



Projet SEDITERRA (N°CUP : I42F17000010006)



COMPOSANTE T2 - PILOTE DE TRAITEMENTS DES SÉDIMENTS ET ESSAIS DE VALORISATION

COMPONENTE T2 - TRATTAMENTI PILOTA FINALIZZATI ALLA VALORIZZAZIONE DEI SEDIMENTI

LIVRABLE T2.1.1 : RAPPORT DE SYNTHÈSE DES CARACTÉRISATIONS CROISÉES DES SÉDIMENTS

DELIVERABLE T2.1.1 : CARATTERIZZAZIONE INCROCIATA DEI SEDIMENTI



<p>Nom du livrable :</p> <p>Nome del deliverable :</p>	<p>Rapport de synthèse des caractérisations croisées des sédiments</p> <p>Caratterizzazione incrociata dei sedimenti</p>
<p>Rédigé par : (partie française)</p>	<p>Emmanuel Vernus (PROVADEMSE/INSA) Mohamed Abdelghafour (PROVADEMSE/INSA) Christine Bazin (PROVADEMSE/INSA)</p>
<p>Redatto da : (partie italienne)</p>	<p>Enrichetta Barbieri (ISPRA Livourne) Fabiano Pilato (ISPRA Livourne) Salvatore Pistis (Regione Autonoma Della Sardegna)</p>
<p>Mise en forme – Compilation / Formattazione finale – Compilazione</p>	<p>Erwan Tessier (INSA de Lyon)</p>
<p>Validé par : Validato da :</p>	<p>Ilaria Tivolle (CD83) Jacques Méhu (INSA de Lyon) David Pellegrini (ISPRA Livourne)</p>

ANNÉE 2017 / ANNO 2017

ORGANISATION DU DOCUMENT :

RÉSUMÉS DES CONTRIBUTIONS EN FRANÇAIS ET EN ITALIEN

CONTRIBUTION FRANÇAISE INTÉGRALE (en français)

CONTRIBUTION ITALIENNE INTÉGRALE (en français)

CONTRIBUTION FRANÇAISE INTÉGRALE (en italien)

CONTRIBUTION ITALIENNE INTÉGRALE (en italien)

ORGANIZZAZIONE DEL DOCUMENTO :

RIASSUNTO DEI CONTRIBUTI IN FRANCESE E ITALIANO

CONTRIBUTO FRANCESE INTEGRALE (in francese)

CONTRIBUTO ITALIANO INTEGRALE (in francese)

CONTRIBUTO FRANCESE INTEGRALE (in italiano)

CONTRIBUTO ITALIANO INTEGRALE (in italiano)

SOMMAIRE / SOMMARIO

I.	RÉSUMÉ CONTRIBUTION FRANÇAISE	5
II.	RÉSUMÉ CONTRIBUTION ITALIENNE	7
III.	RIASSUNTO DEL CONTRIBUTO FRANCESE	12
IV.	RIASSUNTO DEL CONTRIBUTO ITALIANO	14
V.	CONTRIBUTION FRANÇAISE INTÉGRALE	18
5.1)	PROCÉDURE FRANÇAISE DE CARACTÉRISATION PRÉALABLE	19
5.2)	CARACTÉRISATION COMPLÉMENTAIRE DE L'INFLUENCE DU PH EN CONDITIONS STATIONNAIRES SUR LE COMPORTEMENT A LA LIXIVIATION NF EN 14 429	45
VI.	CONTRIBUTION ITALIENNE INTÉGRALE	64
6.1)	INTRODUCTION	65
6.2)	PHASE D'ÉCHANTILLONNAGE DES SÉDIMENTS	65
6.3)	PHASE DE CARACTÉRISATION ANALYTIQUE	67
6.4)	RÉSULTATS DE L'ANALYSE ÉCOTOXICOLOGIQUE	97
6.5)	PHASE DE CARACTÉRISATION GEOTECHNIQUE	99
VII.	CONTRIBUTO FRANCESE INTEGRALE	135
7.1)	PROCEDURA FRANCESE DI CARATTERIZZAZIONE PRELIMINARE	136
7.2)	CARATTERIZZAZIONE COMPLEMENTARE DELL'INFLUENZA DEL PH IN CONDIZIONI STAZIONARIE SUL COMPORTAMENTO ALLA LISCIVIAZIONE SECONDO LA NORMA EN 14 429	161
VIII.	PRODOTTO ITALIANO INTEGRALE	168
8.1)	INTRODUZIONE	170
8.2)	FASE DI CAMPIONAMENTO DEI SEDIMENTI	170
8.3)	FASE DI CARATTERIZZAZIONE ANALITICA	171
8.4)	RISULTATI ANALISI ECOTOSSICOLOGICHE	202
8.5)	FASE DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	204

I. RÉSUMÉ CONTRIBUTION FRANÇAISE

Ce rapport présente les résultats de l'application des procédures de caractérisation applicables en France dans le cadre de l'identification des conditions de gestion des sédiments dragués.

Ces analyses et essais ont été appliqués à des échantillons de sédiments de six provenances différentes sur la zone Marittimo, la plupart de ces sites de prélèvement ayant fait l'objet de trois prélèvements distincts. Au total 16 échantillons de sédiments ont été prélevés en vue de leur caractérisation.

Deux sites de prélèvement sont situés en France (Centuri en Corse et Toulon dans le Var) et quatre sites de prélèvement sont situés en Italie (Cagliari, Pise, Gènes, Livourne).

La France applique, *a priori*, pour les sédiments gérés à terre, la règle générale de définition du caractère dangereux ou non des déchets, issue de la transcription en droit français de la Directive européenne 2008/98/CE du 19 novembre 2008.

La caractérisation physico-chimique et écotoxicologique des sédiments des six provenances différentes, réalisée selon la démarche actuellement en vigueur en France, montre que cinq sédiments sur les six échantillons testés présentent les caractéristiques d'un déchet dangereux vis-à-vis de la propriété de danger HP14 « Écotoxique » *. Ainsi, seul l'échantillon « Toulon » pourrait faire l'objet d'une valorisation sans traitement préalable, la valorisation des autres sédiments nécessite une opération de traitement permettant de supprimer le caractère dangereux HP14.

Ces résultats, bien que cohérents avec ceux obtenus par l'ISPRA selon la procédure italienne, restent néanmoins surprenant au regard des données de caractérisation écotoxicologiques des sédiments recensés au niveau national français qui évaluent à 8,5% le nombre de cas de sédiments marins qui pourraient être classés comme dangereux sur la base de leurs caractéristiques écotoxicologiques.

On notera toutefois la singularité de la composition en métaux et en composés organiques de certains de ces sédiments qui peut expliquer, pour partie au moins, les niveaux d'écotoxicité supérieurs observés pour les échantillons de SEDITERRA.

L'application aux sédiments des six provenances du protocole d'essai de lixiviation européen EN 12457-2 permet de positionner ces sédiments vis-à-vis des conditions d'acceptabilité en installation de stockage d'une part et de valorisation en technique routière d'autre part.

Les six sédiments se situent tous dans la catégorie des déchets potentiellement admissibles en Installation de stockage de déchets non dangereux mais non admissibles directement en Installation de stockage de déchets inertes. Sous réserve de vérification de leur variabilité, les six sédiments de SEDITERRA sont conformes au niveau 1 de caractérisation environnementale des matériaux alternatifs utilisés en technique routière.

L'application de l'essai européen de percolation en colonne CEN/TS 14405 aux quatre sédiments sélectionnés pour des essais de valorisation (Toulon, Centuri, Cagliari, Livourne) montre qu'aucun des quatre sédiments sélectionnés n'est conforme, en l'état, aux conditions du niveau 2 de caractérisation environnementale pour une utilisation en technique routière. Néanmoins, le guide SETRA 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.

Enfin, les essais complémentaires de caractérisation du comportement à la lixiviation des sédiments sous l'influence du pH, réalisés selon le protocole européen EN 14429 montrent que les quatre échantillons testés présentent tous une sensibilité à un contexte basique ce qui doit conduire à une vigilance particulière quant au risque de solubilisation d'éléments contenus dans les sédiments lorsqu'ils sont incorporés dans des matériaux à base de liants hydrauliques ou pouzzolaniques.

**** : UNE ANALYSE ULTÉRIEURE SUR SÉDIMENTS FRAIS (réalisée après la rédaction de ce document) A FINALEMENT INFIRMÉ CES 1^{ÈRES} CONCLUSIONS AVEC L'INTÉGRALITE DES SÉDIMENTS CLASSÉS NON-DANGEREUX SELON L'ESSAI HP14***

II. RÉSUMÉ CONTRIBUTION ITALIENNE

Le livrable T2.1.1 constitue le rapport de synthèse des activités de caractérisation environnementale et géotechnique préliminaire des sédiments prélevés dans les ports de Toulon, Gênes, Livourne et Centuri (Corse), dans le canal « Navicelli », qui relie Pise à Livourne, et dans le port de Cagliari.

Le but de la caractérisation était de définir la qualité des matériaux afin d'évaluer leur utilisation potentielle en tant que matières premières secondaires et d'établir les quantités de sédiments destinés aux activités pilotes ultérieures de traitement et de valorisation.

La phase d'échantillonnage et la phase de caractérisation analytique des paramètres physico-chimiques et écotoxicologiques des sédiments ont été réalisées simultanément par les laboratoires de l'ISPRA et de l'INSA de manière croisée et partagée.

Le document italien présente les méthodes et les résultats analytiques obtenus par les partenaires italiens, tandis qu'une annexe séparée fournit un tableau récapitulatif des résultats obtenus dans les 2 pays.

Phase d'échantillonnage : Dans chacun des 6 sites portuaires associés au projet SEDITERRA, 3 points d'échantillonnage différents ont été identifiés (à l'exception du port de Gênes où un seul échantillon a été prélevé), à partir desquels des aliquotes de matière homogénéisée ont été collectées et envoyées aux laboratoires de l'ISPRA, de l'INSA et au Service géologique de la ville métropolitaine de Cagliari.

Les campagnes d'échantillonnage se sont déroulées dans l'ordre chronologique suivant :

- PORT DE CENTURI => 29-30/05/2017
- PORT DE TOULON => 06/06/2017
- ZONE DE DÉPÔTS DU PORT DE CAGLIARI => 07/06/2017
- CANAL DES NAVICELLI – PISE => 08/06/2017
- PORT DE GÊNES => 26/06/2017
- ZONE DE DÉPÔTS DU PORT DE LIVOURNE => 29/06/2017

Les quantités pour analyse ont été choisies en fonction des activités analytiques prévues et envoyées avec une documentation transfrontalière conformément au *Règlement (CE) n°1013/2006 du Parlement européen et du Conseil du 14 juin 2006*.

Phase de caractérisation analytique : Les laboratoires de l'ISPRA ont réalisé, sur chacun des échantillons prélevés, des analyses physico-chimiques et éco-toxicologiques. Plus précisément, les analyses prévues sur les 16 échantillons de sédiments se sont déroulées comme suit :

- Le laboratoire de Livourne a déterminé les concentrations en métaux lourds (Hg, Cd, Pb, As, Cr tot, Cu, Ni, Zn, Al, V, Nn, Fe) et en substances organiques, et a effectué des analyses granulométriques et des tests éco-toxicologiques (cible marine) avec l'oursin violet *Paracentrotus lividus* et avec l'algue *Pheodactylum tricornutum*
- Le laboratoire de Rome a effectué les tests biologiques avec la bactérie luminescente *Vibrio fischeri*(Microtox®) en phase solide
- Le laboratoire de Chioggia a déterminé les concentrations de TBT et composés organostanniques
- Le laboratoire d'Ancône a déterminé les concentrations en HAP, PCB et hydrocarbures

Le LIVRABLE T2.1.1 : RAPPORT DE SYNTHÈSE DE CARACTÉRISATION PRÉALABLE présente les résultats analytiques obtenus pour chaque paramètre physico-chimique et écotoxicologique étudié.

Le bilan des données physico-chimiques et biologiques qui ont permis d'identifier les zones de prélèvement de sédiments destinés aux phases ultérieures de traitement et valorisation pilotes sont reportés ci-dessous :

Site de prélèvement retenu	Paramètres critiques (Selon le référentiel règlementaire italien et/ou les caractéristiques standard des sites portuaires)
CENTURI 1	TBT : 355 ng TBT g⁻¹ (d.w.) Indice Hydrocarbure (C10-C40) : 120,77 µg/g (p.s.) Test développement embryonnaire oursin de mer <i>Paracentrotus lividus</i> : toxicité HAUTE
LIVORNO 1	Indice Hydrocarbure (C10-C40) : 33,75 µg/g (p.s.) Test développement embryonnaire oursin de mer <i>Paracentrotus lividus</i> : toxicité MOYENNE
CAGLIARI 1	Contamination par : Zinc, Cadmium, Plomb Indice Hydrocarbure (C10-C40) : 127,99 µg/g (p.s.) Test développement embryonnaire oursin de mer <i>Paracentrotus lividus</i> : toxicité HAUTE
TOLONE 1	Contamination par : Nickel Indice Hydrocarbure (C10-C40) : 92,19 µg/g (p.s.) ΣHAP: 1278,86 ng/g (p.s.)
NAVICELLI 1	Contamination par : Chrome, Zinc, Cuivre, Cadmium TBT : 1180ng TBT g⁻¹ (d.w.) Indice Hydrocarbure (C10-C40) : 204,20 µg/g (p.s.) ΣHAP : 906,69 ng/g (p.s.) Test développement embryonnaire oursin de mer <i>Paracentrotus lividus</i> : toxicité TRES HAUTE Test MTX <i>Vibrio fisheri</i> : toxicité MOYENNE
GENOVA	Indice Hydrocarbure (C10-C40) : 63,81 µg/g (p.s.) ΣHAP: 144,58 ng/g (p.s.) Test développement embryonnaire oursin de mer <i>Paracentrotus lividus</i> : toxicité MOYENNE

Phase de caractérisation géotechnique : Dans cette partie les normes techniques françaises et italiennes qui régissent l'évaluation de la qualité des sols ont été rapportées à leur utilisation éventuelle dans la construction ou l'entretien d'ouvrages routiers.

Sur la base des caractéristiques des sédiments, les essais nécessaires ont été réalisés pour parvenir à la « *classification selon nature* » de la norme française NF P11-300 et de la classification italienne CNR UNI 10006.

Les analyses ont été effectuées par le Laboratoire géotechnique du service géologique de la ville métropolitaine de Cagliari, tiers conventionné de la région Sardaigne dans le projet SEDITERRA.

Pour chaque échantillon, la courbe granulométrique a été reconstituée et la sensibilité à l'eau a été évaluée à travers la détermination des limites de consistance (limite de liquidité, limite de plasticité) et le calcul de l'indice de plasticité (IP) et de l'indice de groupe (IG).

Les normes NF P11-300 et CNR UNI 10006 ont permis de formuler un avis d'aptitude, dans le domaine routier, des sédiments prélevés dans les différents ports.

Les conditions de « compactibilité » (optimum Proctor) de chacun des échantillons ont été évaluées au moyen de l'essai Proctor modifié (AASHO mod.). La courbe du pourcentage humidité/densité sèche a été reconstituée pour chaque échantillon et la valeur de densité sèche maximale/% d'humidité optimal a été évaluée.

L'indice de portance CBR des différents échantillons a été déterminé sur chacune des éprouvettes Proctor. En plus de la valeur CBR% en corrélation avec la valeur de densité Proctor modifié maximale, une mesure de la portance pour différents pourcentages d'humidité absorbée par le sol a été effectuée.

L'ensemble des données analytiques obtenues sur la base des classifications françaises et italiennes est regroupé dans des tableaux comparatifs présentés en annexe à ce document. Les tables de synthèse des données géotechniques, l'évaluation de la qualité géotechnique des échantillons individuels, et la documentation photographique des phases d'échantillonnage et de tests sont également répertoriés.

Le tableau ci-après présente la synthèse du classement géotechnique des sédiments analysés :

LOCALISATION	NF P11 - 300	CNR UNI 10006	Evaluation CNR UNI 10006	Classifiés comme utilisables pour route et couche de forme NF P11- 300
PORT DE TOULON 1	A1	A4	MEDIOCRE	NON
PORT DE TOULON 2	A1	A4	MEDIOCRE	NON
PORT DE TOULON 3	A1	A4	MEDIOCRE	NON
PORT DE GENES	B1	A2-4	BON	OUI
CANAL NAVICELLI PISE-LIVOURNE 1	A1	A7-5	MAUVAIS	NON
CANAL NAVICELLI PISE-LIVOURNE 2	A1	A4	MEDIOCRE	NON
CANAL NAVICELLI PISE-LIVOURNE 3	A2	A7-5	MAUVAIS	NON
CENTURI 1 (Corse)	D1	A3	BON	OUI
CENTURI 2 (Corse)	D1	A1-b	BON /EXCELLENT	OUI
CENTURI 3 (Corse)	D1	A1-b	BON / EXCELLENT	OUI
PORT DE LIVOURNE 1	A1 h	A4	MEDIOCRE	NON
PORT DE LIVOURNE 2	B5 h	A1-b	BON / EXCELLENT	OUI
PORT DE LIVOURNE 3	A1	A4	MEDIOCRE	NON
PORT CAGLIARI 1	B5	A2-4	BON	OUI
PORT CAGLIARI 2	B5	A2-4	BON	OUI
PORT CAGLIARI 3	A1	A4	MEDIOCRE	NON

III. RIASSUNTO DEL CONTRIBUTO FRANCESE

Questo documento presenta i risultati delle procedure di caratterizzazione applicabili in Francia nel quadro dell'identificazione delle condizioni di gestione dei sedimenti dragati.

Sono state effettuate analisi e saggi ecotossicologici a campioni di sedimento provenienti da 6 diverse zone dell'area del Marittimo, da ognuno dei quali (ad eccezione del porto di Genova in cui è stato prelevato un unico campione) sono stati prelevati tre campioni distinti. In totale sono stati raccolti 16 campioni di sedimento da caratterizzare.

Due siti di prelievo sono situati in Francia (Centuri in Corsica e Tolone nel Var) e quattro siti di prelievo sono situati in Italia (Cagliari, Pisa, Genova e Livorno).

In Francia i sedimenti gestiti a terra sono considerati rifiuti, pertanto si applica la definizione di carattere pericoloso o non pericoloso dei rifiuti, derivante dal recepimento della Direttiva europea 2008/98/CE del 19 novembre 2008.

La caratterizzazione fisico-chimico ed ecotossicologica dei campioni provenienti dai 6 porti, realizzata secondo l'approccio in vigore in Francia, mostra che in cinque siti su sei i campioni presentano le caratteristiche di un rifiuto pericoloso, con il livello di pericolo HP14 « Ecotossico ». Pertanto solo il campione "Tolone" potrebbe essere oggetto di una valorizzazione senza ricorso al trattamento preliminare, la valorizzazione degli altri sedimenti necessita, invece, di un'operazione di trattamento che abbatta le caratteristiche di pericolosità HP14.

Questi risultati, benché coerenti con quelli ottenuti da ISPRA secondo la procedura italiana, appaiono comunque sorprendenti rispetto ai dati relativi alla caratterizzazione ecotossicologica dei sedimenti censiti a livello nazionale francese, che stimano solo l'8,5% dei casi di sedimenti marini classificabili come pericolosi.

Tuttavia, la singolarità della composizione in metalli e in composti organici di alcuni di questi sedimenti può spiegare, almeno in parte, i livelli di ecotossicità superiori osservati per i campioni di SEDITERRA.

L'applicazione del protocollo del test di lisciviazione europea EN 12457-2 permette di collocare i sedimenti caratterizzati in un deposito di stoccaggio o di essere valorizzati per la costruzione di strade.

I sei sedimenti si collocano tutti nella categoria dei rifiuti potenzialmente ammissibili in deposito di stoccaggio di rifiuti non pericolosi ma non ammissibili direttamente in un deposito di stoccaggio di rifiuti inerti. Previa verifica della loro variabilità, i sei sedimenti di SEDITERRA sono conformi al livello 1 di caratterizzazione ambientale dei materiali alternativi utilizzati nella costruzione di strade.

L'applicazione del test europeo di percolazione nella colonna CEN/TS 14405 ai quattro sedimenti selezionati per i test di valorizzazione (Tolone, Centuri, Cagliari, Livorno) mostra che nessuno dei quattro sedimenti è conforme alle condizioni della caratterizzazione ambientale di livello 2 per un utilizzo nella costruzione di strade. Tuttavia, la guida SETRA lascia la possibilità di giustificare l'accettabilità dei sedimenti nella costruzione stradale sulla base di uno studio specifico che richiede la realizzazione di lisimetri o piastre di prova.

Infine, i test complementari per caratterizzare il comportamento di lisciviazione dei sedimenti sotto l'influenza del pH, realizzati secondo il protocollo europeo EN 14429, mostrano che i quattro campioni testati presentano tutti una sensibilità ad un contesto basico, che deve indurre ad una vigilanza particolare per quanto riguarda il rischio di solubilizzazione degli elementi contenuti nei sedimenti quando sono incorporati in materiali a base di leganti idraulici o pozzolanici.

**** ULTERIORI ANALISI SUI SEDIMENTI FRESCHI (EFFETTUATA DOPO LA REDAZIONE DEL PRESENTE DOCUMENTO) ALLA FINE HA RIBALTATO I RISULTATI INIZIALI CON LA TOTALITÀ DEI SEDIMENTI CLASSIFICATI COME NON PERICOLOSI SECONDO IL HP 14 TEST.***

IV. RIASSUNTO DEL CONTRIBUTO ITALIANO

Il documento “*Livrable T2.1.1 - RAPPORT DE SYNTHÈSE DE CARACTERISATION PREALABLES*” costituisce il rapporto di sintesi delle attività di caratterizzazione ambientale e geotecnica preliminare dei sedimenti prelevati in ciascun porto interessato dal progetto Sediterra, condotte al fine di individuare i quantitativi di sedimento da avviare alle successive attività pilota di trattamento e recupero.

La *fase di campionamento* e la *fase di caratterizzazione analitica* dei sedimenti sono state effettuate contestualmente dagli operatori di ISPRA ed INSA in maniera condivisa ed incrociata.

Il documento riporta le metodiche analitiche utilizzate e la totalità dei risultati analitici ottenuti dai partner italiani, mentre in Appendice viene fornita la tabella riepilogativa dei risultati ottenuti dagli Istituti italiani e francesi.

Fase di campionamento

I 6 siti portuali presi in considerazione dal progetto Sediterra sono: Livorno, Cagliari, Pisa (Navicelli), Tolone e Centuri.

In ciascuno dei 6 siti portuali sono stati individuati 3 differenti punti di campionamento (ad eccezione del porto di Genova dove è stato prelevato un unico campione) da ciascuno dei quali sono state prelevate aliquote di materiale opportunamente omogeneizzato e da destinarsi ai laboratori di ISPRA, INSA E Servizio Geologico di Cagliari.

