi, M. and R. Iannelli (2015). "Trattamento elettrocinetico di sedimenti di dragaggio portuale contaminati da metalli pesanti: il progetto life+ "SEKRET"". In: *Ingegneria dell'Ambiente* 2.2, pp. 45–58. DOI: 10.14672/ida.v2i2.334.