I quantitativi sono stati scelti in funzione delle attività analitiche previste e spediti con documentazione transfrontaliera ai sensi del *Règlement (CE) n°1013/2006 du Parlement européen et du Conseil du 14 juin 2006*.

Le campagne di campionamento si sono svolte nel seguente ordine cronologico :

Porto di Centuri => 29-30/05/2017

Porto di Toulon => 06/06/2017

Vasca di colmata del porto di Cagliari => 07/06/2017

Canale dei Navicelli - Pisa => 08/06/2017

Porto di Genova => 26/06/2017

Vasca di colmata del porto di Livorno => 29/06/2017

Fase di caratterizzazione ambientale

Nei laboratori ISPRA, su ciascun campione raccolto sono state condotte analisi chimico-fisiche e eco tossicologiche. In particolare le analisi previste sui n. 16 campioni di sedimento sono state le seguenti :

- nei laboratori di **Livorno** sono state determinate le concentrazioni dei metalli pesanti (Hg, Cd, Pb, As, Cr tot, Cu, Ni, Zn, Al, V, Nn, Fe) e sostanza organica; sono stati eseguiti analisi granulometrica e saggi ecotossicologici con il riccio di mare *Paracentrotus lividus* e con l'alga *Pheodactylum tricornutum*;
- nei laboratori di **Roma** è stato eseguito il saggio biologico con il batterio luminescente *Vibrio fischeri* (Microtox®) su fase solida;
- nei laboratori di **Chioggia** sono state determinate le concentrazioni di TBT e composti organostannici;
- nei laboratori di **Ancona** sono state determinate le concentrazioni di IPA, PCB e idrocarburi.

Nel **LIVRABLE T2.1.1: RAPPORT DE SYNTHÈSE DE CARACTÉRISATION PRÉALABLES** si riporta la totalità dei risultati analitici ottenuti per ogni parametro chimico-fisico ed ecotossicologico indagato, ma in estrema sintesi riportiamo gli elementi chimico-fisici e biologici che hanno permesso di individuare i **siti di prelievo** dei sedimenti da avviare alle successive attività di decontaminazione e valorizzazione :

Siti di prelievo scelti	Parametri risultati critici (rispetto a riferimenti normativi e/o caratteristiche standard di siti portuali)
CENTURI 1	TBT: 355 ng TBT g ⁻¹ (d.w.) Indice HC (C10-C40): 120,77 µg/g (p.s.) Test sviluppo embrionale del Riccio di mare <i>Paracentrotus lividus</i> : tossicità' ALTA
LIVORNO 1	Indice HC (C10-C40): 33,75 µg/g (p.s.) Test sviluppo embrionale del Riccio di mare <i>Paracentrotus lividus</i> : tossicità' MEDIA
CAGLIARI 1	Contaminazione da Zinco, Cadmio, Piombo. Indice HC (C10-C40): 127,99 µg/g (p.s.) Test sviluppo embrionale del Riccio di mare <i>Paracentrotus lividus</i> : tossicità' ALTA
TOLONE 1	Contaminazione da Nichel. Indice HC (C10-C40): 92,19 µg/g (p.s.) ΣIPA: 1278,86 ng/g (p.s.)
NAVICELLI 1	Contaminazione da Cromo, Zinco, Rame, Cadmio. TBT: 1180ng TBT g ⁻¹ (d.w.): Indice HC (C10-C40): 204,20 µg/g (p.s.) ΣIPA: 906,69 ng/g (p.s.) Test sviluppo embrionale del Riccio di mare <i>Paracentrotus lividus</i> : tossicità' MOLTO ALTA Test MTX <i>Vibrio fischeri</i> : Tossicità MODERATA
GENOVA	Indice HC (C10-C40): 63,81 µg/g (p.s.) ΣIPA: 144,58 ng/g (p.s.) Test sviluppo embrionale del Riccio di mare <i>Paracentrotus lividus</i> : tossicità' MODERATA

Fase di caratterizzazione geotecnica

Nella parte dedicata alla caratterizzazione geotecnica sono state confrontate le norme tecniche francesi e quelle italiane che regolano la valutazione della qualità delle terre in rapporto al loro possibile utilizzo nella costruzione o manutenzione di opere stradali.

Sulla base delle caratteristiche dei sedimenti sono state eseguite le prove necessarie alla “*classification selon nature*” della normativa francese NF P11-300 e alla classificazione italiana CNR UNI 10006.

Le analisi sono state effettuate presso il Laboratorio Geotecnico del Servizio Geologico della Città Metropolitana di Cagliari, partner della Regione Sardegna.

Per ciascun campione è stata ricostruita la curva granulometrica e valutata la “suscettività all'acqua” attraverso la determinazione dei limiti di consistenza (Limite di Liquidità; Limite di Plasticità), il calcolo dell'Indice di Plasticità (IP) e dell'indice di Gruppo (IG).

Utilizzando la NF P11-300 e la CNR UNI 10006 è stato formulato un giudizio di utilizzabilità, in campo stradale, dei sedimenti prelevati nei differenti porti.

Le condizioni di “costipabilità” (optimum proctor) dei singoli campioni sono state valutate attraverso la prova Proctor nella modalità modificata (AASHO mod.). Per ciascun campione è stata ricostruita la curva % umidità – densità secca e stimato il valore di densità secca massima/umidità% ottima.

La determinazione dell'indice di portanza CBR, di ogni campione, è stata effettuata su ciascuno dei provini Proctor. Si dispone in questo modo, oltre che del valore CBR% in corrispondenza del valore di densità massima Proctor mod., anche di una misura della portanza per differenti % umidità possedute dal terreno.

In allegato al documento “Livabile T2.1.1” sono riportati i dati analitici raggruppati in tabelle di raffronto secondo le classificazioni francese e italiana, i certificati di prova, il giudizio sulla qualità geotecnica dei singoli campioni sulla base dei criteri NF P11 -300 e CNR UNI 10006, la documentazione fotografica delle fasi di campionamento e di prova e le tabelle di raffronto tra le analisi condotte da ISPRA e da INSA –PROVADEMSE.

Nella tabella che segue la sintesi dei risultati :

UBICAZIONE	NF P11 - 300	CNR UNI 10006	Giudizio CNR UNI 10006	Classificabili come utilizzabili per rilevati e couche de forme NF P11- 300
PORTO DI TOLONE 1	A1	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO DI TOLONE 2	A1	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO DI TOLONE 3	A1	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO DI GENOVA	B1	A2-4	BUONO	SI
CANALE NAVICELLI PISA-LIVORNO 1	A1	A7-5	SCADENTE	NO
CANALE NAVICELLI PISA-LIVORNO 2	A1	A4	MEDIOCRE	NO
CANALE NAVICELLI PISA-LIVORNO 3	A2	A7-5	SCADENTE	NO
CORSICA 1	D1	A3	BUONO	SI
CORSICA 2	D1	A1-b	BUONO/OTTIMO	SI
CORSICA 3	D1	A1-b	BUONO/OTTIMO	SI
PORTO LIVORNO 1	A1 h	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO LIVORNO 2	B5 h	A1-b	BUONO/OTTIMO	SI
PORTO LIVORNO 3	A1	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO CANALE CAGLIARI 1	B5	A2-4	BUONO	SI
PORTO CANALE CAGLIARI 2	B5	A2-4	BUONO	SI
PORTO CANALE CAGLIARI 3	A1	A4	MEDIOCRE	NO

V. CONTRIBUTION INTÉGRALE FRANCAISE

SOMMAIRE :

5.1)	PROCÉDURE FRANÇAISE DE CARACTÉRISATION PRÉALABLE	19
5.1.1)	<i>Évaluation des propriétés de danger des sédiments associées à leur composition en substances dangereuses</i>	19
5.1.2)	<i>Évaluation de la propriété de danger HP14 « écotoxique »</i>	23
5.1.3)	<i>Caractérisation de la fraction lixiviable des sédiments (Essai de conformité EN 12457-2)</i>	43
5.1.4)	<i>Caractérisation du comportement à la percolation – Essai de conformité CEN/TS 14405</i>	44
5.2)	CARACTÉRISATION COMPLÉMENTAIRE DE L'INFLUENCE DU PH EN CONDITIONS STATIONNAIRES SUR LE COMPORTEMENT A LA LIXIVIATION NF EN 14 429	45
5.2.1)	<i>Principe de l'essai</i>	46
5.2.2)	<i>Résultats et commentaires</i>	46
ANNEXES		52

Contexte de l'étude :

Les réglementations italienne et française en matière d'évaluation de la qualité environnementale des sédiments permettant d'en évaluer les conditions de gestion envisageables s'appuient sur des méthodologies de caractérisation préalable différentes.

Ce rapport présente les résultats de l'application des procédures de caractérisation applicables en France dans le cadre de l'identification des conditions de gestion des sédiments dragués.

Ces analyses et essais ont été appliqués à des échantillons de sédiments de six provenances différentes sur la zone Marittimo, la plupart de ces sites de prélèvement ayant fait l'objet de trois prélèvements distincts. Au total 16 échantillons de sédiments ont été prélevés en vue de leur caractérisation.

Deux sites de prélèvement sont situés en France (Centuri en Corse et Toulon dans le Var) et quatre sites de prélèvement sont situés en Italie (Cagliari, Pise, Gènes, Livourne).

5.1) PROCÉDURE FRANÇAISE DE CARACTERISATION PRÉALABLE

5.1.1) Evaluation des propriétés de danger des sédiments associées à leur composition en substances dangereuses

➤ Démarche suivie

La France applique, a priori, pour les sédiments gérés à terre, la règle générale de définition du caractère dangereux ou non des déchets, issue de la transcription en droit français de la Directive européenne 2008/98/CE du 19 novembre 2008

En effet, s'agissant d'une « entrée miroir », terme utilisé pour caractériser un déchet présent sous deux formes possibles dans la liste européenne des déchets, l'une à caractère dangereux, l'autre non dangereux, la vérification de la dangerosité du déchet doit reposer sur l'examen des 15 propriétés de danger HP1 à HP15 inscrites à l'annexe III de la Directive 2008/98/CE. Parmi ces 15 propriétés, certaines visent particulièrement des déchets à risques spécifiques comme le risque explosif (HP1), comburant (HP2), inflammable (HP3) ou encore infectieux (HP9) et susceptible de produire un gaz toxique en présence d'eau ou d'un acide (HP12). Ces propriétés peuvent être considérées dans de nombreux cas comme non pertinentes.

L'INERIS et le Cerema ont conjointement travaillé à l'élaboration de seuils pour les paramètres habituellement mesurés dans les sédiments, qui permettraient de garantir la non dangerosité (pour les propriétés HP 4, HP 5, HP 6, HP 7, HP 8, HP10, HP 11 et HP 13) de façon simplifiée par rapport à la démarche habituelle d'évaluation.

➤ **Valeurs de référence**

Ces travaux ont conduit à retenir les valeurs de référence suivantes comme seuils de classement pour les paramètres considérés :

	Proposition de seuils (%)
Arsenic	0,0330
Cadmium	0,0530
Chrome VI	0,0250
Cuivre	0,4000
Mercure	0,0500
Nickel	0,0130
Plomb	0,0510 ⁽¹⁾
Zinc	0,7230
PCB 28	0,0050 pour la somme des 7 congénères
PCB 52	
PCB 101	
PCB 118	
PCB 138	
PCB 153	
PCB 180	
Naphtalène	1,0000
Acénaphthylène	0,0500
Phénanthrène	5,0000
Fluoranthène	5,0000
Benzo(a)anthracène	0,1000
Chrysène	0,1000
Benzo(b)fluoranthène	0,1000
Benzo(k)fluoranthène	0,1000
Benzo(a)pyrène	0,1000
Dibenzo(a,h)anthracène	0,1000
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	1,0000
Tributylétain	0,3000

Tableau 1 – Valeurs de référence pour évaluation de la dangerosité des sédiments vis-à-vis des propriétés HP4, HP5, HP6, HP7, HP8, HP10, HP11, HP13

➤ Application de la démarche

L'analyse des paramètres faisant l'objet de valeurs de référence a été réalisée selon les normes spécifiées pour chacun des six sédiments.

Les références de ces normes sont indiquées dans le tableau suivant.

Paramètres	Méthode d'analyse
Matière sèche	NF EN 12880
Refus pondéral à 2 mm	NF ISO 11464
Préparation physico-chimique (séchage à 40°C)	NF ISO 11464
Minéralisation Eau Régale - Bloc chauffant après p	NF EN 13346 Méthode B
Arsenic (As)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Cadmium (Cd)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Chrome (Cr)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Cuivre (Cu)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Nickel (Ni)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Plomb (Pb)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Zinc (Zn)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Mercure (Hg)	NF EN 13346 Méthode B (Sol) - NF ISO 16772 (Sol) - Adaptée de NF ISO 16772 (Boue, Sédiments)
Naphtalène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Acénaphthylène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Phénanthrène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Fluoranthène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Benzo(a)-anthracène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Chrysène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Benzo(b)fluoranthène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Benzo(k)fluoranthène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Benzo(a)pyrène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Dibenzo(a,h)anthracène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Benzo(ghi)Pérylène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Indeno (1,2,3-cd) Pyrène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 28	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 52	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 101	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 118	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 138	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 153	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 180	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
SOMME PCB (7)	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Tributylétain cation (TBT)	XP T 90-250

Tableau 2 – Normes d'analyse chimique des sédiments

Les résultats de ces analyses sont rassemblés dans le tableau 3 suivant :

Paramètres	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Naphtalène	Acénaphthylène	Phénanthrène	Fluoranthène	Benzo(a)-anthracène	Chrysène	Benzo(b)fluoranthène	Benzo(k)fluoranthène	Benzo(a)pyrène	Dibenzo(a,h)anthracène	Benzo(ghi)Pérylène	Indeno(1,2,3-cd)Pyrène	SOMME PCB (7)	TBT
Centuri 1	4,43	<0,40	159	51,2	<0,10	125	25,6	83,6	0,0064	0,0041	0,016	0,041	0,02	0,013	0,035	0,011	0,021	0,0044	0,017	0,017	0,0011	0,134
Centuri 2	5,86	<0,40	296	77,3	<0,10	255	41,6	186	0,015	0,0039	0,01	0,016	0,0068	0,0078	0,013	0,0058	0,0089	<0,0025	0,0055	0,0064	<0,0012	0,107
Centuri 3	5,26	<0,40	155	26,4	<0,10	118	14,8	74	0,0075	<0,0025	0,0033	0,011	0,0053	0,0064	0,0093	0,0038	0,0064	<0,0025	0,004	0,0051	<0,001	0,034
Centuri M									0,0095	0,0038	0,0093	0,017	0,0081	0,0085	0,013	0,0053	0,0089	0,0029	0,0061	0,0073	<0,001	
Toulon1	7,72	<0,40	9,55	15	0,34	8,71	41,1	52,2	0,076	0,076	0,56	1,8	1	0,96	2,4	0,53	2	0,099	0,56	0,53	<0,001	0,005
Toulon2	8,61	<0,40	10,8	16,1	0,45	9,82	46,1	54,3	0,082	0,08	0,55	1,7	0,99	0,94	2,3	0,85	1,9	0,096	0,58	0,54	<0,001	0,005
Toulon3	7,57	<0,40	9,85	14,1	0,33	9,21	43,6	50,9	0,079	0,076	0,55	1,8	1,1	1,2	2,2	0,72	2,1	0,12	1,4	1,5	<0,001	0,005
Toulon M	7,94	<0,40	10,9	14	0,33	9,2	45,7	57,9	0,037	0,22	0,46	1,3	0,72	0,72	1,5	0,49	1,3	0,19	0,85	0,91	0,024	0,005
Cagliari1	13,7	1,81	14,6	48,8	0,41	9,89	200	227	0,02	0,029	0,094	0,27	0,18	0,2	0,37	0,14	0,28	0,073	0,27	0,35	0,013	0,029
Cagliari2	18,5	2,31	10,1	47,3	0,31	7,15	157	344	0,02	0,042	0,14	0,45	0,28	0,22	0,48	0,19	0,36	0,097	0,32	0,3	0,024	0,009
Cagliari3	22,7	2,5	8,87	41,5	0,27	6,23	140	361	0,016	0,042	0,12	0,45	0,32	0,26	0,56	0,22	0,41	0,12	0,34	0,35	0,0077	0,005
Cagliari M	29	2,52	14,5	63,5	0,9	9,64	175	358	0,014	0,039	0,12	0,44	0,28	0,21	0,52	0,2	0,39	0,091	0,35	0,35	0,012	0,015
Pize 1	7,03	1,07	63	44,6	0,29	60,1	23,5	120	0,0067	0,011	0,037	0,25	0,1	0,11	0,11	0,043	0,088	0,012	0,041	0,039	0,013	0,044
Pize 2	7,76	2,42	80,1	63,7	0,3	68,4	44,4	152	0,049	0,18	0,8	5,9	2,8	2,7	2,3	1,2	2,4	0,17	1,3	1,3	0,056	0,071
Pize M	8,14	8,26	118	68	0,27	69,9	67,4	249	0,1	0,081	0,45	2,5	1,2	1,2	1,1	0,43	1,2	0,072	0,35	0,36	0,059	0,415
Pize 3	7,53	9,96	133	65,4	0,21	76,2	69,9	272	0,028	0,034	0,28	0,91	0,46	0,46	0,33	0,18	0,28	0,035	0,14	0,16	0,062	0,464
Gène	9,15	<0,40	50,5	25,8	0,3	36,5	50,6	72,4	0,028	0,013	0,079	0,28	0,067	0,078	0,19	0,073	0,12	0,049	0,12	0,12	0,025	0,042
Gène	9,15	<0,40	50,5	25,8	0,3	36,5	50,6	72,4	0,028	0,013	0,079	0,28	0,067	0,078	0,19	0,073	0,12	0,049	0,12	0,12	0,025	0,042
Livourne1	14	<0,40	38,3	15,2	<0,10	36,2	13,9	52,9	0,015	0,032	0,04	0,11	0,065	0,069	0,13	0,065	0,11	0,027	0,094	0,079	<0,001	0,005
Livourne2	13,4	<0,42	55,3	34,5	<0,10	54,5	19,7	87,2	0,034	0,039	0,14	0,53	0,23	0,24	0,35	0,17	0,19	0,035	0,11	0,084	<0,001	0,010
Livourne3	15,4	<0,41	42	32,1	<0,10	39,8	16,3	64,6	0,016	0,034	0,082	0,2	0,12	0,12	0,22	0,11	0,19	0,039	0,14	0,13	<0,001	0,005
LivourneM									0,017	0,038	0,06	0,19	0,12	0,12	0,25	0,12	0,18	0,04	0,14	0,13	<0,001	
Seuils Danger Substances	330	530	250	4000	500	130	510	7230	10000	500	50000	50000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	10000	50	3000

Tableau 3 – Résultats de caractérisation chimique des sédiments et confrontation aux valeurs de référence pour évaluation de la dangerosité des sédiments vis-à-vis des propriétés HP4, HP5, HP6, HP7, HP8, HP10, HP11, HP13

Ce tableau montre que seul l'un des trois échantillons prélevés sur le site de Centuri en Corse, l'échantillon Centuri 2, présente une teneur en éléments métalliques (nickel et chrome) dépassant les valeurs de référence définies dans le cadre de l'évaluation simplifiée de la dangerosité des sédiments au regard des propriétés de danger HP4 à HP8, HP10, HP11, et HP13.

Pour cet échantillon, le dépassement en chrome ne vaut que si le chrome contenu dans ce sédiment l'est entièrement sous la forme de chrome hexavalent ce qui n'est pas vraisemblable dans le cas de sédiments prélevés en milieu naturel et non dans un rejet industriel ou zone de dépôt spécifique.

Du fait de sa teneur en nickel, l'échantillon Centuri 2 est susceptible de présenter un caractère dangereux. Les autres prélèvements ne présentent aucune suspicion de danger du point de vue de leur teneur en substances selon la méthode d'évaluation simplifiée.

5.1.2) Evaluation de la propriété de danger HP14 « écotoxique »

La France a adopté une approche nationale d'évaluation du caractère dangereux des sédiments vis-à-vis de la propriété « Ecotoxique » sans toutefois l'inscrire dans les textes réglementaires. En effet, une démarche expérimentale applicable spécifiquement aux sédiments (eau douce et eau de mer) a été proposée en 2009 par le groupe de travail sédiments du Ministère en charge de l'Environnement. Cette démarche est représentée par le logigramme suivant :

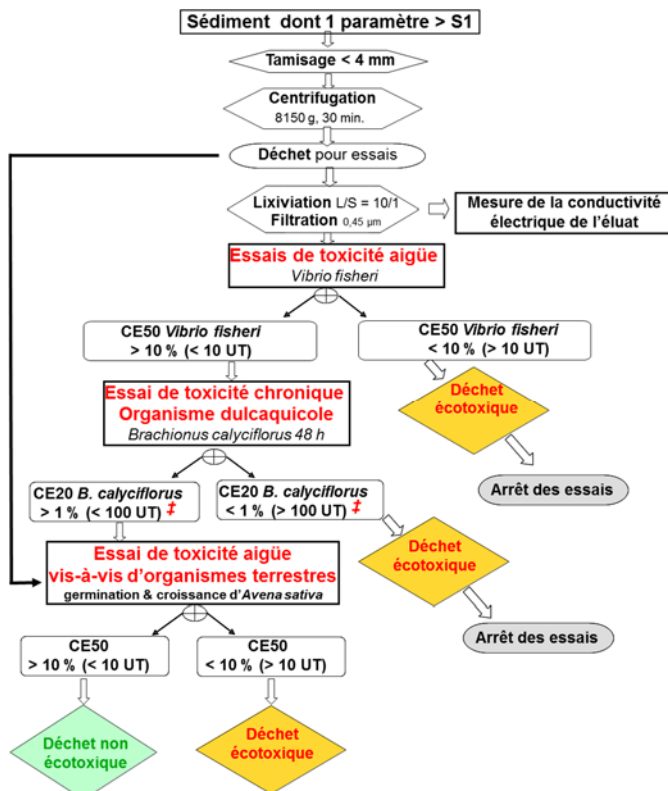


Figure 1 – Protocole d'évaluation de la propriété de danger HP14 pour les sédiments (MEDDM, 2009)

➤ **Caractérisation préliminaire**

Ainsi, l'évaluation de la dangerosité des sédiments au regard de leurs caractéristiques écotoxicologiques suit une approche graduelle avec une étape préliminaire portant sur l'examen de la teneur des sédiments en certains éléments minéraux et composés organiques. En effet, la poursuite de l'évaluation ne sera nécessitée que lorsque les résultats d'analyse de la teneur en éléments minéraux et en composés organiques seront supérieurs aux valeurs suivantes pour les paramètres suivants :

Polluants	Valeur seuil S1²²
Arsenic	30
Cadmium	2
Chrome	150
Cuivre	100
Mercure	0,001
Nickel	50
Plomb	100
Zinc	300
HAP : \sum des 16 congénères	22,8
PCBs : \sum des 7 congénères	0,680
Tributylétain ²³	0,1

Tableau 4 – Valeurs de référence S1 pour évaluation préliminaire de la dangerosité HP14

Si au moins 1 dépassement est constaté, des essais écotoxicologiques doivent être réalisés sur le déchet après centrifugation : deux tests sont réalisés sur l'éluat obtenu par lixiviation et un test sur la matrice solide.

Dans le cas des 6 sédiments étudiés, les résultats d'analyses sont comparés aux valeurs de référence dans le tableau 5 suivant :

Paramètres	As (mg/kg MS)	Cd (mg/kg MS)	Cr (mg/kg MS)	Cu (mg/kg MS)	Hg (mg/kg MS)	Ni (mg/kg MS)	Pb (mg/kg MS)	Zn (mg/kg MS)	Somme des HAP (16) (mg/kg MS)	SOMME PCB (7) (mg/kg MS)	Tributylétain (mg/kg MS)
Corse 1	4,43	<0,40	159	51,2	<0,10	125	25,6	83,6	0,26	0,0011	0,134
Corse 2	5,86	<0,40	296	77,3	<0,10	255	41,6	186	0,13	<0,0012	0,107
Corse 3	5,26	<0,40	155	26,4	<0,10	118	14,8	74	0,078	<0,001	0,034
Toulon1	7,72	<0,40	9,55	15	0,34	8,71	41,1	52,2	13	<0,001	<0,005
Toulon2	8,61	<0,40	10,8	16,1	0,45	9,82	46,1	54,3	12	<0,001	<0,005
Toulon3	7,57	<0,40	9,85	14,1	0,33	9,21	43,6	50,9	15	<0,001	<0,005
Cagliari1	13,7	1,81	14,6	48,8	0,41	9,89	200	227	2,6	0,013	0,029
Cagliari2	18,5	2,31	10,1	47,3	0,31	7,15	157	344	3,4	0,024	0,009
Cagliari3	22,7	2,5	8,87	41,5	0,27	6,23	140	361	3,7	0,0077	<0,005
Pize 1	7,03	1,07	63	44,6	0,29	60,1	23,5	120	1,1	0,013	0,044
Pize 2	7,76	2,42	80,1	63,7	0,3	68,4	44,4	152	30	0,056	0,071
Pize 3	7,53	9,96	133	65,4	0,21	76,2	69,9	272	4,5	0,062	0,463
Gène	9,15	<0,40	50,5	25,8	0,3	36,5	50,6	72,4	1,5	0,025	0,041
Livourne1	14	<0,40	38,3	15,2	<0,10	36,2	13,9	52,9	0,98	<0,001	<0,005
Livourne2	13,4	<0,42	55,3	34,5	<0,10	54,5	19,7	87,2	2,9	<0,001	0,010
Livourne3	15,4	<0,41	42	32,1	<0,10	39,8	16,3	64,6	1,6	<0,001	<0,005
Seuils S1	30	2	150	100	0,001	50	100	300	22,8	0,68	0,1

Tableau 5 – Résultats de composition des sédiments comparés aux valeurs de référence S1

Ce tableau montre que chaque sédiment analysé présente au moins 1 dépassement du seuil S1. Par conséquent, chacun des sédiments doit faire l'objet d'une caractérisation écotoxicologique.

➤ **Caractérisation de l'écotoxicité des sédiments**

Démarche suivie : Dans le cadre de cette étude, les essais retenus ont permis d'évaluer la toxicité aiguë et chronique des éluats des sédiments vis-à-vis d'organismes aquatiques :

- L'essai aigu d'inhibition de la luminescence de la bactérie *Vibrio fisheri* (NF EN ISO 11348-2) en 15 et 30 minutes
- L'essai chronique d'inhibition de la reproduction du rotifère *Brachionus calyciflorus* (NF ISO 20666) en 48h
- L'essai chronique d'inhibition de la reproduction de *Ceriodaphnia dubia* (NF ISO 20665) en 7 jours

Pour caractériser le niveau de toxicité des sédiments vis-à-vis des organismes terrestres, l'essai suivant a été réalisé directement sur les sédiments après centrifugation :

- L'essai aigu d'inhibition de la germination et de la croissance de l'avoine (*Avena sativa*) (NF ISO 11269-2), en pots horticoles sur 21j

Les essais ont été réalisés aux concentrations seuils de classement des sédiments dangereux (propriété HP14) qui est de 10% pour les essais aigus et de 1% pour les essais chroniques). C'est-à-dire que, conformément au protocole retenu, les organismes ont été exposés à une seule dilution de l'éluat dans le milieu d'essai : 10% pour l'essai aigu et 1% pour l'essai chronique, et à la seule dilution de 10% du sédiment centrifugé pour l'essai aigu végétaux.

➤ **Sélection des sédiments objets des essais**

La sélection des sous-échantillons, objets des essais d'écotoxicité, a été effectuée à l'issue du Comité Technique du 20 septembre 2017 à la Seyne s/ mer qui a conduit à retenir, pour les pilotes de pré-traitement et de valorisation, les éléments suivants :

- **Sédiment de Centuri** : le point de prélèvement n°1 est le plus adapté (lié à sa granulométrie et sa teneur en posidonies)
- **Sédiment de Toulon** : le sédiment est homogène et un échantillon moyen pourra-être constitué
- **Sédiment de Cagliari** : le sédiment est homogène et un échantillon moyen pourra-être constitué dans la zone la plus accessible
- **Sédiment de Livourne** : le sédiment est homogène et un échantillon moyen pourra-être constitué

Dans le cas des sédiments dont il n'est pas prévu de pré-traitement ni de valorisation :

- **Sédiment de Navicelli** : le point de prélèvement n°1 est le plus adapté
- **Sédiment de Gènes** : ce sédiment n'a fait l'objet que d'un point de prélèvement

➤ **Valeurs de références pour la propriété HP14**

Cette procédure repose sur la mise en œuvre d'une batterie d'essais combinant des essais aigus et chroniques avec des organismes aquatiques et terrestres de différents niveaux trophiques, conformément au protocole en vigueur en France décrit dans la partie du rapport INERIS-DRC-15-149793-06416A¹ dédiée aux sédiments. Les valeurs de référence permettant de différencier un sédiment dangereux d'un sédiment non dangereux sont :

¹ Rapport INERIS-DRC-15-149793-06416A du 04/02/2016 "Classification réglementaire des déchets - Guide d'application pour la caractérisation de la dangerosité" - disponible en ligne

- ✓ **pour les essais de toxicité aiguë** (aquatiques et terrestres) la valeur de référence est $CE50 \leq 10\%$, c'est-à-dire qu'un sédiment est considéré comme dangereux si la concentration qui provoque 50% d'inhibition avec un des essais de toxicité aiguë est inférieure ou égale à 10%. *Ainsi, lorsque l'essai est réalisé à la seule concentration seuil de 10%, le sédiment est qualifié de dangereux si l'inhibition observée est supérieure ou égale à 50%.*

- ✓ **pour les essais de toxicité chronique** (aquatiques) : $CE20 \leq 1\%$, c'est-à-dire qu'un sédiment est considéré comme dangereux si la concentration qui provoque 20% d'inhibition avec un des essais de toxicité chronique est inférieure ou égale à 1%. *Ainsi, lorsque l'essai est réalisé à la seule concentration seuil de 1%, le sédiment est qualifié de dangereux si l'inhibition observée est supérieure ou égale à 20%.*

Les résultats obtenus avec cette batterie de bioessais permettent de caractériser un sédiment au regard de la propriété de danger HP14, sous réserve que l'échantillon reçu au laboratoire soit représentatif du gisement.

On notera que les résultats de l'ensemble de la batterie d'essais doivent être pris en compte. C'est-à-dire qu'une seule réponse positive ("toxique"), pour un seul des organismes, est suffisante pour qualifier le sédiment de dangereux.

➤ **Application de la démarche**

Les échantillons de sédiments ont été conservés en chambre froide à +4°C.

Les bioessais ont été mis en œuvre à partir de sous-échantillons des échantillons primaires homogénéisés.

Une première série d'essais (essai aigu *V. fisheri* et essai chronique *B. calyciflorus* sur éluats et essai végétaux sur les sédiments centrifugés) a été réalisée au cours de la semaine du 10 octobre 2017. Pour confirmer les résultats de toxicité chronique obtenus, les bioessais chroniques *B. calyciflorus* et *C. dubia* sur éluats ont été faits, avec de nouveaux éluats, durant la semaine du 1^{er} décembre 2017.

a. Préparation des échantillons et mesures annexes

Les sédiments, d'apparence globalement homogène, n'ont pas été tamisés. Seuls les éventuels cailloux, débris coquilliers et boules de posidonies ont été retirés à la main.

Conformément au protocole décrit plus haut, les sédiments ont été centrifugés pendant 30 min à 8 150 G (soit environ 3000 rpm) de façon à éliminer les sels marins par nature toxiques pour les organismes continentaux et considérés comme non dangereux par la réglementation. Pour chaque sédiment, un éluat a été obtenu au moyen de l'essai de lixiviation NF EN 12457-2 (ratio de 100 g équivalent sec / litre d'eau, 24h d'agitation par retournement), sans ajustement du pH, et filtré à 0,45 µm, conformément au protocole défini par le guide INERIS 2016 cité plus haut.

La teneur en eau des sédiments après centrifugation a été mesurée, les valeurs obtenues sont récapitulées dans le tableau ci-dessous. Pour information, les caractéristiques du substrat de dilution (ISO) sont consignées dans le même tableau.

	siccité	humidité
Centuri Point 1	68,08%	31,92%
Toulon Moyen (points 1-2-3)	74,47%	24,53%
Cagliari Moyen (points 1-2-3)	82,96%	17,04%
Navicelli Point 1	62,16%	37,84%
Gênes 1	75,26%	24,74%
Livourne Moyen (points 1-2-3)	94,97%	5,03%
Substrat ISO	100,00 %	0,00%

Tableau 6 – Siccité / teneur en eau des sédiments

Le pH et la conductivité des sédiments centrifugés (mesurés après mise en contact du sédiment avec de l'eau (ratio L/S = 5) pendant 2 heures sous agitation douce) ainsi que ceux des éluats pour essais (après filtration) ont été mesurés. Les valeurs obtenues sont récapitulées ci-dessous. Pour information, les caractéristiques du substrat de dilution (ISO) sont consignées dans le même tableau.

Les éluats ont été réalisés les 9 et 10 octobre 2017, de façon à permettre une mise en route des bioessais dans les 48 heures. Après filtration, ils ont été conservés à l'obscurité, à +4°C. Pour la seconde série d'essais, les éluats ont été réalisés du 30 novembre au 1^{er} décembre 2017.

Sédiment	Sédiments centrifugés (ratio S/L = 1/5)		Éluats filtrés 10/10/17 (ratio S/L = 1/10)		Éluats filtrés 01/12/17 (ratio S/L = 1/10)	
	pH	conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	pH	conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	pH	conductivité ($\mu\text{S/cm}$)
Centuri Point 1	7,98	4 470	8,08	3 568	7,89	4 195
Toulon Moyen (points 1-2-3)	8,29	3 520	8,40	2 396	8,30	2 575
Cagliari Moyen (points 1-2-3)	8,08	4 201	8,00	3 006	7,80	2 902
Navicelli Point 1	7,84	3 169	8,39	2 859	7,87	7 405
Gênes 1	7,97	3 606	8,14	2 498	8,11	3 323
Livourne Moyen (points 1-2-3)	8,13	3 776	8,07	2 060	8,03	2 181
Substrat ISO	6,37	85	- -	- -	- -	- -

Tableau 7 – pH / conductivité des sédiments centrifugés et des éluats filtrés

Seuls les deux éluats du sédiment de Navicelli (point 1) présentent une différence significative de conductivité (2 859 $\mu\text{S/cm}$ pour le premier éluat et 7 405 $\mu\text{S/cm}$ pour le second). Cette différence pourrait être dû à l'hétérogénéité du sédiment ou à son évolution bio-physico-chimique malgré les précautions prises pour limiter cette évolution.

On notera que ces pH et conductivités sont compris dans des intervalles compatibles avec la survie des organismes utilisés pour les bioessais. A eux seuls, ils ne pourraient pas expliquer une éventuelle toxicité.

b. Essai d'inhibition de la luminescence de la bactérie *Vibrio fisheri*



Cet essai permet d'évaluer la toxicité aiguë d'un éluat de sédiment après filtration à 0,45 μm . Il est effectué dans les conditions de la norme NF EN ISO 11348-2 (NF T 90-320). L'essai est réalisé avec des bactéries luminescentes lyophilisées du commerce. Il se déroule dans une enceinte climatisée à +15°C.

Lors de l'essai "au seuil", les bactéries sont mises au contact de l'éluat dilué à 10% pendant 30 minutes (deux réplicats sont réalisés en parallèle). La luminescence des suspensions bactériennes est mesurée avant et après contact avec l'éluat dilué à l'aide d'un photomultiplicateur. Les dilutions sont réalisées avec le milieu de référence (eau distillée salée à 20 g NaCl/L) qui sert aussi pour les lots témoins sans éluat. En fin d'essai, on détermine, par rapport au témoin, le pourcentage d'inhibition de la luminescence bactérienne provoqué par 30 minutes de contact avec de l'éluat dilué à 10%.

Avec cet essai, selon les valeurs de référence pour les essais de toxicité aiguë, un sédiment sera considéré comme dangereux si la CE50 est inférieure ou égale à 10%, c'est-à-dire, dans le cas de l'essai "au seuil", si l'inhibition de la luminescence observée pour l'éluat dilué à 10% est supérieure ou égale à 50%.

Les résultats de l'essai "au seuil" pour les éluats sont présentés dans le tableau suivant. Ces essais ont été réalisés le 11 octobre 2017.

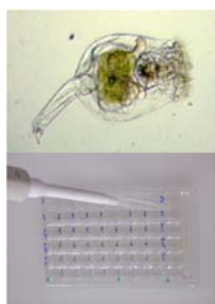
Sédiments	Inhibition de la luminescence à [10%]	
	réplicat 1	Réplicat 2
Centuri Point 1	0 %	0 %
Toulon Moyen (points 1-2-3)	0 %	0 %
Cagliari Moyen (points 1-2-3)	0 %	0 %
Navicelli Point 1	0 %	0 %
Gênes 1	0 %	0 %
Livourne Moyen (points 1-2-3)	0 %	0 %

Tableau 8 – Résultats de l'essai *V. fisheri* "au seuil" pour les éluats de sédiments

Ces résultats montrent que pour la bactérie *V. fisheri*, le contact avec les éluats des sédiments ne génère aucune toxicité aiguë suffisante pour les considérer comme toxiques. En effet, quel que soit le sédiment, on n'observe aucune inhibition de la luminescence à la concentration seuil de [10%]

Aucun des sédiments testés ne pourrait donc être qualifié de dangereux avec l'essai aigu *V. fisheri*.

c. Essai d'inhibition de la reproduction du rotifère *Brachionus calyciflorus*



Cet essai permet d'évaluer la toxicité chronique d'un éluat vis-à-vis d'un organisme aquatique animal parthénogénétique. Il est effectué d'après la norme NF ISO 20666. Il est réalisé avec des organismes provenant du commerce (Rotokit®) exposés individuellement à l'éluat dilué à 1% (concentration seuil) pendant 48 heures. L'essai est réalisé en microplaques (puits de 1 ml). Il comprend 8 réplicats par éluat et un lot témoin sans éluat. En début d'essai, un seul organisme âgé de moins de 2h est introduit dans chaque puits de la microplaque. L'incubation se fait à 25°C ± 1°C, à l'obscurité. L'essai est statique. Les organismes sont nourris en début d'essai avec une suspension d'algues contenant 2 à 3x10⁷ cellules / ml. Après 48 heures d'incubation, les organismes présents dans chaque puits sont dénombrés. L'inhibition de la reproduction des organismes est calculée pour chaque éluat (moyenne des 8 réplicats) par rapport au lot témoin sans éluat.

Avec cet essai chronique, un sédiment sera considéré comme dangereux si la CE20 de son éluat est inférieure ou égale à 1%, c'est-à-dire, dans le cas de l'essai "au seuil", si l'éluat dilué à 1% provoque une inhibition de la reproduction de *B. calyciflorus* supérieure ou égale à 20% par rapport au lot témoin.

Une première série d'essais a été mise en route le 11 octobre (avec les éluats du 10). Pour confirmer les toxicités constatées, une seconde série d'essais a été mise en route le 6 décembre 2017 (avec les éluats du 1^{er} décembre). Les résultats de l'essai d'inhibition de la croissance de populations de *Brachionus calyciflorus* en 48h sont présentés dans le tableau suivant.

Sédiments	Inhibition de la reproduction à [1%]	
	éluat du 10/10/17	éluat du 01/12/17
Centuri Point 1	33,3 %	3,1 %
Toulon Moyen (points 1-2-3)	15,7 %	3,1 %
Cagliari Moyen (points 1-2-3)	33,3 %	28,1 %
Navicelli Point 1	27,5 %	31,3 %
Gênes 1	43,1 %	21,9 %
Livourne Moyen (points 1-2-3)	25,6 %	31,3 %

Tableau 9 – Résultats de l'essai *B. calyciflorus* pour les éluats de sédiments

Le premier lot de résultats montre que pour le rotifère *B. calyciflorus*, le contact avec les éluats de sédiments dilués à 1% provoque systématiquement une inhibition de la reproduction par rapport au lot témoin (de 16% à 43% selon les sédiments), seul le sédiment "Toulon moyen" ne serait pas classé comme un sédiment dangereux au titre de la propriété HP14 (valeur de référence : inhibition inférieure à 20%), tous les autres sédiments (Livourne moyen, Navicelli point 1, Centuri Pt 1, Cagliari moyen et Gênes Pt 1) pourraient être qualifiés de dangereux.

Le second lot de résultats, obtenus avec le second éluat, confirme cette tendance excepté pour le sédiment "Centuri point 1" qui n'apparaît pas toxique.

En compilant ces deux séries d'essais, le classement des sédiments par ordre de toxicité croissante avec l'essai chronique *B. calyciflorus* est le suivant :

Toulon moy. / Centuri Pt-1 / Livourne moy. & Navicelli Pt-1 / Cagliari moy. / Gênes Pt-1

d. Essai d'inhibition de la reproduction du crustacé *Ceriodaphnia dubia*



Cet essai permet d'évaluer la toxicité chronique d'un éluat vis-à-vis d'un organisme aquatique animal parthénogénétique. Il est effectué d'après la norme NF ISO 20665. Il est réalisé avec des organismes (issus des élevages du laboratoire) exposés individuellement à l'éluat dilué à 1% (concentration seuil) pendant 7 jours. L'essai est réalisé en flacons de 25 ml. Il comprend 10 réplicats par éluat et un lot témoin sans éluat. En début d'essai, un seul organisme âgé de moins de 24h (et issu d'une portée de plus de 8 jeunes) est introduit dans chaque flacon. L'incubation se fait à 23°C ± 1°C, sous éclairage artificiel, avec un cycle de 8h d'obscurité / 16h de jour. L'essai est semi-statique. Les organismes sont nourris en début d'essai avec une suspension d'algues contenant 8 à 9 x10⁷ cellules/ml et 1 ml/l d'une suspension à 5 g/l de nourriture pour poissons finement broyée. A partir du 3^{ème} jour d'incubation, les organismes sont en âge de se reproduire. Le milieu (dilution & apport de nourriture) est alors renouvelé quotidiennement. A cette occasion, les nouveaux nés sont retirés et comptabilisés individuellement.

L'inhibition de la reproduction des organismes est calculée pour chaque éluat (moyenne des 10 réplicats) par rapport au lot témoin sans éluat.

Avec cet essai chronique, un sédiment sera considéré comme dangereux si la CE20 de son éluat est inférieure ou égale à 1%, c'est-à-dire, dans le cas de l'essai "au seuil", si l'éluat dilué à 1% provoque une inhibition de la reproduction de *C. dubia* supérieure ou égale à 20% par rapport au lot témoin.

Les résultats de l'essai d'inhibition de la croissance d'une population de *Ceriodaphnia dubia* en 7 jours sont présentés dans le tableau suivant. Ces essais ont été mis en route le 1^{er} décembre 2017 (éluats du 1^{er} décembre).

Sédiments	Inhibition de la reproduction à [1%]
	éluat du 01/12/17
Centuri Point 1	13,3 %
Toulon Moyen (points 1-2-3)	1,4 %
Cagliari Moyen (points 1-2-3)	16,8 %
Navicelli Point 1	28,3 %
Gênes 1	0 %
Livourne Moyen (points 1-2-3)	45,1 %

Tableau 10 – Résultats de l'essai *C. dubia* pour les éluats de sédiments

Ces résultats montrent que pour le crustacé *C. dubia*, le contact avec les éluats de sédiments "Toulon moyen" et "Gênes 1" dilués à 1% n'a aucun effet inhibiteur de la reproduction ; ces sédiments ne seraient pas classés comme dangereux au titre de la propriété HP14 (valeur de référence : inhibition inférieure à 20%).

Le contact avec les éluats dilués à 1% des sédiments "Navicelli moyen" et "Livourne moyen" provoque une inhibition de la reproduction par rapport au lot témoin (respectivement de 28% et de 45%). Ces deux sédiments seraient classés comme dangereux au titre de la propriété HP14 (inhibitions supérieures à la valeur de référence de 20%).

Les éluats dilués à 1% des deux sédiments "Centuri Point 1" et Cagliari moyen" provoquent des inhibitions de la reproduction des *C. dubia* respectivement de 13% et 17%. Ces inhibitions sont significatives. Etant inférieures à la valeur de référence de 20%, elles ne pourraient toutefois pas conduire à qualifier ces deux sédiments de dangereux au titre de la propriété HP14.

Le classement des sédiments par ordre de toxicité croissante avec l'essai chronique *C. dubia* est le suivant :

Gênes Pt-1 / Toulon moy. / Centuri Pt-1 / Cagliari moy. / Navicelli Pt-1 / Livourne moy.

e. Essai d'inhibition de la germination et de la croissance foliaire de végétaux - essai en pots horticoles



L'essai d'inhibition de la germination et de la croissance foliaire de semences végétales permet d'évaluer la toxicité aiguë vis-à-vis de végétaux terrestres. Cet essai est effectué en pots horticoles, dans les conditions de la norme ISO 11269-2. Le support de culture témoin et de dilution est le substrat de référence ISO² humidifié avec de l'eau du réseau déchlorée par aération douce. Les semences sont exposées aux sédiments dilués à 10% dans le substrat ISO. On réalise quatre réplicats de 10 semences par lot. Les semences sont déposées à la surface du substrat de culture. Tout au long de l'essai, l'humidité est maintenue constante dans les pots par vaporisation. Aucun apport d'engrais n'a été effectué, ni dans les lots témoins, ni dans les sédiments. L'espèce végétale retenue est l'avoine (*Avena sativa*), espèce recommandée par le protocole sédiments. Après une semaine d'exposition, on dénombre les semences germées dans chaque réplicat.

¹ Le "sol" ISO est réalisé en mélangeant (pourcentages en masses sèches) : 10% de tourbe de sphaigne finement moulue - 20% de kaolin - 70% de sable de Fontainebleau) et en ajustant le pH à 6,0 ± 0,5 avec du CaCO₃

L'essai est ensuite poursuivi pendant 3 semaines. En fin d'essai, les parties foliaires des plants sont recueillies (sectionnées au collet) et mises à sécher à l'étuve à 80°C. La masse sèche des plants cultivés au contact des sédiments est comparée à la masse sèche des plants des lots témoins.

Avec cet essai aigu, selon les valeurs de référence décrite plus haut, un sédiment sera considéré comme dangereux si la CE50 est inférieure ou égale à 10%, c'est-à-dire, dans le cas de l'essai "au seuil", si l'inhibition de la germination ou de la croissance foliaire observée pour le sédiment dilué à 10% dans le substrat de référence est supérieure ou égale à 50%. Le pH et la conductivité des mélanges de sédiments à 10% dans le substrat de référence ont été mesurés.

Les résultats de l'essai d'inhibition de la germination et de la croissance foliaire d'*Avena sativa* sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Sédiments	caractéristiques de la dilution 10%		Inhibition à [10%]	
	pH	conductivité	germination	croissance foliaire
Centuri Point 1	7,96	478 µS/cm	0 %	0 % ^(f)
Toulon Moyen (points 1-2-3)	7,98	648 µS/cm	0 %	0 % ^(f)
Cagliari Moyen (points 1-2-3)	7,82	578 µS/cm	2,8 %	0 % ^(f)
Navicelli Point 1	7,77	619 µS/cm	0 %	0 % ^(f)
Gênes 1	7,72	566 µS/cm	0 %	0 % ^(f)
Livourne Moyen (points 1-2-3)	7,65	670 µS/cm	2,8 %	0 % ^(f)

Tableau 11 – Résultats de l'essai d'inhibition de la germination et de la croissance foliaire de *A. sativa*

^(f) : effet fertilisant - la croissance des plants (exprimée en masse sèche foliaire) est supérieure à celle des lots témoins

Ces résultats montrent que pour l'avoine, *A. sativa*, dans les conditions d'essai, le contact avec les sédiments dilués à la concentration seuil de 10% ne génère pas de toxicité aiguë, ni vis-à-vis de la germination (aucune inhibition significative de la germination n'est observée), ni vis-à-vis de la croissance foliaire (croissance significativement supérieure pour les lots exposés aux sédiments dilués à 10% que pour les lots exposés au substrat de référence et de dilution).

Aucun des sédiments testés ne pourrait donc être qualifié de dangereux avec l'essai aigu d'inhibition de la germination et de la croissance foliaire du végétal *A. sativa*.

➤ Conclusions sur l'écotoxicité des sédiments marins et conséquence sur le statut des sédiments

Les résultats de la batterie d'essais mise en œuvre pour évaluer l'écotoxicité des sédiments de l'étude au regard de la propriété de danger sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Pour chaque sédiment, le positionnement "sédiment dangereux" / "sédiment non dangereux" est établi suivant les valeurs de référence de la démarche (non réglementaire) actuellement en vigueur en France, telle qu'elle est décrite dans le guide INERIS 2016.

Sédiment	Inhibition de la luminescence de <i>V. fisheri</i> à 10%	Inhibition de la reproduction de <i>B. calyciflorus</i> à 1%	Inhibition de la reproduction de <i>C. dubia</i> à 1%	Inhibition de la germination de <i>A. sativa</i> à 10%	Inhibition de la croissance de <i>A. sativa</i> à 10%	Conclusions* HP14
Centuri Point 1	0 %	33,3 - 3,1%	13,3 %	0 %	0 % ^(f)	dangereux
Toulon Moyen	0 %	15,7 - 3,1%	1,4 %	0 %	0 % ^(f)	non dangereux
Cagliari Moyen	0 %	33,3 - 28,1%	16,8 %	2,8 %	0 % ^(f)	dangereux
Navicelli Point 1	0 %	27,5 - 31,3%	28,3 %	0 %	0 % ^(f)	dangereux
Gênes 1	0 %	43,1 - 21,9%	0 %	0 %	0 % ^(f)	dangereux
Livourne Moyen	0 %	25,6 - 31,3%	45,1 %	2,8 %	0 % ^(f)	dangereux

Tableau 12 – Synthèse des résultats de la batterie d'essais HP14 aux seuils réalisée sur les sédiments, et conclusions (valeurs de référence INERIS 2016)

^(f) : effet fertilisant - la croissance des plants (exprimée en masse sèche foliaire) est supérieure à celle des lots témoins

*** : UNE ANALYSE ULTERIEURE SUR SÉDIMENTS FRAIS (réalisée après la rédaction de ce document) A FINALEMENT INFIRMÉ CES 1^{ÈRES} CONCLUSIONS AVEC L'INTÉGRALITÉ DES SÉDIMENTS CLASSÉS NON-DANGEREUX SELON L'ESSAI HP14**

Cette caractérisation écotoxicologique permet de conclure que :

- ✓ Aucun des sédiments ne pourrait être qualifié de dangereux au titre de la propriété HP14 avec les essais de toxicité aiguë (inhibition de la luminescence de *V. fisheri* et inhibition de la germination et de la croissance de *A. sativa*)
- ✓ Les éluats dilués à 1% présentent presque tous une toxicité chronique significative vis-à-vis de *B. calyciflorus*. Les niveaux d'inhibition atteints pour Toulon moyen ne sont toutefois pas suffisants pour classer ces sédiments dangereux. On note par ailleurs un écart significatif entre les inhibitions observées avec les deux éluats du sédiment Centuri point 1.
- ✓ Excepté ceux de Gênes 1 et de Toulon moyen, les éluats dilués à 1% présentent une toxicité chronique significative vis-à-vis de *C. dubia*. Les niveaux d'inhibition atteints pour Centuri Point 1 et pour Cagliari moyen ne sont toutefois pas suffisants pour classer ces sédiments dangereux.

A l'issue de ces essais, il apparaît que seul le sédiment « Toulon » ne présente pas les caractéristiques d'un déchet dangereux* vis-à-vis de la propriété de danger HP14 « Ecotoxique ». Les autres sédiments doivent faire l'objet d'un traitement ou d'une élimination dans le cadre de la gestion des déchets dangereux.

➤ **Examen croisé des résultats de la batterie HP14 avec les résultats obtenus par l'ISPRA**

Les résultats fournis par l'ISPRA (fichier de septembre 2017) sont repris ci-dessous.

CAMPIONE/ Echantillon	tossicità ecotossicologica		
	Inibizione della crescita dell'alga <i>Phaeodactylum tricorutum</i>	test sviluppo embrionale del Riccio di mare <i>Paracentrotus lividus</i>	MTX
1. CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	Assente/Trascurabile	Alta *	Assente/Trascurabile
2. CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
3. CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
4. TOULON POINT 1 (06/06/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
5. TOULON POINT 2 (06/06/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
6. TOULON POINT 3 (06/06/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
7. CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	Assente/Trascurabile	Alta	Assente/Trascurabile
8. CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Assente/Trascurabile
9. CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Assente/Trascurabile
10. NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Moderata
11. NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Assente/Trascurabile
12. NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Moderata
13. GENOVA 1 (26/06/2017);	Assente/Trascurabile	Moderata	Assente/Trascurabile
14. LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	Assente/Trascurabile	Moderata	Assente/Trascurabile
15. LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	Assente/Trascurabile	Alta	Assente/Trascurabile
16. LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	Assente/Trascurabile	Alta	Assente/Trascurabile

Tableau 13 – Synthèse des résultats des bioessais réalisés sur les sédiments par l'ISPRA

Les résultats présentés ci-dessus ont été obtenus avec des organismes marins. Il s'agit de deux essais chroniques d'inhibition de la croissance d'une algue unicellulaire *P. tricornutum*, et du développement embryonnaire de l'oursin *P. lividus* ainsi que d'un essai aigu d'inhibition de la luminescence de la bactérie *V. fischeri* (dit "essai Microtox®"). L'essai *V. fischeri* est commun aux deux batteries.

La transposition d'une classification à deux couleurs ("vert = non toxique" / "bleu foncé = très toxique") en une classification à quatre couleurs (non toxique / modérément toxique / toxique / très toxique) est une démarche délicate qui peut prêter à critiques. Cette transposition a malgré tout été établie dans le seul but de croiser les informations obtenues avec celles de l'ISPR. Il est bien entendu que l'interprétation des valeurs de références spécifiques à l'évaluation de la dangerosité des déchets (propriété HP14), proposée ci-dessous, n'est pas conventionnelle.

Pour cette étude, les inhibitions significatives observées pour les essais chroniques (*B. calyciflorus* et *C. dubia*), et proches de la valeur de référence de classement déchet dangereux / déchet non dangereux, soient les inhibitions de 13,3%, 15,7% et 16,8% (<20%) et 21,9% (≥20%), ont été qualifiées de "modérément toxiques", c'est-à-dire, proches du seuil. De même, les inhibitions supérieures à 40% (soit 2 fois la valeur de référence pour les essais chroniques) ont été qualifiées de "très toxiques".

Pour rappel, ces niveaux d'inhibition ont été obtenus en exposant les organismes aux éluats (ou les sédiments pour les végétaux) dilués à 10% pour les essais aigus et à 1% pour les essais chroniques.

Le code de couleurs proposé est présenté dans le tableau ci-dessous :

niveau de toxicité	seuil
Toxicité négligeable ou indétectable	Toxicité aigüe : < 50% toxicité chronique : < 15%
Toxicité modérée	Toxicité aigüe : ici sans objet toxicité chronique : [≥ 15% - 25%]
Toxicité élevée	Toxicité aigüe : ici sans objet toxicité chronique : [≥ 25% - 40%]
Toxicité très élevée	Toxicité aigüe : ici sans objet toxicité chronique : ≥ 40%

Tableau 14 – Code couleurs proposé pour la transposition des résultats de la batterie HP14 aux seuils en quatre niveaux de toxicité

En utilisant ce code couleurs, le classement des sédiments obtenu avec la batterie HP14 est le suivant :

Sédiment	Inhibition de la luminescence de <i>V. fischeri</i> à 10%	Inhibition de la reproduction de <i>B. calyciflorus</i> à 1%		Inhibition de la reproduction de <i>C. dubia</i> à 1%	Inhibition de la germination de <i>A. sativa</i> à 10%	Inhibition de la croissance de <i>A. sativa</i> à 10%	Conclusion
Centuri Point 1	0 %	33,3%	3,1%	13,3 %	0 %	0 % ^(f)	Toxicité variable
Toulon Moyen	0 %	15,7%	3,1%	1,4 %	0 %	0 % ^(f)	non toxique
Cagliari Moyen	0 %	33,3 - 28,1%		16,8 %	2,8 %	0 % ^(f)	toxique
Navicelli Point 1	0 %	27,5 - 31,3%		28,3 %	0 %	0 % ^(f)	toxique
Gênes 1	0 %	43,1%	21,9%	0 %	0 %	0 % ^(f)	très toxique
Livourne Moyen	0 %	25,6 - 31,3%		45,1 %	2,8 %	0 % ^(f)	très toxique

Tableau 15 – Synthèse des résultats de la batterie d'essais HP14 aux seuils réalisée sur les sédiments, et conclusions sur la toxicité classée en quatre niveaux

Présentés avec ce classement en 4 niveaux de toxicité, les résultats obtenus avec la démarche "HP14 au seuil" sont cohérents avec ceux obtenus par l'ISPRA. En effet :

- ✓ Pour nos deux laboratoires, l'essai aigu *V. fischeri* n'est pas suffisamment sensible pour détecter une toxicité.
- ✓ Le sédiment "Centuri - point 1" s'avère toxique avec les essais chroniques. On note pour ce sédiment une variabilité des résultats.
- ✓ Le sédiment "Toulon moyen" (mélange des 3 points de prélèvement) s'avère non toxique.
- ✓ Les sédiments "Cagliari moyen" (mélange des 3 points) et "Navicelli - point 1" présentent une toxicité chronique significative.
- ✓ Les sédiments "Gênes 1" et "Livourne moyen" (mélange des 3 points) présentent une toxicité très élevée.

Le classement des sédiments dans l'ordre de leur toxicité croissante est :

- Avec les résultats obtenus par l'ISPRA avec des organismes marins :
Toulon < Centuri < Gênes < Livourne < Cagliari < Navicelli
- Avec les résultats obtenus avec le protocole HP14 :
Toulon < Centuri < Cagliari < Navicelli < Gênes < Livourne

Dans les deux séries d'essais, les sédiments peu ou pas toxiques sont ceux de Toulon et de Centuri.

➤ **Commentaire additionnel relatif aux résultats de caractérisation des sédiments**

Les sédiments objets du programme présentent des caractéristiques particulières au regard des caractéristiques recensées dans le cadre de programmes nationaux (français) de surveillance de la qualité des sédiments. La composition des sédiments de SEDITERRA a été comparée à celles recensées par :

- L'INERIS - Qualité chimique des sédiments marins en France : synthèse des bases de données disponibles – décembre 2010 ; L'INERIS a établi une base de données sédiments marins à partir du Réseau de surveillance de Ports Maritimes (REPOM) animé par l'IFREMER et de deux projets de caractérisation et de traitement de sédiments (PROSED et SEDIMARD). Elle comporte 27 538 données pour 818 échantillons, sur une période allant de 1996 à 2008.
- Le BRGM : Test du protocole d'écotoxicologie pour l'évaluation du caractère dangereux de sédiments destinées à une gestion à terre – janvier 2013 ; Le BRGM a mené un programme national d'application du protocole de caractérisation écotoxicologique de sédiments (H14 Sédiments) destiné à l'évaluation du caractère dangereux de séiments destinés à une gestion à terre, en s'appuyant sur la caractérisation de 47 sédiments marins et 27 sédiments continentaux choisis sur la base des données physico-chimiques disponibles avant l'étude (39 échantillons > S1 pour au moins 1 paramètre et 24 échantillons > S1 pour au moins 2 paramètres)

Particularité des sédiments de Centuri

Au regard des teneurs en éléments métalliques, le sédiment de **Centuri** (haute corse) présente une composition en chrome et nickel particulièrement élevée par rapport aux données nationales.

Le tableau suivant permet de comparer les teneurs en chrome et nickel du sédiment Centuri avec les teneurs médianes et maximales de la base de données de l'INERIS d'une part et des 74 échantillons du programme d'application du BRGM d'autre part.

Elément	Centuri (mg/kg MS)	INERIS Valeur médiane (mg/kg MS)	INERIS Valeur maximale (mg/kg MS)	BRGM Valeur médiane (mg/kg MS)	BRGM Valeur maximale (mg/kg MS)
Chrome	159	51	636	43	101
	296	(812 données)	(812 données)	(74 données)	(74 données)
	155				
Nickel	125	20	214	21	67
	255	(803 données)	(803 données)	(74 données)	(74 données)
	118				

Tableau 16 – Comparaison des teneurs en chrome et nickel du sédiment Centuri avec les valeurs médianes et maximales des programmes nationaux de surveillance de qualité des sédiments

L'abondance particulière de chrome et de nickel dans la composition des sédiments de haute corse a été identifiée dans le cadre de la surveillance du réseau REPOM comme en témoignent les graphes suivants (les valeurs médianes de composition en chrome et nickel des sédiments de haute corse reposent sur l'analyse statistique de 10 données) :

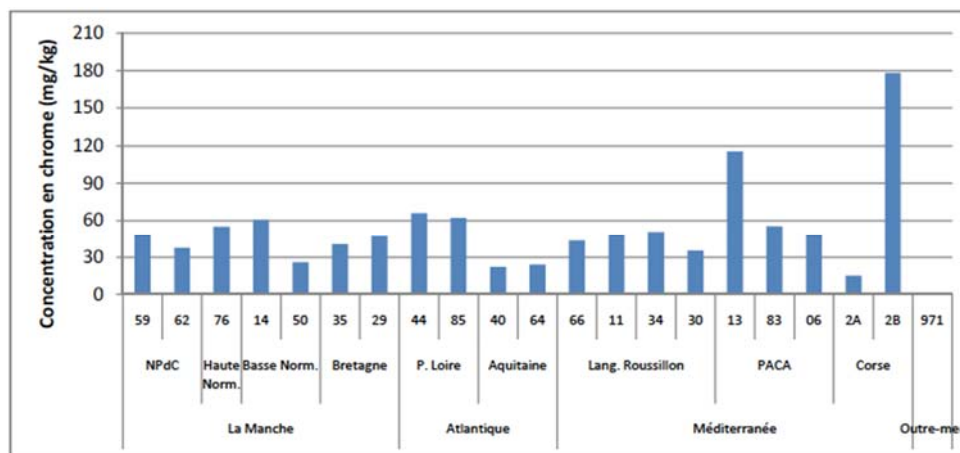


Figure 2 – Répartition par département des valeurs médianes de composition en chrome des sédiments suivi dans le cadre du réseau de surveillance REPOM

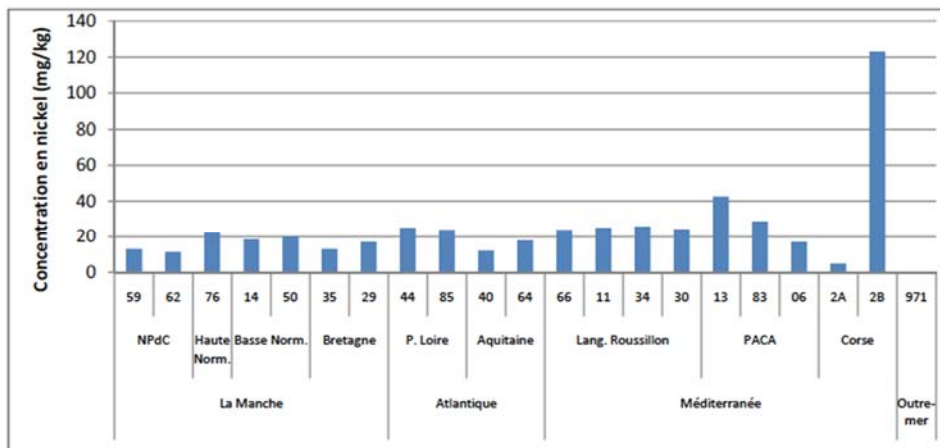


Figure 3 – Répartition par département des valeurs médianes de composition en nickel des sédiments suivi dans le cadre du réseau de surveillance REPOM

N.B. : La carte géologique de la Corse indique que très localement, dans le Port de Centuri, se trouve un affleurement de serpentinite (roche mère métamorphique). Ce minerai est naturellement riche en Ni, Cr et Co, ce qui pourrait expliquer les teneurs élevées mesurées dans les sédiments. Par ailleurs, au sud de Centuri se situe la mine de Canari, où un gisement de serpentinite riche en fibres d’amiante a été exploité entre 1948 et 1965. Sur cette durée d’exploitation, 11 millions de tonnes de résidus minéraux ont été rejetés directement en mer (Bernier et al., 1997 ; Andral et al. (2004a)). Cependant, les courants marins du Cap-Corse étant dirigés du nord vers le sud, la probabilité que ces dépôts en mer des résidus miniers de la mine de Canari soient exportés jusqu’au port de Centuri reste très faible. Une recherche de fibres d’amiante a néanmoins été menée dans nos sédiments pour confirmation. Les résultats obtenus se sont révélés négatifs : les sédiments de Centuri sont riches en Ni et Cr, mais sans contenir de fibres d’amiante.

Particularité des sédiments de Cagliari

Le sédiment de Cagliari présente une composition en cadmium, plomb et zinc élevée par rapport aux données de surveillance nationale de la qualité des sédiments :

Elément	Cagliari (mg/kg MS)	INERIS Valeur médiane (mg/kg MS)	INERIS Valeur maximale (mg/kg MS)	BRGM Valeur médiane (mg/kg MS)	BRGM Valeur maximale (mg/kg MS)
Cadmium	1,81	0,33 (817 données)	8,60 (817 données)	0,6 (74 données)	36,3 (74 données)
	2,31				
	2,5				
Plomb	200	41 (816 données)	1340 (816 données)	58 (74 données)	580 (74 données)
	157				
	140				
Zinc	227	150 (815 données)	3493 (815 données)	195 (74 données)	4140 (74 données)
	344				
	361				

Tableau 17 – Comparaison des teneurs en cadmium, plomb et zinc du sédiment Cagliari avec les valeurs médianes et maximales des programmes nationaux de surveillance de qualité des sédiments

Particularité des sédiments de Pise

Le sédiment de Pise présente une composition en cadmium, nickel et HAP élevée par rapport aux données de surveillance nationale de la qualité des sédiments :

Elément	Cagliari (mg/kg MS)	INERIS Valeur médiane (mg/kg MS)	INERIS Valeur maximale (mg/kg MS)	BRGM Valeur médiane (mg/kg MS)	BRGM Valeur maximale (mg/kg MS)
Cadmium	1,07	0,33 (817 données)	8,60 (817 données)	0,6 (74 données)	36,3 (74 données)
	2,42				
	9,96				
Nickel	60,1	20 (803 données)	214 (803 données)	21 (74 données)	67 (74 données)
	68,4				
	76,2				
HAP	1,1	1,49 (487 données)	232 (487 données)	3,6 (74 données)	91 (74 données)
	30				
	4,5				

Tableau 18 – Comparaison des teneurs en cadmium, nickel et HAP du sédiment Pise avec les valeurs médianes et maximales des programmes nationaux de surveillance de qualité des sédiments

Le bilan du programme d'application du protocole de caractérisation écotoxicologique (HP14) des sédiments, mené par le BRGM a conclu que seulement 4 sédiments marins sur 47 échantillons de sédiments marins (8,5%) pourraient être classés comme dangereux sur la base de leurs caractéristiques écotoxiques.

Il apparaît, par comparaison des données de caractérisation physico-chimique des sédiments étudiés dans le cadre du programme SEDITERRA avec les données des programmes nationaux de surveillance de qualité des sédiments (comprenant les données du programme d'application du BRGM) que la plupart des échantillons de SEDITERRA se situent dans la fourchette haute des teneurs en éléments métalliques (voire contaminants organiques) ce qui peut expliquer, pour partie au moins, les niveaux d'écotoxicité supérieurs observés pour les échantillons de SEDITERRA, par rapport à ceux du programme d'application du protocole HP14.

5.1.3) Caractérisation de la fraction lixiviable des sédiments (Essai de conformité EN 12457-2)

La norme NF EN 12457-2 constitue le protocole de référence employé en France pour l'application de la Décision du Conseil 2003/33/CE du 19 décembre 2002 relative aux conditions d'admission des déchets en installations de stockage.

Ce protocole est également celui qui permet de vérifier, en première approche, l'aptitude environnementale d'un matériau alternatif à une utilisation en technique routière.

Les résultats de caractérisation de la fraction lixiviable des sédiments de SEDITERRA selon ce protocole sont présentés dans le tableau 19 suivant :

Paramètres	pH	Conductivité (µS/cm)	Résidus secs à 105 °C	Indice phénol (IPh)	COT	Cl	F	SO4	Sb	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Corse M	7,8	5880	39300	<0,51	<51	16500	7,64	3790	0,012	<0,20	<0,10	<0,002	<0,10	0,25	<0,001	0,62	<0,10	<0,10	<0,01	<0,20
Toulon M	8,2	3350	21200	<0,50	87	9350	9,52	1980	0,033	<0,20	<0,10	<0,002	<0,10	<0,20	<0,001	1,27	<0,10	<0,10	<0,01	<0,20
Cagliari M	7,9	3070	23400	<0,50	64	5970	8,46	5600	0,079	<0,20	0,44	0,003	<0,10	0,52	<0,001	1,02	<0,10	<0,10	<0,01	<0,20
Pize M	8,1	5170	28800	<0,50	210	14500	9	3560	0,063	<0,20	0,72	<0,002	<0,10	<0,20	<0,001	0,833	<0,10	<0,10	<0,01	<0,20
Gênes	8,1	3520	21400	<0,50	56	9270	7,06	2250	0,014	<0,20	0,15	<0,002	<0,10	0,91	<0,001	0,101	<0,10	<0,10	<0,01	<0,20
Livourne M	7,8	2310	16900	<0,50	<50	4360	5,88	5370	<0,005	<0,20	0,29	<0,002	<0,10	<0,20	<0,001	0,19	<0,10	<0,10	<0,01	<0,20
Seuils ISDI			4000	1	500	800	10	1000	0,06	0,5	20	0,04	0,5	2	0,01	0,5	0,4	0,5	0,1	4
Seuils ISDND			60000	-	-	15000	150	20000	0,7	2	100	1	10	50	0,2	10	10	10	0,5	50

Tableau 19 – Résultats de caractérisation de la fraction lixiviable des sédiments de SEDITERRA confrontés aux valeurs limites d'admission de déchets en ISDI et en ISDND

Ces résultats confrontés aux valeurs limites d'admission en ISDI et en ISDND montrent que :

- Aucun des sédiments n'est admissible, en l'état en ISDI, du fait d'un dépassement de la Fraction soluble (résidu sec) et de dépassement en chlorures et sulfates lixiviables
- Les échantillons de Cagliari et de Pise présentent un dépassement en antimoine et molybdène
- Les échantillons de Centuri et de Toulon présentent un dépassement en molybdène
- Tous les échantillons sont conformes aux seuils européens pour l'admission de déchets en installation de stockage de déchets non dangereux, le dépassement en chlorures du sédiment Centuri n'est pas pénalisant dans la mesure où la fraction soluble ne dépasse pas la valeur limite.

Ainsi, les six sédiments se situent tous dans la catégorie des déchets potentiellement admissibles en Installation de stockage de déchets non dangereux mais non admissibles directement en Installation de stockage de déchets inertes.

Sous réserve de vérification de leur variabilité, les six sédiments de SEDITERRA sont conformes au niveau 1 de caractérisation environnementale des matériaux alternatifs utilisés en technique routière. Leur aptitude environnementale à la valorisation en technique routière est conditionnée par leur conformité au niveau 2 de caractérisation environnementale qui repose sur l'essai de percolation en colonne EN 14405.

5.1.4) Caractérisation du comportement à la percolation – Essai de conformité CEN/TS 14405

La norme NF CEN/TS 14405 constitue le protocole de référence employé en France pour la caractérisation environnementale de niveau 2 des matériaux alternatifs utilisés en technique routière (guide SETRA, 2011).

L'essai de percolation en colonne TS 14405 a été appliqué à chacun des quatre sédiments sélectionnés lors du Comité Technique du 20 septembre 2017 à La Seyne s/ mer (cf. [7]). Les résultats sont rassemblés dans le tableau 20 suivant :

Paramètres	Percolation NF CEN/TS 14405 (mg/kg MS)														
	Cl	F	SO4	Sb	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Centuri M	13124	16,5	5259	0,012	0,041	0,162	0,0019	0,0065	0,039	0,001	0,81	0,054	0,0119	0,005	0,145
Toulon M	33839	6,24	9313	0,028	0,024	0,114	0,0036	0,0041	0,045	0,0012	1,45	0,023	0,0054	0,016	0,155
Cagliari M	7754	16,6	17230	0,148	0,033	0,209	0,0147	0,0026	0,068	0,001	2,38	0,052	0,0042	0,004	0,452
LivourneM	4250	5,83	6563	0,005	0,008	0,119	0,0012	0,0033	0,03	0,013	0,16	0,014	0,0033	0,006	0,025
Seuils Remblais	5000	30	5000	0,2	0,5	28	0,16	2	50	0,04	2,8	0,8	0,5	0,4	50
Seuils Sous-couche	10000	60	10000	0,4	0,8	56	0,32	4	50	0,08	5,6	1,6	0,8	0,5	50

Tableau 20 – Résultats de caractérisation du comportement à la percolation des sédiments de SEDITERRA confrontés aux valeurs limites d’acceptabilité environnementale de l’utilisation de matériaux alternatifs en technique routière

Ces résultats confrontés aux valeurs limites d’acceptabilité en technique routière montrent que :

- Aucun des quatre sédiments sélectionnés n’est valorisable, en l’état, en remblai simplement recouvert d’une couche de 30 cm de matériaux naturels (dont terre végétale), du fait de dépassements des valeurs limites d’émission dans l’eau de chlorures et de sulfates
- Seul le sédiment de Livourne présenterait des caractéristiques de comportement à la percolation conformes aux conditions requises selon le niveau 2 de caractérisation environnementale du Guide SETRA) pour une valorisation en sous-couche de chaussée ou d’accotement revêtu d’une couche de surface réputée peu perméable.

Néanmoins, le guide SETRA 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 (essai de niveau 3).

5.2) CARACTERISATION COMPLEMENTAIRE DE L’INFLUENCE DU PH EN CONDITIONS STATIONNAIRES SUR LE COMPORTEMENT A LA LIXIVIATION NF EN 14 429

La norme pr NF EN 14 429 a deux principaux objectifs :

- La détermination de la capacité de neutralisation acido-basique du matériau qui renseigne sur sa résistance à une agression extérieure acide ou basique
- La détermination des courbes de disponibilité des polluants en fonction du pH et les quantités de réactif ajoutées pour atteindre les différents pH

5.2.1) Principe de l'essai

Différentes prises d'essai sont mises en contact pendant 48 heures à un ratio liquide/solide L/S de 10 mL/g avec des lixivants contenant différentes quantités de réactif (acide ou base). L'objectif étant de couvrir une gamme de pH allant de 4 à 12 (8 points au minimum, ces deux valeurs incluses) après les 48h de mise en contact. L'ajout du lixiviant à la prise d'essai s'effectue en trois étapes : à 30 min, 1h et 2h.

Les quantités d'acide ou de base nécessaires pour couvrir la plage de pH sont d'une part déduites des résultats d'essais préliminaires et d'autre part quelques essais sont refaits pour ajuster les écarts entre deux points de pH qui ne doivent pas dépasser 1,5 unité pH. Les conditions stationnaires sont vérifiées à la fin de la période d'extraction (48 heures) à travers la variation du pH.

Sur chacun des éluats produits par ces essais, les éléments suivants ont été analysés : As, Ba, Cd, Cr(t), Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se et Zn.

5.2.2) Résultats et commentaires

L'ensemble des résultats figure en annexe de ce rapport sous forme de tableaux et de graphiques à raison d'un tableau par essai et de deux graphiques par élément et pour les 4 essais.

Sur le premier à gauche sont présentés, sur une échelle logarithmique, les concentrations en fonction du pH. Sur la deuxième figure toujours les concentrations exprimées en fonction des quantités ajoutées d'acide ou de base. Ce graphique comporte deux axes de coordonnées où sont présentées à la fois les courbes pH de neutralisation et les courbes de concentrations. Cette double représentation permet d'avoir à la fois la concentration, le pH et la quantité de réactif nécessaire pour atteindre ce pH.

➤ Exemple de lecture de graphique

Les courbes réalisées avec des lignes continues représentent les concentrations. Pour un point quelconque on peut lire la valeur de la concentration sur l'axe verticale de gauche et la quantité de réactif sur l'axe des abscisses en bas. Le pH de ce point est celui du point correspondant sur la courbe pH.

Exemple voir la courbe ci-dessous : Pour lire le pH du point (A) de la courbe dans le rond supérieur, on cherche le point de croisement entre la verticale passant par ce point (A) et la courbe pH correspondante « en pointillés » (2ème rond en bas). Le pH est à lire sur l'axe des coordonnées de droite. Soit dans ce cas : 5.

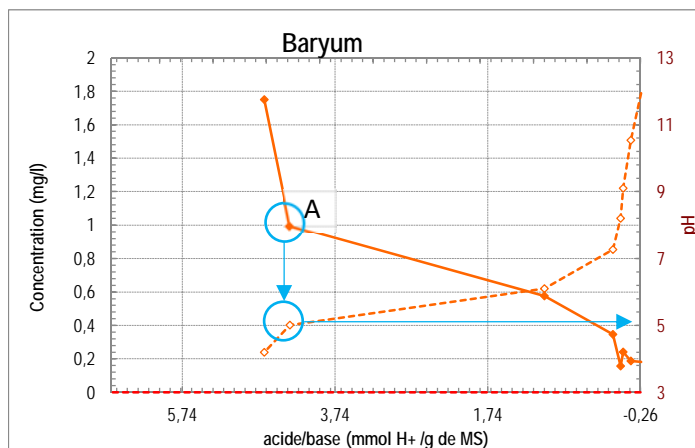


Figure 4 – Exemple d’illustration de résultats de détermination de l’influence du pH

➤ **Capacité de neutralisation acide : Capacité de neutralisation acide des quatre sédiments**

La légende fournie ici est une légende standard valable pour l’ensemble des graphiques. Sur celui-ci il n’y a que les courbes pH représentées en pointillés.

Les pH naturels des matériaux correspondent aux pH résultant de la mise en contact des échantillons avec l'eau déminéralisée seule et se situent sur la verticale au point d’abscisses zéro.

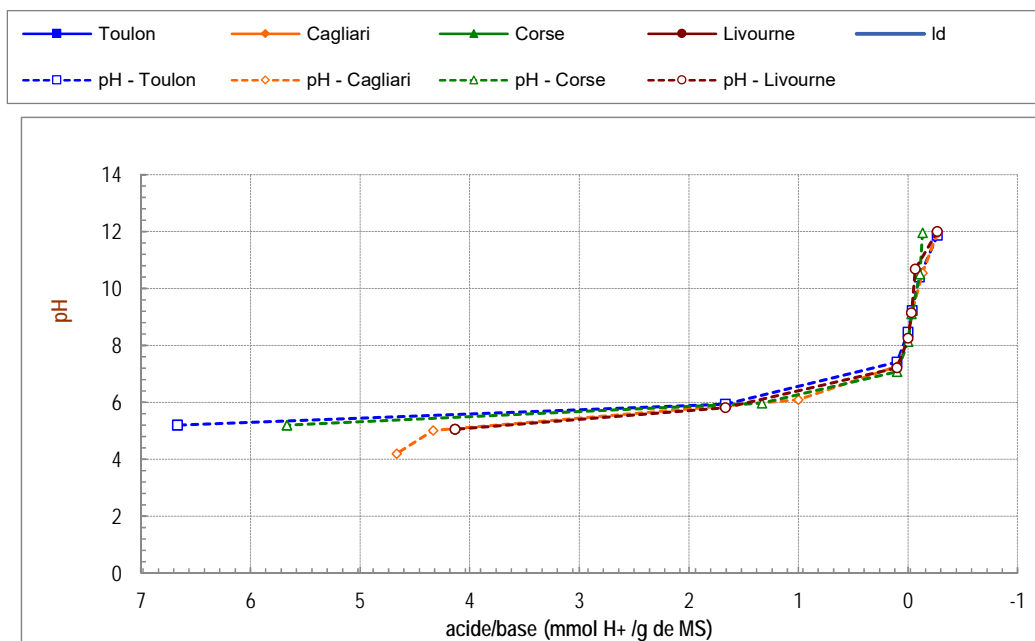


Figure 5 – Courbe de capacité de neutralisation acido-basique des quatre sédiments

Sur cette figure on constate que l'échelle des abscisses est inversée. L'inversion de l'axe est faite pour faire correspondre le sens de lecture aux figures représentées en fonction du pH comme on peut le voir sur les pages suivantes.

Quant à l'étendue de l'échelle cela correspond à la capacité de neutralisation acido-basique des sédiments représentés. On peut constater que les courbes sont quasi superposées. On constate également que pour les quatre sédiments il suffit de moins de 0,3 mmol/g de soude pour passer du pH naturel (autour de 8,25 - 8,5) à un pH supérieur à 12. En revanche pour la branche acide, on constate une large disparité des résultats. Pour atteindre un pH de 4 il faut 4,67 mmol d'acide /g pour le sédiment de Cagliari par contre il en faut bien plus pour les autres sédiments riches en coquillages au point où nous avons dû interrompre les essais concernant le pH 4 après l'ajout de 16 mmol/g.

➤ **Disponibilité en fonction du pH**

Les différents éléments analysés peuvent être classés en trois grandes catégories selon leur comportement en fonction du pH comme le montrent les représentations suivantes :

- les éléments dépendants du pH et ayant un comportement amphotère (arsenic, chrome, cuivre, nickel, sélénium et zinc)
- les éléments dépendants du pH ayant une solubilité accrue en condition acide (baryum)
- les éléments dépendants du pH ayant une solubilité accrue en condition basique (molybdène)

➤ **Cas des éléments présentant un caractère amphotère**

Nous présentons ci-dessous deux exemples d'éléments dépendants du pH. Le nickel qui est, comparé au pH acide, peu sensible au pH basique. On notera que les courbes en fonction du pH sont quasi semblables sur les graphiques de gauche. La concentration en nickel devient mesurable de part et d'autre de l'intervalle (8 - 10,5) sauf pour le sédiment corse qui présente des valeurs mesurables sur l'ensemble de la gamme pH testée. Du côté acide la concentration croît rapidement avec la diminution de pH alors que du côté basique elle montre un faible accroissement. Le comportement du zinc est similaire de celui-ci.

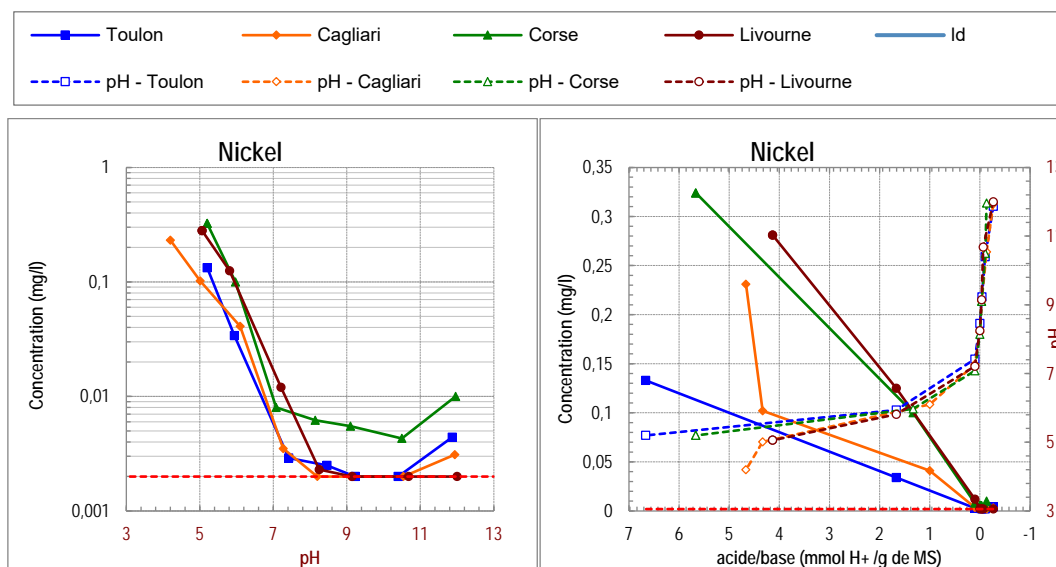


Figure 6 – Résultats de détermination de l'influence du pH sur le comportement à la lixiviation du nickel des quatre sédiments

Pour deuxième exemple on présente le cuivre dont le comportement est semblable à celui de l'arsenic, du chrome et du sélénium.

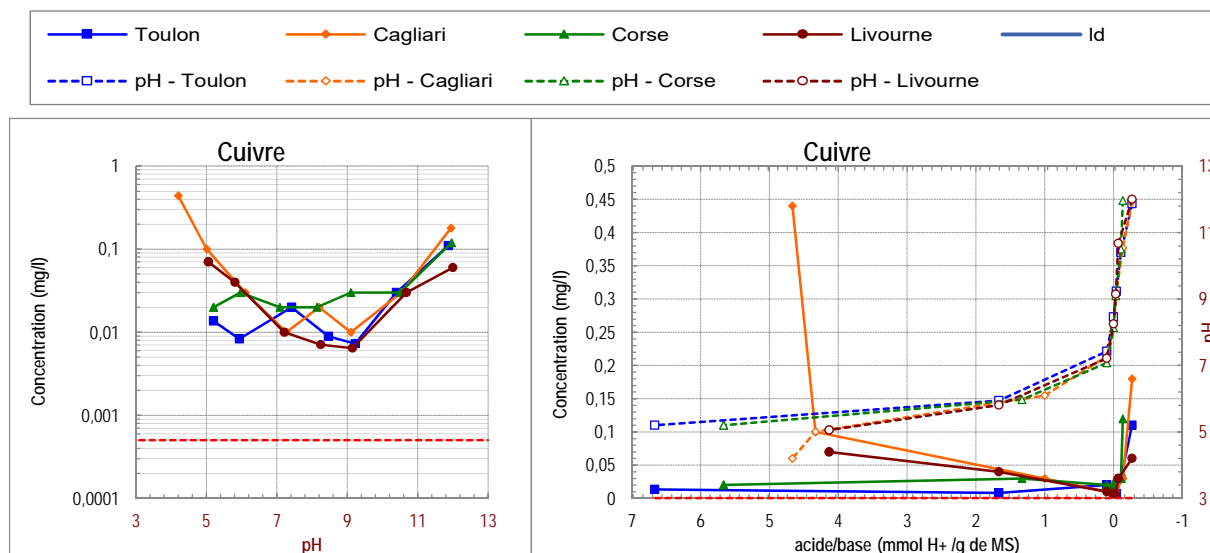


Figure 7 – Résultats de détermination de l'influence du pH sur le comportement à la lixiviation du cuivre des quatre sédiments

Dans ce cas on distingue nettement le caractère amphotère du fait que les deux branches acide et basique remontent clairement pour les deux sédiments de Cagliari et Livourne. Rappelons que seul l'échantillon Cagliari a été placé à pH 4.

➤ **Cas des éléments solubles en milieu acide**

Seul le baryum présente ce comportement. Il croit de façon inversement proportionnelle à la valeur du pH. Cette croissance n'est pas évidente si on regarde sédiment par sédiment mais l'allure globale est claire notamment les teneurs à pH 12 présentent bien une diminution par rapport aux points de pH inférieur.

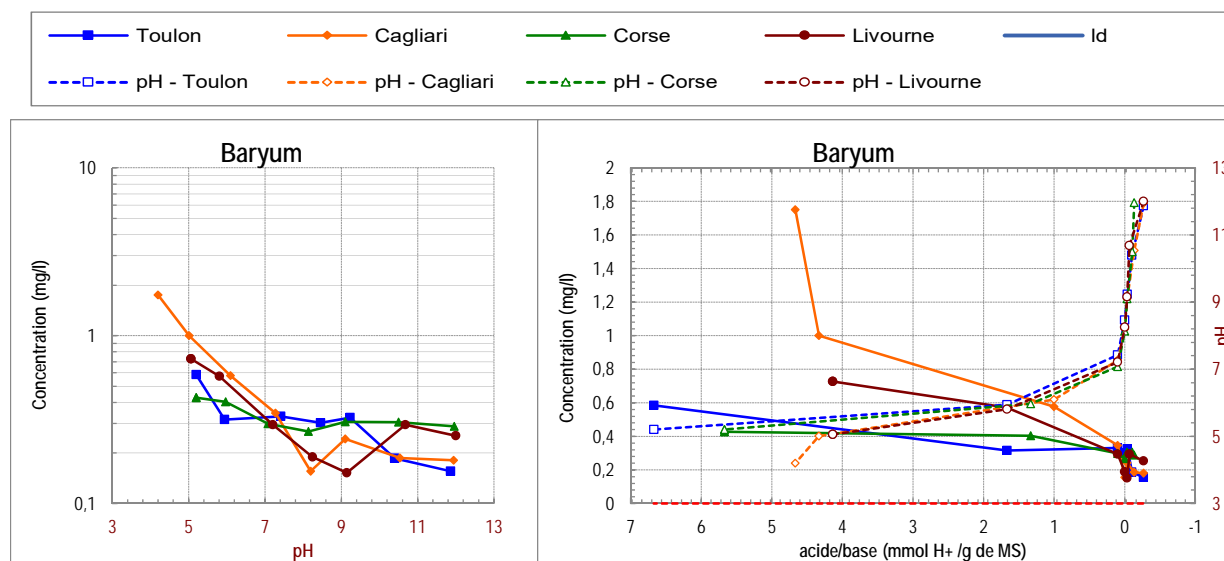


Figure 8 – Résultats de détermination de l'influence du pH sur le comportement à la lixiviation du baryum des quatre sédiments

➤ **Cas des éléments solubles en milieu basique**

Nous avons dans ce cas le molybdène dont la concentration présente une croissance proportionnelle en fonction du pH. Contrairement à l'exemple précédent (baryum), ici sur le graphique de gauche, les courbes sont bien régulières et l'accroissement de concentration est bien visible. Sur le graphique de droite l'accroissement est quasi exponentiel même si les valeurs restent à un niveau de concentration très faible.

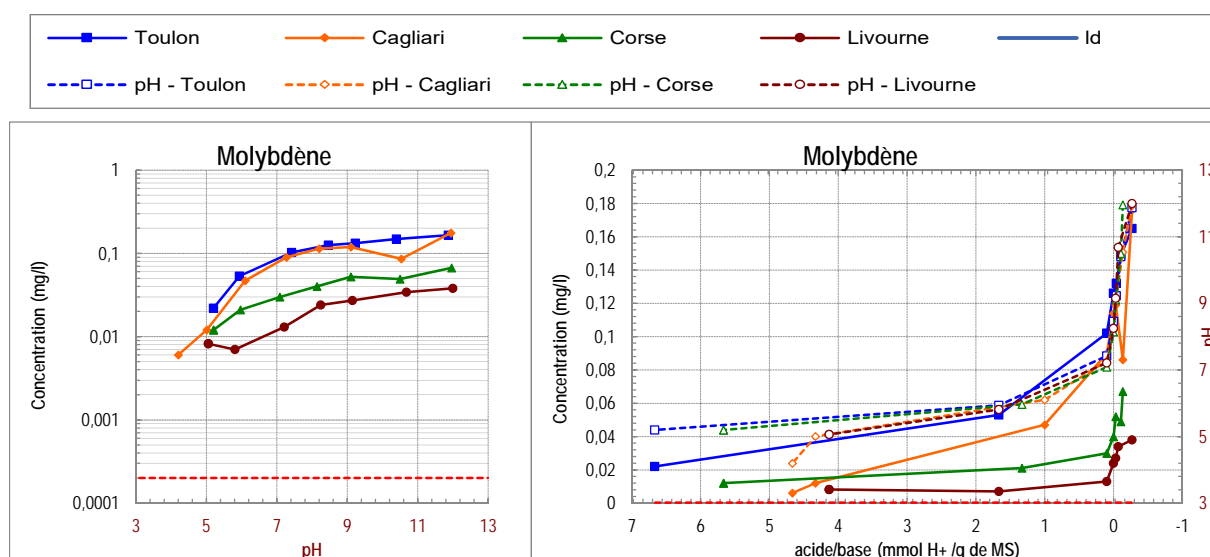


Figure 9 – Résultats de détermination de l'influence du pH sur le comportement à la lixiviation du molybdène des quatre sédiments

➤ **Commentaire global**

De l'ensemble de ces essais de caractérisation du comportement à la lixiviation sous l'influence du pH, il ressort que les quatre échantillons testés présentent tous une faible capacité de neutralisation basique contre une forte capacité de neutralisation acide.

Cette plus grande sensibilité des sédiments à un contexte basique doit amener à une vigilance particulière quant à la solubilisation potentiellement accrue d'éléments contenus dans les sédiments lorsqu'ils sont placés dans un tel contexte physico-chimique comme ce peut-être le cas dans des formulations de matériau à base de liants hydrauliques ou pouzzolaniques.

Les éléments contenus dans ces sédiments qui apparaissent comme les plus sensibles à un contexte basique sont l'arsenic, le chrome, le cuivre, le nickel, le sélénium, le zinc ainsi que le molybdène.

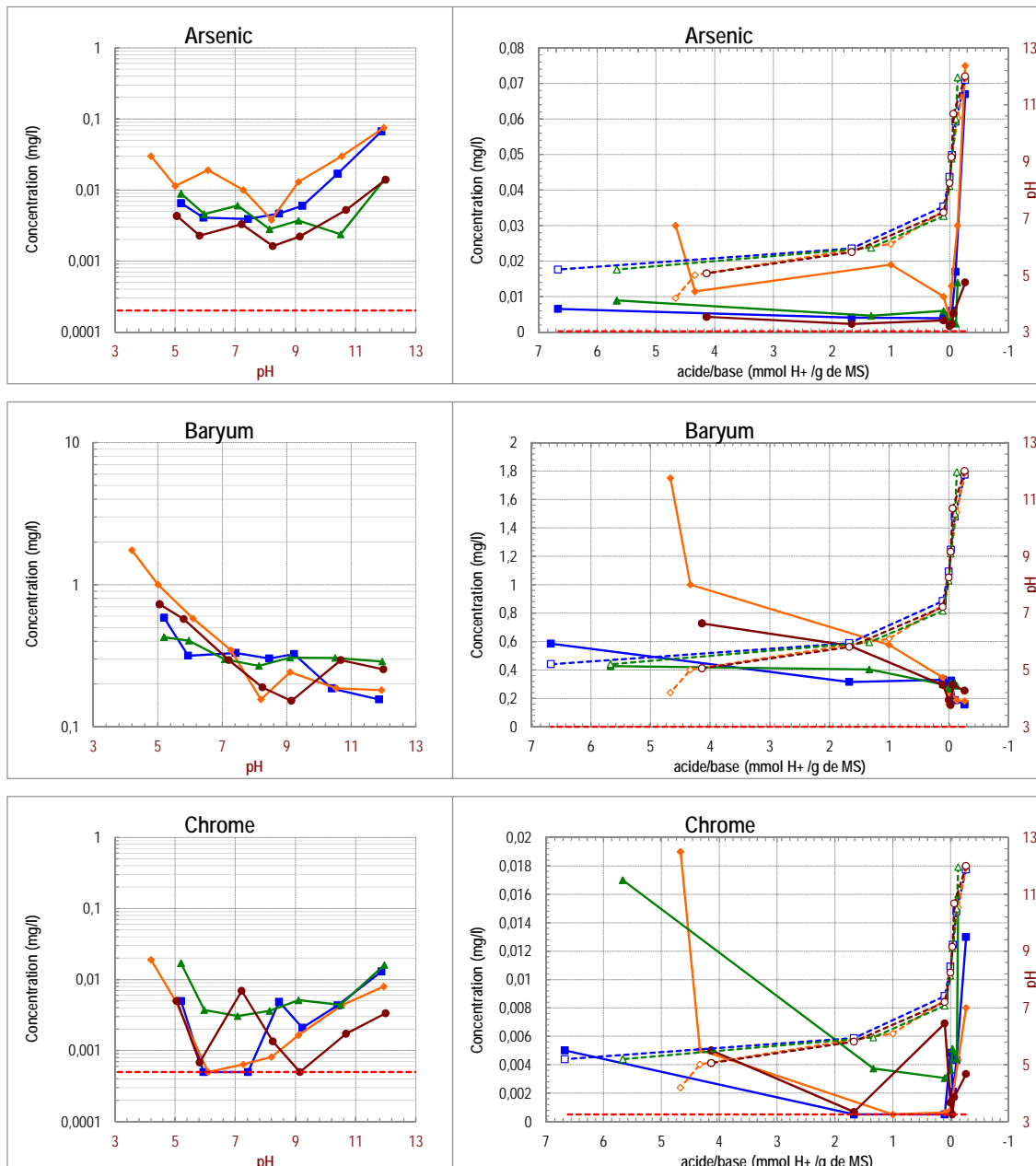
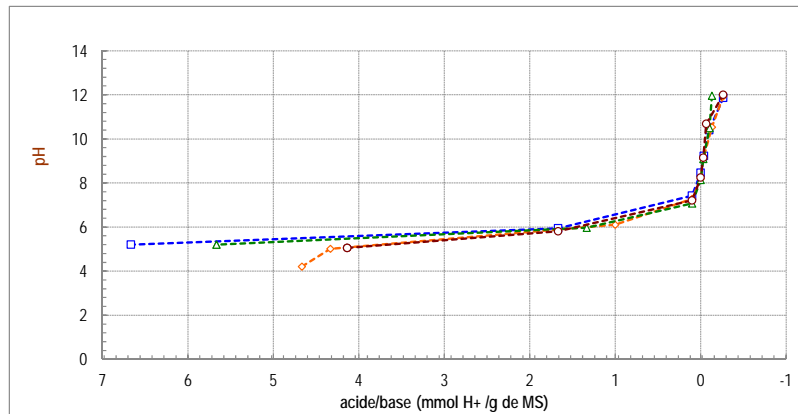
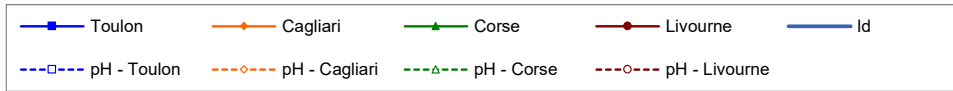
Néanmoins, les niveaux de concentration observés restent très faibles puisque les valeurs les plus élevées (chrome et molybdène) atteignent seulement de l'ordre de 0,1 mg/l.

Les différences de niveau de concentration entre les quatre sédiments sont globalement peu représentatives.

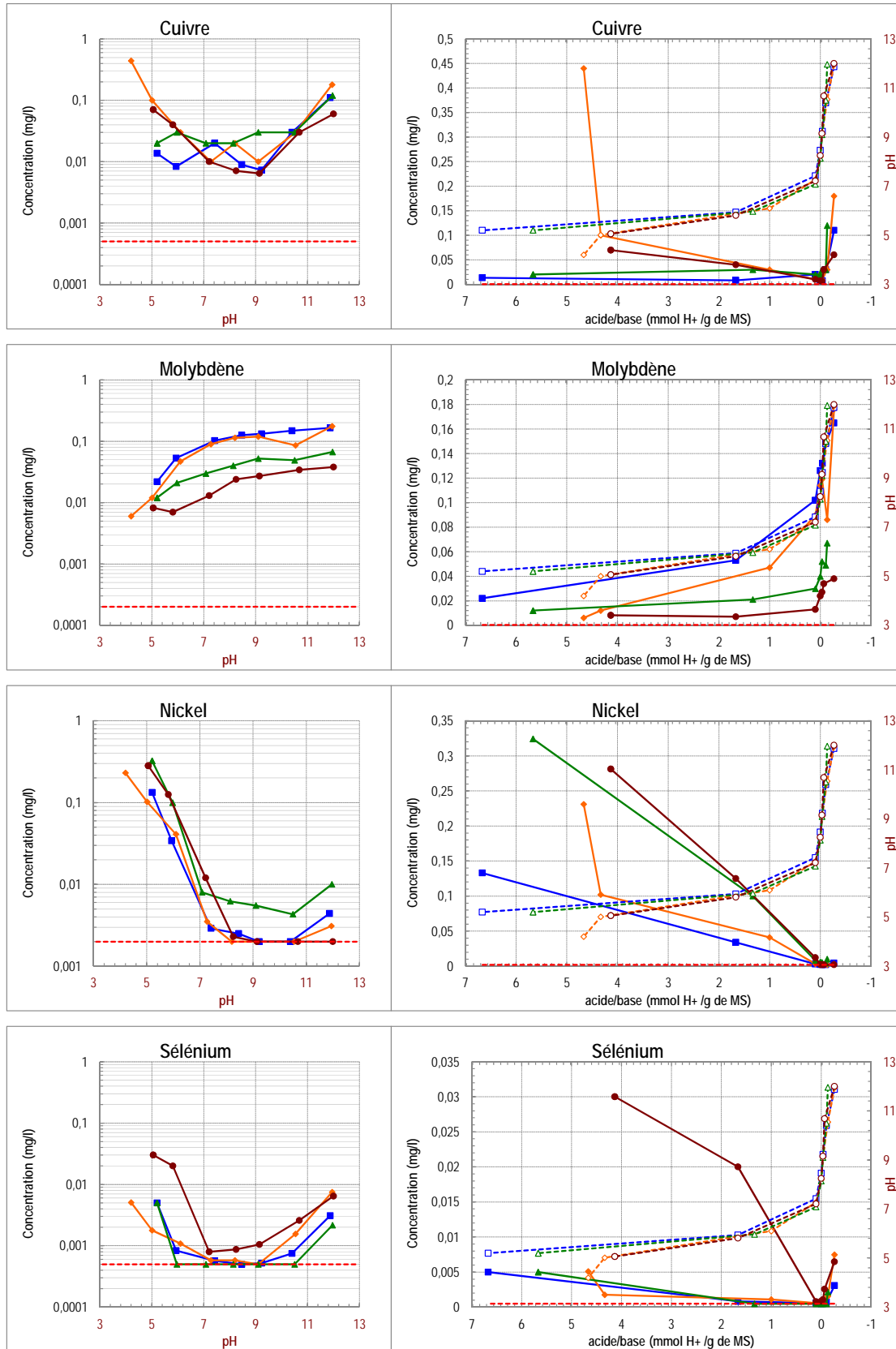
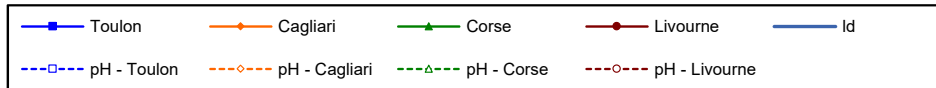
ANNEXES

Résultats expérimentaux des essais d'influence du pH en conditions stationnaires NF EN 14429

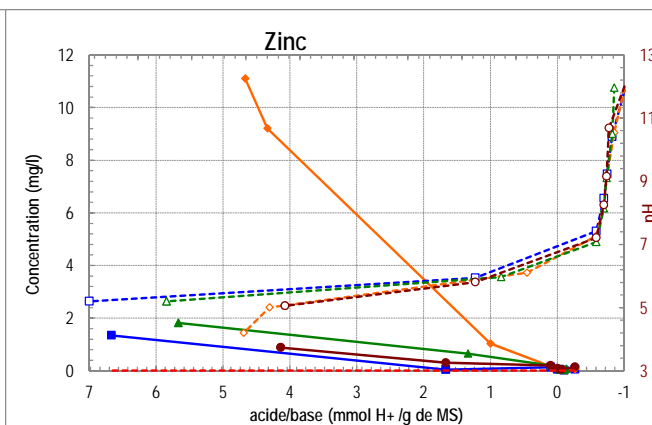
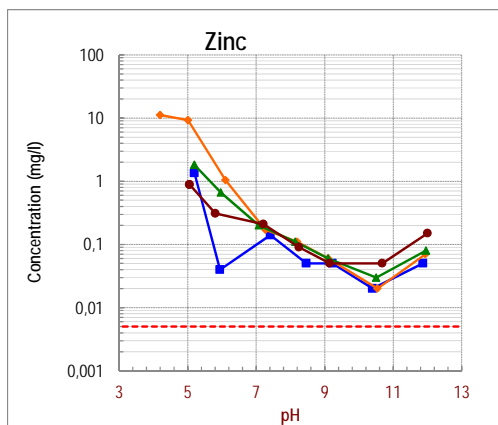
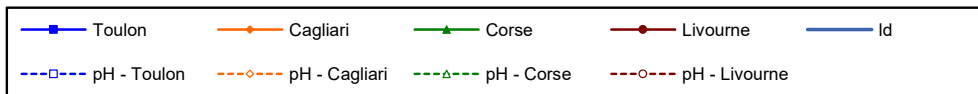
Résultats expérimentaux - Essai pH en conditions stationnaires





Résultats expérimentaux - Essai pH en conditions stationnaires



Résultats expérimentaux - Essai pH en conditions stationnaires



Essai pH en conditions stationnaires -selon la norme EN 14429

Matériau/déchet	Toulon							
Granulométrie	< 1 mm							
date	24/10 au 08/11/2017							
								
Référence de lixiviation	1	2	3	4	5	6	7	8
Matériau sec (g)	15	15	15	15	15	15	15	15
H2O (ml)	146	148,45	149,4	150	148,5	125	50	
acide (ml)				0	1,5	25	100	
base (ml)	4	1,55	0,6	0				
conc. acide ou base (M)	1	1	1	0	1	1	1	
H+ ajouté (mmol/g)	-0,27	-0,10	-0,04	0,00	0,10	1,67	6,67	
L/S (ml/g)	10	10	10	10	10	10	10	
pH après 4h	12,02	10,98	9,81	8,42	6,85	5,61	2,03	
pH après 44h	11,88	10,46	9,3	8,51	7,35	5,81	4,5	
DpH entre 4h et 44h	-0,14	-0,52	-0,51	0,09	0,5	0,2	2,47	
pH à 48h	11,87	10,4	9,23	8,46	7,42	5,94	5,2	
DpH entre 44h et 48h	-0,01	-0,06	-0,07	-0,05	0,07	0,13	0,7	
Conductivité (µS/cm à 20 °c)	6887	4710	4677	4607	5744	18390	48028	

Référence de lixiviation			1	2	3	4	5	6	7
n°	Elément	ld	Concentration (mg/l)						
1*	Antimoine (Sb)	0,0002	0,0103	0,00873	0,00594	0,00303	0,00306	0,0032	0,00471
2	Arsenic (As)	0,0002	0,067	0,017	0,00597	0,00466	0,00391	0,00407	0,00654
3	Baryum (Ba)	0,005	0,156	0,186	0,325	0,302	0,33	0,316	0,585
4*	Cadmium (Cd)	0,0002	0,00022	0,00022	0,00025	0,00023	0,00086	0,00023	0,007
5	Chrome (Cr)	0,0005	0,013	0,00434	0,0021	0,00484	0,0005	0,0005	0,005
6	Cuivre (Cu)	0,0005	0,11	0,03	0,00727	0,00892	0,02	0,0083	0,0136
7	Etain (Sn)	0,001	0,0017	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01
8	Mercure (Hg)	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
9	Molybdène (Mo)	0,0002	0,165	0,149	0,132	0,126	0,102	0,053	0,022
10	Nickel (Ni)	0,002	0,0044	0,002	0,002	0,0025	0,0029	0,034	0,133
11*	Plomb (Pb)	0,0005	0,083	0,00317	0,00259	0,00523	0,014	0,00568	0,073
12	Sélénium (Se)	0,0005	0,00309	0,00075	0,00052	0,0005	0,00057	0,00083	0,005
13	Zinc (Zn)	0,005	0,05	0,02	0,05	0,05	0,14	0,04	1,35

ld =Limite de détection
0,005 Les teneurs < ld sont remplacées par les valeurs des limites correspondantes et écrites en gris et souligner
(*) Les éléments dont les numéros d'ordre sont affectés d'un astérisque, ne sont pas représentés graphiquement

Essai pH en conditions stationnaires -selon la norme EN 14429

Matériau/déchet	Cagliari							
Granulométrie	< 1 mm							
date	24/10 au 08/11/2017							
Référence de lixiviation	1	2	3	4	5	6	7	8
Matériau sec (g)	15	15	15	15	15	15	15	15
H2O (ml)	146	148	149,5	150	148,5	135	85	80
acide (ml)	0	0	0	0	1,5	15	65	70
base (ml)	4	2	0,5	0	0	0	0	0
conc. acide ou base (M)	1	1	1	0	1	1	1	1
H+ ajouté (mmol/g)	-0,27	-0,13	-0,03	0,00	0,10	1,00	4,33	4,67
L/S(ml/g)	10	10	10	10	10	10	10	10
pH après 4h	12,02	11,5	10,05	8,78	7,17	5,68	1,12	1,05
pH après 44h	11,94	10,67	9,11	8,24	7,16	5,94	3,8	3,5
DpH entre 4h et 44h	-0,08	-0,83	-0,94	-0,54	-0,01	0,26	2,68	2,45
pH à 48h	11,94	10,54	9,1	8,2	7,27	6,1	5,01	4,2
DpH entre 44h et 48h	0	-0,13	-0,01	-0,04	0,11	0,16	1,21	0,7
Conductivité (µS/cm à 20 °c)	5586	3025	2948	2799	3942	11763	32937	34851





Référence de lixiviation			1	2	3	4	5	6	7	8
n°	Elément	ld*	Concentration (mg/l)							
1*	Antimoine (Sb)	0,0002	0,02	0,0162	0,0125	0,00971	0,0107	0,0148	0,00674	0,00677
2	Arsenic (As)	0,0002	0,075	0,03	0,013	0,00378	0,01	0,019	0,0114	0,03
3	Baryum (Ba)	0,005	0,181	0,187	0,242	0,156	0,346	0,577	1	1,75
4*	Cadmium (Cd)	0,0002	0,00024	<u>0,0002</u>	0,00031	0,00069	0,00142	0,016	0,082	0,088
5	Chrome (Cr)	0,0005	0,008	0,00434	0,00165	0,00081	0,00064	<u>0,0005</u>	0,00504	0,019
6	Cuivre (Cu)	0,0005	0,18	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,1	0,44
7	Etain (Sn)	0,001	<u>0,001</u>	<u>0,001</u>	<u>0,001</u>	<u>0,001</u>	<u>0,001</u>	<u>0,001</u>	<u>0,001</u>	<u>0,01</u>
8	Mercure (Hg)	0,0002	<u>0,0002</u>	<u>0,0002</u>	<u>0,0002</u>	<u>0,0002</u>	<u>0,0002</u>	<u>0,0002</u>	<u>0,0002</u>	<u>0,0002</u>
9	Molybdène (Mo)	0,0002	0,176	0,086	0,119	0,114	0,09	0,047	0,012	0,00599
10	Nickel (Ni)	0,002	0,0031	<u>0,002</u>	<u>0,002</u>	<u>0,002</u>	0,0035	0,041	0,102	0,231
11*	Plomb (Pb)	0,0005	0,037	<u>0,005</u>	0,00231	0,00254	0,008	0,022	0,199	0,731
12	Sélénium (Se)	0,0005	0,00749	0,00156	0,0005	0,00058	0,00058	0,00109	0,00178	0,00509
13	Zinc (Zn)	0,005	0,07	<u>0,02</u>	0,06	0,11	0,17	1,04	9,21	11,1

ld = Limite de détection

0,005 Les teneurs < ld sont remplacées par les valeurs des limites correspondantes et écrites en gris et souligner

(*) Les éléments dont les numéros d'ordre sont affectés d'un astérisque, ne sont pas représentés graphiquement

Essai pH en conditions stationnaires -selon la norme EN 14429

Matériau/déchet	Corse								 
Granulométrie	< 1 mm								
date	24/10 au 08/11/2017								
Référence de lixiviation	1	2	3	4	5	6	7	8	
Matériau sec (g)	15	15	15	15	15	15	15	15	
H2O (ml)	148	148,4	149,5	150	148,5	130	65		
acide (ml)	0	0	0	0	1,5	20	85		
base (ml)	2	1,6	0,5	0	0	0	0		
conc. acide ou base (M)	1	1	1	0	1	1	1		
H+ ajouté (mmol/g)	-0,13	-0,11	-0,03	0,00	0,10	1,33	5,67		
L/S(ml/g)	10	10	10	10	10	10	10		
pH après 4h	12	10,8	9,96	8,5	6,8	5,64	1,36		
pH après 44h	11,95	10,76	9,2	8,2	6,98	5,83	4,05		
DpH entre 4h et 44h	-0,05	-0,04	-0,76	-0,3	0,18	0,19	2,69		
pH à 48h	11,96	10,5	9,1	8,14	7,08	5,97	5,2		
DpH entre 44h et 48h	0,01	-0,26	-0,1	-0,06	0,1	0,14	1,15		
Conductivité (µS/cm à 20 °c)	7322	4801	4749	4717	5769	15639	42638		

Référence de lixiviation			1	2	3	4	5	6	7	
n°	Elément	ld	Concentration (mg/l)							
1*	Antimoine (Sb)	0,0002	0,00289	0,00112	0,00099	0,00075	0,00089	0,00124	<u>0,002</u>	
2	Arsenic (As)	0,0002	0,014	0,00238	0,00371	0,00282	0,006	0,00458	0,00889	
3	Baryum (Ba)	0,005	0,288	0,305	0,306	0,268	0,299	0,403	0,427	
4*	Cadmium (Cd)	0,0002	<u>0,0002</u>	<u>0,0002</u>	<u>0,0002</u>	0,00021	0,00028	0,00151	0,00686	
5	Chrome (Cr)	0,0005	0,016	0,00441	0,00514	0,00363	0,00306	0,00373	0,017	
6	Cuivre (Cu)	0,0005	0,12	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	
7	Etain (Sn)	0,001	0,0015	<u>0,001</u>	<u>0,001</u>	0,0476	0,0476	<u>0,001</u>	<u>0,01</u>	
8	Mercure (Hg)	0,0002	<u>0,0002</u>	<u>0,0002</u>	<u>0,0002</u>	0,0002	0,0002	<u>0,0002</u>	<u>0,0002</u>	
9	Molybdène (Mo)	0,0002	0,067	0,049	0,052	0,04	0,03	0,021	0,012	
10	Nickel (Ni)	0,002	0,01	0,0043	0,0055	0,0062	0,008	0,1	0,324	
11*	Plomb (Pb)	0,0005	0,027	0,00149	0,009	0,007	0,006	0,017	0,021	
12	Sélénium (Se)	0,0005	0,00217	<u>0,0005</u>	<u>0,0005</u>	<u>0,0005</u>	<u>0,0005</u>	<u>0,0005</u>	<u>0,005</u>	
13	Zinc (Zn)	0,005	0,08	0,03	0,06	0,11	0,2	0,66	1,82	

ld = Limite de détection

0,005 | Les teneurs < ld sont remplacées par les valeurs des limites correspondantes et écrites en gris et souligner

(*) | Les éléments dont les numéros d'ordre sont affectés d'un astérisque, ne sont pas représentés graphiquement

Essai pH en conditions stationnaires -selon la norme EN 14429

Matériau/déchet	Livourne							
Granulométrie	< 1 mm							
date	24/10 au 08/11/2017							
								
Référence de lixiviation	1	2	3	4	5	6	7	8
Matériau sec (g)	15	15	15	15	15	15	15	
H2O (ml)	146	149	149,5	150	148,5	125	88	
acide (ml)	0	0	0	0	1,5	25	62	
base (ml)	4	1	0,5	0	0	0	0	
conc. acide ou base (M)	1	1	1	0	1	1	1	
H+ ajouté (mmol/g)	-0,27	-0,07	-0,03	0,00	0,10	1,67	4,13	
L/S(ml/g)	10	10	10	10	10	10	10	
pH après 4h	12,05	11,07	9,97	8,62	6,93	5,47	3,47	
pH après 44h	12,04	10,74	9,33	8,035	7,14	5,69	4,93	
DpH entre 4h et 44h	-0,01	-0,33	-0,64	8026,38	0,21	0,22	1,46	
pH à 48h	12	10,68	9,15	8,25	7,21	5,81	5,06	
DpH entre 44h et 48h	-0,04	-0,06	-0,18	-8026,75	0,07	0,12	0,13	
Conductivité (µS/cm à 20 °c)	5509	2380	2202	2303	3329	16281	31212	

Référence de lixiviation			1	2	3	4	5	6	7
n°	Elément	ld	Concentration (mg/l)						
1*	Antimoine (Sb)	0,0002	0,00108	0,00128	0,00077	0,00057	0,00067	0,00161	0,002
2	Arsenic (As)	0,0002	0,014	0,00521	0,00222	0,00162	0,00328	0,00227	0,00429
3	Baryum (Ba)	0,005	0,253	0,295	0,152	0,189	0,295	0,572	0,727
4*	Cadmium (Cd)	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,00027	0,00553	0,008
5	Chrome (Cr)	0,0005	0,00335	0,00172	0,0005	0,00134	0,00691	0,00068	0,005
6	Cuivre (Cu)	0,0005	0,06	0,03	0,00645	0,0071	0,01	0,04	0,07
7	Etain (Sn)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,108
8	Mercure (Hg)	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
9	Molybdène (Mo)	0,0002	0,038	0,034	0,027	0,024	0,013	0,007	0,00823
10	Nickel (Ni)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,0023	0,012	0,125	0,281
11*	Plomb (Pb)	0,0005	0,173	0,00467	0,00057	0,00195	0,013	0,033	0,114
12	Sélénium (Se)	0,0005	0,00647	0,00258	0,00105	0,00087	0,0008	0,02	0,03
13	Zinc (Zn)	0,005	0,15	0,05	0,05	0,09	0,21	0,31	0,88

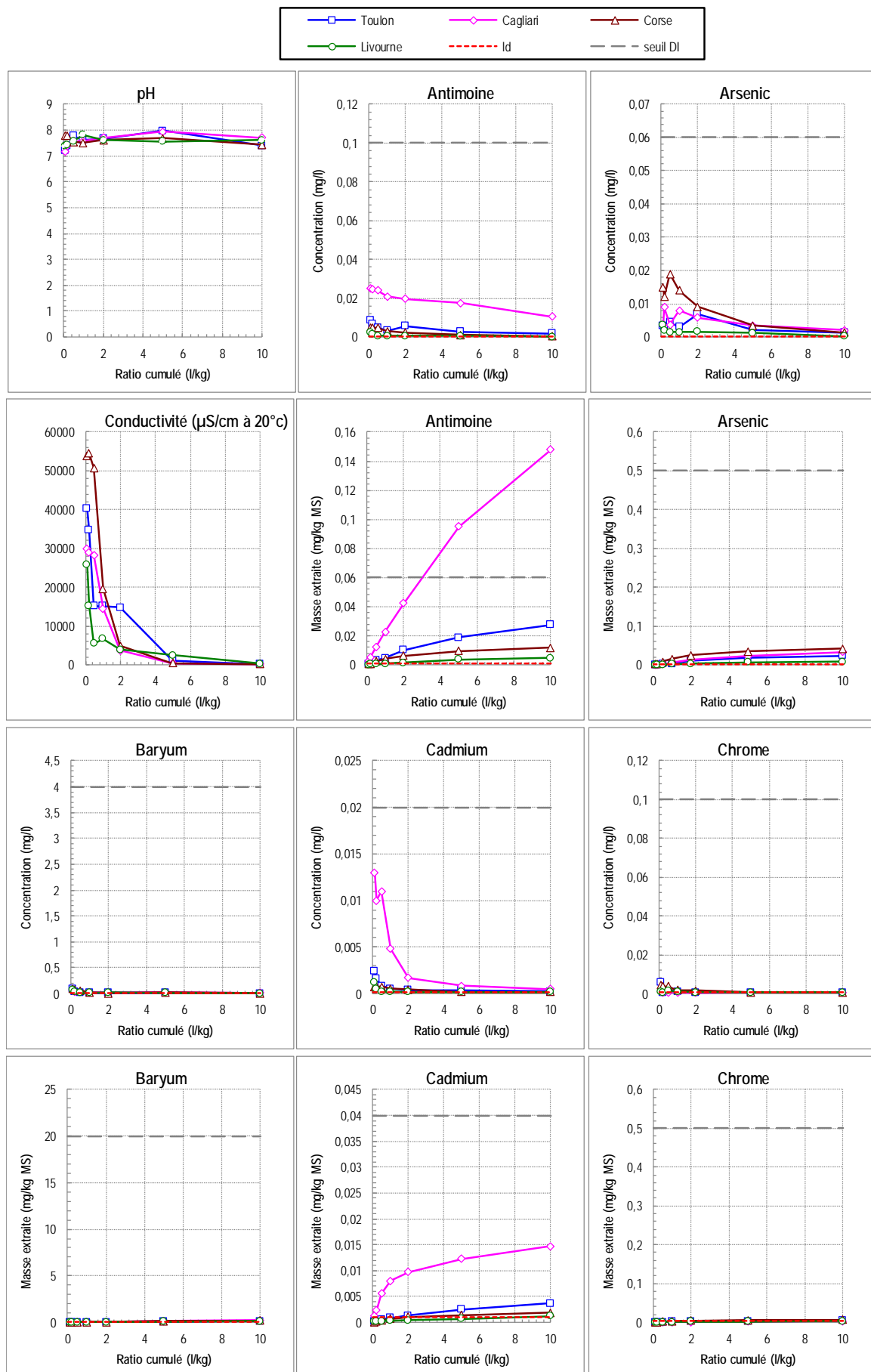
ld = Limite de détection

0,005 Les teneurs < ld sont remplacées par les valeurs des limites correspondantes et écrites en gris et souligner

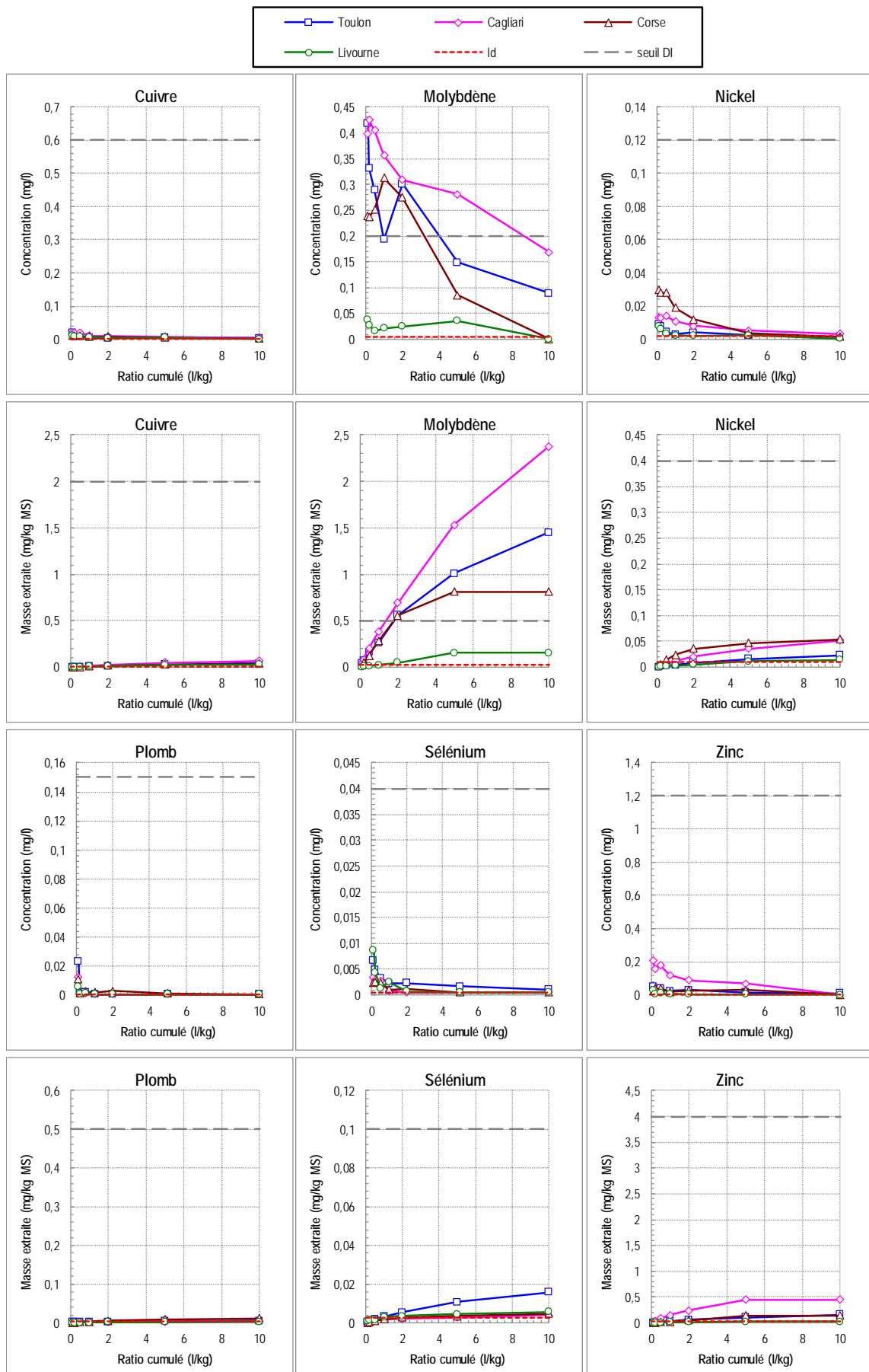
(*) Les éléments dont les numéros d'ordre sont affectés d'un astérisque, ne sont pas représentés graphiquement

Résultats expérimentaux des essais de percolation en colonne NF EN 14405

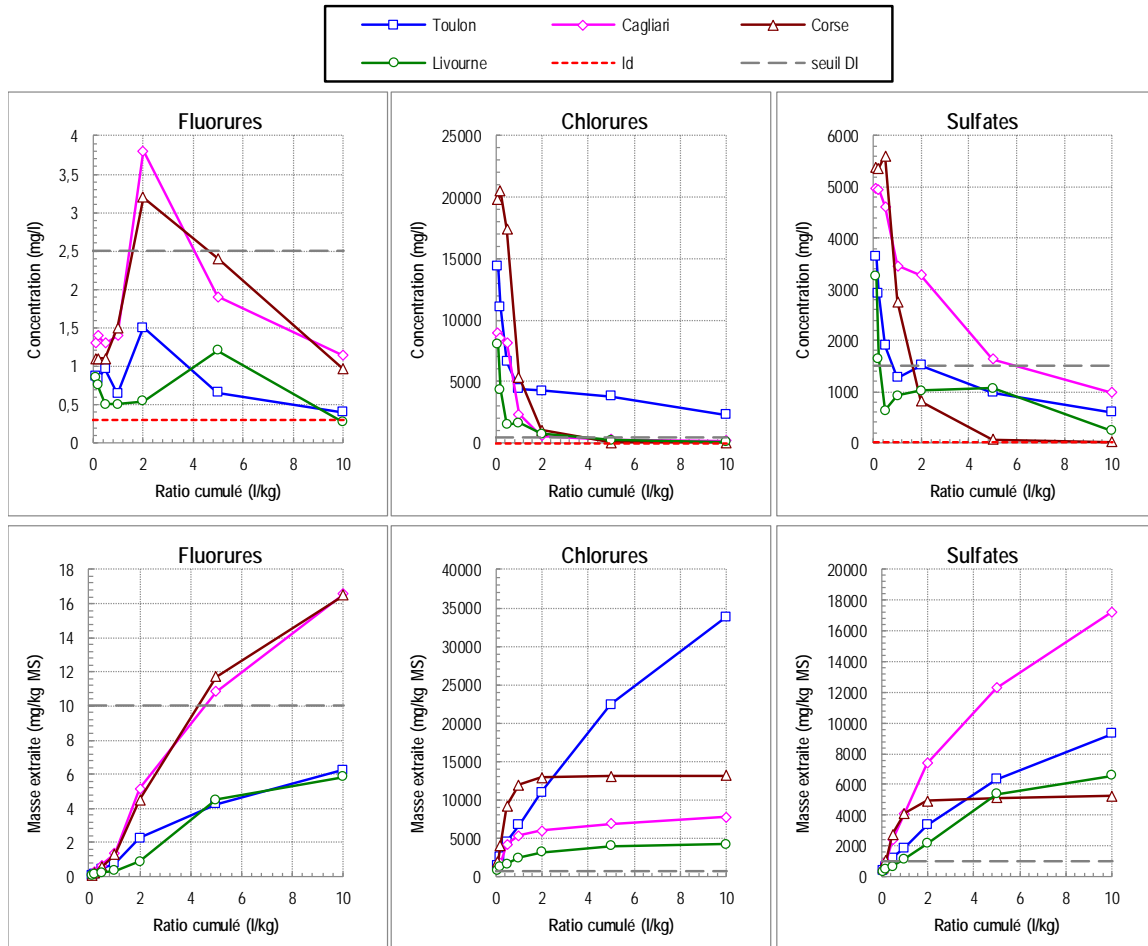
Résultats de l'essai de percolation en colonne - TS 14405



Résultats de l'essai de percolation en colonne - TS 14405



Résultats de l'essai de percolation en colonne - TS 14405



VI. CONTRIBUTION ITALIENNE INTÉGRALE

SOMMAIRE

6.1)	INTRODUCTION	65
6.2)	PHASE D'ÉCHANTILLONNAGE DES SÉDIMENTS	65
6.3	PHASE DE CARACTÉRISATION ANALYTIQUE	67
6.3.1)	Méthodes analytiques	67
6.3.2)	Résultats d'analyses	81
6.4)	RÉSULTATS DE L'ANALYSE ÉCOTOXICOLOGIQUE	97
6.5)	PHASE DE CARACTÉRISATION GEOTECHNIQUE	99
6.5.1)	Objectifs	99
6.5.2)	Structure routière de référence en France et en Italie	99
6.5.3)	Normes techniques de référence - comparaison entre les normes françaises et italiennes	101
6.5.4)	Résultats des analyses	119
6.5.5)	Géotechnique - conclusions	133

6.1) INTRODUCTION

Le présent document (Livrable T2.1.1) contient le rapport de synthèse des activités de caractérisation environnementale et géotechnique préalable des sédiments prélevés dans chaque port concerné par le projet SEDITERRA, qui ont été menées en vue de l'identification des sédiments à acheminer vers les activités de traitement et de récupération.

La phase d'échantillonnage (paragraphe 6.2), la phase de caractérisation analytique des sédiments (paragraphe 6.3) et la phase de caractérisation écotoxicologique (paragraphe 6.4) ont été réalisées en même temps par les opérateurs de l'ISPRA et de l'INSA, de manière partagée et croisée.

Le présent document décrit les méthodes analytiques et les résultats d'analyse obtenus par les partenaires italiens, tandis que l'ANNEXE contient le tableau récapitulatif des résultats obtenus par les établissements italiens et français.

Le paragraphe 6.5 – phase de caractérisation géotechnique - décrit une comparaison entre les critères de classification établis par la norme française NF P11-300 et la norme italienne CNR UNI 10006.

Les essais ont été réalisés par le Laboratoire géotechnique de la Ville métropolitaine de Cagliari, partenaire de la Région Sardaigne.

Nous fournissons les paramètres géotechniques significatifs de chaque échantillon, la classification du sédiment selon les normes française et italienne et le critère d'adéquation à l'usage dans des travaux publics selon les termes desdites normes.

Les tableaux récapitulatifs des analyses et les rapports d'essai sont également présentés.

6.2) PHASE D'ÉCHANTILLONNAGE DES SÉDIMENTS

Les 6 sites portuaires étudiés dans le cadre du projet Sediterra sont les suivants : Livourne, Cagliari, Pise (Navicelli), Toulon et Centuri. Dans chacun des 6 sites portuaires 3 différents points d'échantillonnage ont été identifiés (sauf dans le port de Gênes où un seul échantillon a été prélevé) dans chacun desquels des fractions de matériau homogénéisé ont été prélevées, destinées aux laboratoires de l'ISPRA, de l'INSA et du Service géologique de Cagliari, selon le schéma ci-dessous :

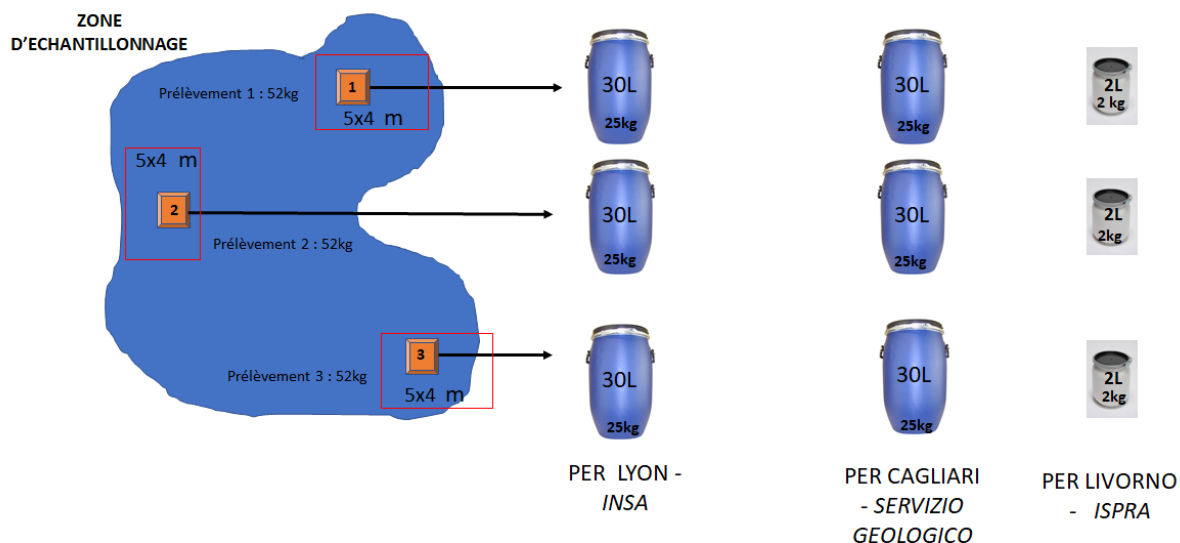


Schéma indicatif de l'échantillonnage des sédiments sur les sites identifiés dans le projet SEDITERRA

Les quantités ont été définies en fonction des analyses prévues et ont été expédiées, avec la documentation nécessaire pour l'exportation selon le règlement (CE) n° 1013/2006 du Parlement européen et du Conseil du 14 juin 2006.

Les campagnes d'échantillonnage ont eu lieu dans l'ordre chronologique suivant :

PORT DE CENTURI : 29-30/05/2017

PORT DE TOULON : 06/06/2017

VASQUE DE REMPLISSAGE SÉDIMENTAIRE DU PORT DE CAGLIARI : 07/06/2017

CANAL DES NAVICELLI – PISE : 08/06/2017

PORT DE GÊNES : 26/06/2017

VASQUE DE REMPLISSAGE SÉDIMENTAIRE DU PORT DE LIVOURNE : 29/06/2017

6.3) PHASE DE CARACTÉRISATION ANALYTIQUE

Dans les laboratoires ISPRA, nous avons effectué des analyses physico-chimiques et écotoxicologiques sur chaque échantillon collecté. En particulier, les analyses suivantes ont été menées sur 16 échantillons de sédiments :

- Dans les laboratoires de Livourne : mesure des concentrations en métaux lourds (Hg, Cd, Pb, As, Cr tot, Cu, Ni, Zn, Al, V, Nn, Fe) et en matières organiques ainsi que l'analyse granulométrique, essais écotoxicologiques avec l'oursin *Paracentrotus lividus* et l'algue *Pheodactylumtricornutum*
- Dans les laboratoires de Rome : essai biologique avec la bactérie luminescente *Vibrio fischeri* (Microtox®) sur phase solide
- Dans les laboratoires de Chioggia : mesure des concentrations en TBT et en composés organostanniques
- Dans les laboratoires d'Ancone : : mesure des concentrations en HAP, PCB et hydrocarbures

6.3.1) Méthodes d'analyses

Les méthodes appliquées sont celles qui figurent dans le document ICRAM (Institut central pour la recherche scientifique et technologique appliquée à la mer) – Ministère de l'Environnement et de Protection du territoire (Service de Défense maritime) ; méthodes d'analyse de référence dans le domaine du « Programme de surveillance pour le contrôle de l'environnement marin côtier (période triennale 2001-2003) ». Ces analyses ont été réalisées, en particulier, selon les modalités décrites ci-dessous :

Caractéristiques granulométriques :

Pour la détermination des caractéristiques granulométriques des sédiments marins chaque échantillon (environ 70 g) a été traité avec une solution de peroxyde d'hydrogène et d'eau distillée (1 : 8) pendant 48 h à température ambiante, pour faciliter la séparation des granules.

Par la suite, le sédiment est tamisé sur une maille de 63 µm humidifiée avec de l'eau distillée ; les deux fractions ainsi obtenues sont étuvées à 60 °C et pesées une fois séchées.

La fraction > 63 µm (sable et gravier) est ensuite triée à l'aide de piles de tamis de 2000, 1000, 500, 250, 125 et 63 µm série ASTM ; le sédiment correspondant à chaque intervalle est ensuite pesé et, au terme de ces opérations, le pourcentage des différentes fractions présentes à l'intérieur de l'échantillon est calculé.

Métaux et matière organique

L'échantillon (environ 0,3 g matière sèche) a été minéralisé dans des bombes en téflon à l'aide d'un four à microondes programmable (Milestone 1200) par ajout de 3 ml de HNO₃ (65 %) et de 1 ml de HCl (30%) ultra-purs. Une quantité d'eau ultra-pure a été ajoutée à la solution ainsi obtenue afin d'atteindre un volume final de 25 ml.

L'analyse a été effectuée par spectrophotométrie d'émission optique (ICP-OES Agilent720) pour tous les métaux, sauf le mercure. Pour ce dernier, les analyses ont été réalisées par spectroscopie d'absorption atomique (méthode à vapeurs froides, Cetac M-7600). La précision de cette méthode a été évaluée grâce à l'emploi de matériel standard de référence LGC 6137 (Promochem), qui a été traité avec les mêmes modalités utilisées pour les échantillons. Le calibrage est validé grâce à l'adhésion au réseau européen d'interétalonnage QUASIMEME et WEPAL. La limite de détection de la méthode et la limite de quantification pour chaque métal analysé figure au tableau suivant :

Limites de détection et de quantification

	Al	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
Délectabilité (mg/l)	0,078	0,0005	0,00004	0,0061	0,0035	0,0001	0,0071	0,0036	0,027	0,167
Quantification (mg/kg)	6,50	0,044	0,0029	0,512	0,295	0,0004	0,591	0,299	2,249	13,93

Pour la mesure de la matière organique, une fraction d'échantillon d'environ 3 g est pesée et placée à 365° dans un four à moufle pendant 12 heures. La pesée a lieu deux fois : une première fois avant la mise en moufle et une deuxième fois juste après. La matière organique est mesurée par soustraction.

Hydrocarbures aromatiques polycycliques :

La mesure des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) a été effectuée sur une fraction homogène de l'échantillon, d'environ 3 grammes. Lors de la préparation des échantillons, 5 ml d'une solution composée de KOH 0.5 M et méthanol ont été ajoutés aux échantillons pour l'hydrolyse des lipides et l'extraction solide-liquide. Les échantillons, après avoir été agités vigoureusement, continuent à être agités pendant une nuit entière, à 4 °C. L'achèvement de l'hydrolyse de la composante lipidique et l'extraction solide-liquide ont été réalisées dans un four à microondes, à 200 W et 55 °C pendant 15 min (Microwave Digestion and Extraction System Mars-5, CEM). Les échantillons ont été centrifugés à 1000 × g pendant 5 min en vue de l'élimination des résidus solides et des surnageants récupérés dans de nouveaux tubes. Le volume des échantillons a été réduit à 0,5 ml par un évaporateur centrifuge (Speedvack, Juan), à 45 °C pendant 60-120 min.

Enfin, les échantillons ont été soumis à un processus de purification et de concentration par chromatographie à basse pression avec résines SPE (extraction en phase solide) de type Backerbond SPE C18 (500 mg, 6 ml) conditionnées avec 10 ml de phase mobile (tampon KHCO_3 10 mm dans H_2O ultra-pur et méthanol 10 %), et ont été récupérés, enfin, avec 1 ml d'acétonitrile pur par HPLC.

Le système chromatographique employé est composé d'une pompe HPLC pour gradient binaire et d'un détecteur fluorescence (Perkin Elmer Serie 200 Pump and Fluorescence Detector). La séparation chromatographique a été réalisée par le biais d'équilibres de répartition, en employant une colonne analytique Supelcosil LC-PAH (LC18 modifiée et spécifiquement prévue pour les analyses d'hydrocarbures aromatiques polycycliques) de 10 cm de long, 4.6 mm de diamètre intérieur et des particules de $3\mu\text{m}$ de diamètre. L'analyse a été réalisée par gradient dynamique, avec de l'eau ultra-pure et de l'acétonitrile en tant que phases mobiles. Le gradient employé est le suivant : eau 40 % et acétonitrile 60 % pendant 2 min ; acétonitrile de 60 % à 100 % avec gradient linéaire pendant 10 min ; acétonitrile 100 % pendant 5 min ; acétonitrile de 100 % à 60 % avec gradient linéaire pendant 2 min ; eau 40 % et acétonitrile 60 % pendant 6 min (reconditionnement). La durée totale de l'analyse est de 25 minutes.

La mesure des signaux a été effectuée en fluorescence, en modulant dans le temps les coupes de longueur d'onde appliquées en excitation et émission selon le programme suivant : 0 min, Exc=280 nm, Em =330 nm ; 6 min, Exc =250 nm, Em=370 nm ; 8 min, Exc = 280 nm, Em =450 nm ; 9 min, Exc =265 nm, Em = 380nm ; 13 min, Exc = 290 nm, Em = 410 nm ; 25 min, Exc =280 nm, Em= 330nm.

Le volume d'échantillon injecté est de 20 μl : il est garanti constant pour toutes les analyses, grâce à un loop à volume connu, monté sur une soupape d'injection. La mesure quantitative et qualitative des analytes a été réalisée en comparant les chromatogrammes et les signaux avec ceux obtenus par l'injection de solutions standards à des concentrations connues et progressives, préparées à l'aide d'un mélange d'hydrocarbures aromatiques purs (EPA 610). La précision de la procédure d'analyse et l'efficacité de l'extraction et de la préparation des échantillons a été contrôlée par l'estimation de la récupération des analytes recherchés dans des matrices adéquates certifiées standard (SRM-NIST 2977 ; SRM-NIST 1944). Les analytes mesurés par la méthode décrite ci-dessus peuvent être classés comme HAP à faible poids moléculaire (naphtalène, 1-méthyl-naphtalène, 2-méthyl-naphtalène, acénaphène, fluorène, phénanthrène et anthracène) et HAP à haut poids moléculaire (fluoranthrène, pyrène, benzo[a]anthracène, chrysène, 7,12-dyméthyl benzo[a]anthracène, benzo[b]fluoranthrène, benzo[k]fluoranthrène, benzo[a]pyrène, dybenzo[a,h]anthracène, benzo[g,h,i]péryène, indeno(1,2,3-cd)pyrène).

Analyse des hydrocarbures aliphatiques (C10-C40) :

La mesure des hydrocarbures aliphatiques semi-volatils ou non-volatils (>C10-C40) a été effectuée par des techniques de chromatographie gazeuse, conformes aux méthodes décrites dans la documentation scientifique (Piva et al., 2011).

Les échantillons ont été décongelés et l'on a ajouté à des fractions d'environ 3 g (poids humide) une solution de n-hexane : acétone (2:1) dans un rapport de 1:3, poids échantillon / volume de solvant (m/v).

Après une vigoureuse agitation, les échantillons ont été extraits par un système d'extraction contrôlée au four à microondes à une température de 110 °C pendant 15 minutes à la puissance de 400 Watts (Microwave Digestion and Extraction System Mars-5, CEM). Par la suite, les solutions d'extraction ont été récupérées dans des tubes pyrex et les échantillons ont été centrifugés (1000 g pendant 5 minutes) afin d'éliminer les résidus solides de l'échantillon. Les solutions ont été purifiées par des techniques d'extraction en phase solide (SPE), en utilisant 500 mg et 6 mL de résines d'extraction Strata-X (Phenomenex, Strata-X 33u Polymeric Reversed Phase), préalablement conditionnées avec 15 mL d'acétone et 15 mL d'hexane, ainsi que 1000 mg et 6 mL de résines Strata-FL (Phenomenex, FL-PR), préalablement conditionnées avec 15 mL d'hexane. Cette purification a été effectuée à l'aide du système automatique Gilson Aspec GX271. Les échantillons, élués à l'aide de solutions d'acétone et d'hexane, ont été collectés dans des tubes en pyrex et placés à l'intérieur d'un évaporateur centrifuge (SpeedVack Juan RC 1009), dans lequel ils ont été concentrés jusqu'à la dessiccation, à température ambiante. Enfin, les échantillons ont été solubilisés dans 0,5 ml de n-pentane et placés à l'intérieur d'ampoules en pyrex spécialement prévues, de 1,5 ml, munies de fermeture avec membrane en silicone pour perforation par seringues d'analyse par chromatographie gazeuse.

L'analyse a été réalisée par chromatographie gazeuse par détecteur FID (Perkin Elmer Clarus 500). La colonne chromatographique utilisée est de type Elite-5 (Perkin Elmer). La méthode d'analyse prévoit les spécifications suivantes : rampe de température du four de 40 °C à 320 °C ; débit de gaz (hydrogène) 1 ml/min avec rapport de dissociation de 1:20 ; température de l'injecteur variable entre 40 °C et 280 °C ; température du détecteur FID de 320 °C constante ; rapport de flamme de 10:1, air-hydrogène. Au terme des courbes de réchauffement de l'injecteur et du four, les températures ont été ramenés aux valeurs initiales ; la durée totale de la séparation par chromatographie gazeuse est d'environ 25 minutes.

La détermination quantitative des hydrocarbures totaux a été effectuée en étalonnant le système au moyen d'un étalon pur constitué d'un mélange d'espèces chimiques d'hydrocarbures ayant le même nombre de carbones de C10 à C40, linéaires et insaturés, conformément aux spécifications EN ISO 9377-3.

En ce qui concerne la mesure des hydrocarbures volatils (C5-C10), des fractions homogènes d'environ 5 grammes ont été décongelées à température ambiante et rapidement placées à l'intérieur d'ampoules spécialement prévues à cet effet en vue de l'échantillonnage selon la méthode « headspace » et fermées hermétiquement pour empêcher la perte de composés volatils; les échantillons ainsi préparés ont été réchauffés à une température de 70 °C dans un bain thermostaté, pendant au moins 20 minutes puis un volume de 100 µL a été échantillonné avec une seringue spécialement prévue à cet effet avant d'être immédiatement transféré vers le système chromatographique précédemment décrit, par la méthode d'analyse suivante : rampe de température du four entre 40 °C et 260 °C ; débit de carrier (hydrogène) de 1 ml/min (splitless); température de l'injecteur de 160°C, constante ; température du détecteur FID de 280 °C, constante ; rapport de flamme 10:1, air-hydrogène.

La durée totale de l'analyse est de 10 minutes environ. Les concentrations des hydrocarbures volatils et aliphatiques sont exprimées en µg/g pour chaque échantillon (poids sec) ; le poids sec des échantillons est déterminé en faisant sécher des fractions de ceux-ci à une température d'environ 60 °C pendant au moins 8 heures et en déterminant, pour chaque sédiment, la teneur en eau associée.

Composés organostanniques :

La détermination des composés organostanniques (TBT – tributylétain, DBT – dibutylétain et MBT – monobutylétain) dans les échantillons de sédiment a été effectuée selon les méthodes adoptées par Binato et al. (1998) et Morabito et al. (1995, 2001).

La procédure d'analyse consiste en une série de phases séquentielles : extraction, formation de dérivés, purification et mesures analytique par chromatographie gazeuse, associée à un détecteur à spectrométrie de masse avec piège à ions (GC-MS/MS).

TTBT (tétrabutyl-étain) a été ajouté, en tant que standard interne, à l'échantillon lyophilisé et homogénéisé. L'échantillon a été extrait d'un bain à ultrasons par une solution de tropolone 0,05 % p/v dans du méthanol, après acidification à l'acide chlorhydrique. Le surnageant a été séparé par centrifugation et soumis à extraction au dichlorométhane après ajout d'une solution saline dans eau Milli-Q (10 %), et filtré par sulfate de sodium anhydre afin d'éliminer les traces d'humidité. L'extrait a été concentré à environ 2 ml et repris dans n-hexane.

L'extrait a été dérivatisé par réactif de Grignard. Après élimination de l'excédent de réactif par la solution de chlorure d'ammonium, la phase organique a été concentrée et purifiée sur des colonnes remplies de sulfate de sodium anhydre et de gel de silice (préalablement désactivé à l'eau Milli-Q à 10 %). L'éluat (n-hexane) a été concentré à volume connu et injecté dans GC-MS/MS.

Tous les solvants utilisés sont de qualité pour l'analyse des pesticides résiduels.

La mesure analytique a été effectuée à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse associé à un spectromètre de masse (GC-MS/MS) :

- Chromatographe en phase gazeuse : modèle TRACE 1300 (Thermo Scientific)
- Détecteur : spectromètre de masse muni de piège à ions, modèle ITQ 700 (Thermo Scientific).

Des courbes d'étalonnage ont été préparées pour la mesure avec des solutions standards de TBT, DBT et MBT, et avec TTBT en tant que standard interne. Aux fins du contrôle qualité des données analytiques, des échantillons de contrôle sont régulièrement analysés avec chaque série d'échantillons, y compris des échantillons blancs, des répliques et des échantillons de référence certifiés (BCR-646, EC-DG JRC Institute for Reference Materials and Measurements et CRM PACS-2 National Research Council Canada) et grâce au réseau d'inter-étalonnage international QUASIMEME Laboratory Performance Studies.

Les limites de quantification, exprimées sous la forme de masse de l'analyte respectivement en tant que cation et en tant qu'étain par gramme d'échantillon sec sont les suivants : 4 ng TBT.g⁻¹ MS (égal à 2 ng Sn.g⁻¹MS) ; 8 ng TBT.g⁻¹ MS (égal à 4 ng Sn.g⁻¹ MS) ; 6 ng MBT.g⁻¹ MS (égal à 4 ng Sn.g⁻¹ MS). Pour chaque composé analysé, les concentrations déterminées sont exprimées aussi bien en tant que masse de cation par gramme de poids sec qu'en tant qu'étain (Sn) par gramme de poids sec.

Analyse du PCB:

Des fractions homogènes d'environ 3 g (poids humide) ont été additionnées d'une solution de n-hexane : acétone (2:1) ; après avoir été agités vigoureusement. Les échantillons ont été extraits à l'aide d'un système d'extraction contrôlée à microondes à une température de 110 °C pendant 15 minutes à une puissance de 400 Watts (Microwave Digestion and Extraction System Mars-5, CEM).

Par la suite, les solutions d'extraction sont récupérées dans des tubes en pyrex et les échantillons sont centrifugés (1000g pendant 5 minutes) afin d'éliminer les résidus solides de l'échantillon. Les solutions ont été purifiées par des techniques d'extraction en phase solide (SPE) à l'aide de résines d'extraction de type Strata-X (Phenomenex, Strata-X 33u PolymericReversed Phase) 500 mg et 6 ml, précédemment conditionnées avec 15 ml d'acétone et 15 ml d'hexane, outre des résines de type Strata-FL (Phenomenex, FL-PR) de 1000 mg et 6 ml, précédemment conditionnées avec 15 ml d'hexane. Les échantillons, élués à l'aide de solutions d'acétone et d'hexane, sont collectés dans des tubes en pyrex et placés à l'intérieur d'un évaporateur centrifuge (SpeedVack Juan RC 1009) dans lequel ils sont concentrés jusqu'à la dessiccation à température ambiante. Enfin, les échantillons ont été solubilisés dans 0,5 ml de n-hexane et placés à l'intérieur d'ampoules en pyrex spécialement prévues à cet effet, de 1,5 ml, munies de fermeture à membrane en silicone pour perforation par seringues d'analyse par chromatographie gazeuse.

Les analyses sont réalisées à l'aide d'un chromatographe à phase gazeuse Varian Chrompack CP-3800 (Varian Inc.), équipé d'un auto-échantillonneur CP-8400 et d'un détecteur constitué d'un spectromètre de masse Varian Saturn 2000 avec piège à ions. Les conditions instrumentales figurent ci-dessous : le gazvecteur est constitué par de l'hélium ultra-pur comprimé de grade 5.6, émis par un système de filtres et de pièges à oxygène et à humidité tandis que le débit de 1 ml/min, dans la colonne, est constant ; une phase de débit pulsé à une pression de 35 psi, en tête de la colonne, pendant 0,8 minutes et prévue lors de l'injection. La température de l'injecteur est maintenue constante à 280 °C ; le fractionnement prévoit un rapport de 1:25 pendant 5 min et reste, ensuite, constant à 1:10 ; il est interrompu, ensuite, pendant 0,8 min lors de l'injection. Le volume d'injection, de 1 µL, est administré par une micro-seringue de 10 µL, dosée par un auto-échantillonneur étalonné CP-8400. La colonne chromatographique en phase gazeuse est de type Varian FactorFour (Varian Capillary Column, CP8944, VF-5ms, 30M × 0.25mmID, DF=0.25) à l'intérieur du four GC paramétré à une température initiale de 70 °C, maintenue constante pendant 1,5 min ; une première augmentation de température du four GC de 10 °C/min est ensuite prévue jusqu'à 200 °C, puis une deuxième de 5 °C/min jusqu'à 270 °C et une dernière de 10 °C/min jusqu'à 300 °C, température qui est maintenue constante pendant 8,5 min. Au terme de ces opérations, toutes les zones chauffées sont ramenées aux valeurs initiales et la durée des séparations chromatographiques est d'environ 40 min.

Les spécifications du détecteur de masse sont les suivantes : la température de la ligne de transfert vers le spectromètre de masse (Transfer line) est de 180 °C, celle du Manifold est de 50 °C et celle du piège à ions de 150 °C. Le vide à l'intérieur du piège à ions est assuré par une pompe extérieure de type Varian DS 102. La détection du signal par le spectromètre de masse est effectuée avec les paramètres instrumentaux suivants : retard d'allumage du filament de 5 min ; balayage des ions de 60 à 440 m/z jusqu'à 40 min avec mode d'ionisation automatique des fragments (0,76 secondes par balayage, courant d'émission de 10 µA). Les analytes mesurés sont les suivants : polychlorobiphényles dont isoformes PCB4, PCB8, PCB11, PCB16, PCB17, PCB18, PCB19, PCB28, PCB38, PCB44, PCB46, PCB52, PCB66, PCB77, PCB81, PCB101, PCB105, PCB118, PCB126, PCB128, PCB138, PCB153, PCB156, PCB169, PCB170, PCB172, PCB180, PCB182, PCB187, PCB192, PCB195, PCB206, PCB209.

Afin de garantir la précision des mesures, des solutions en marque blanche sont traitées pendant chaque session d'analyse ; elles sont préparées selon les mêmes procédures employés pour les échantillons, en utilisant, toutefois, uniquement les solvants purs précédemment indiqués, outre des solutions spécialement prévues à cet effet (minimum 10) avec différentes concentrations de standards analytiques purs (Supelco Pesticide EPA8081 Standard Mix ; SupelcoAroclor 1221, 1242, 1254 Standard Mix ; SupelcoHexachlorobenzene standard ; Supelco DM471 Phenols Mixture; Polychlorinated Biphenyl Congeners NIST SRM1493) et les mesures sont rectifiées à l'aide d'un standard interne (tétra chlore m-xylène TCMX).

L'estimation du taux de récupération des analytes recherchés est effectuée par l'analyse de matrices certifiées de référence (SRM-NIST 2977 ; SRM-NIST 1944). Les analytes présents dans les échantillons sont mesurés en comparant le temps de rétention et les spectres caractéristiques avec ceux précédemment obtenus pour des solutions standards. Par ailleurs, les spectres de masse caractéristiques sont confrontés avec ceux d'une base de données certifiée de référence (NIST/EPA/NIH Mass Spectra Search Program Version 2.0f).

Essais écotoxicologiques :

Essai biologique avec *Vibrio fischeri* : *Vibrio fischeri* est une bactérie marine Gram-négative et hétérotrophe appartenant à la famille des Vibrionacées. Elle est cosmopolite, mais elle est davantage présente dans les zones tempérées et subtropicales.

Le système Microtox® est un test biologique de toxicité aiguë basé sur l'utilisation de la bioluminescence naturelle de cette espèce. Puisque l'émission de lumière par *V. fischeri* diminue en présence de substances polluantes, la mesure de l'éventuelle inhibition de la bioluminescence suite à l'exposition de la bactérie à une substance connue ou à un échantillon naturel d'eau ou de sédiment permet d'évaluer le niveau de toxicité de la substance ou de la matrice testée.

Le système de mesure est plutôt flexible car il est applicable à des matrices naturelles, notamment marines, aqueuses (eau interstitielle, éluviat, etc.) et solides (boues, sédiments), ainsi qu'à des solutions aqueuses de substances toxiques, organiques ou inorganiques.

Préparation des matrices environnementales : les essais biologiques ont été effectués sur l'éluviat et directement sur la phase solide. Les éluviats ont été préparés en mélangeant des fractions de sédiments et d'eau de mer artificielle ISO selon un ratio de poids sec de 4:1 en laissant les mélanges en agitation pendant une heure puis en centrifugeant pendant 20 minutes à 3500 rpm.

Le surnageant, filtré à 0,45 µm, pour éliminer d'éventuelles particules de sédiments en suspension susceptibles de créer des interférences optiques, a été ensuite utilisé pour l'essai à 30 min.

La phase solide a été préparée par simple centrifugation réfrigérée (3500 rpm à 4 °C pendant 30') en éliminant ensuite l'eau interstitielle surnageante.

Protocoles de référence et procédure adoptée : L'émission de bioluminescence a été mesurée à l'intérieur du luminomètre thermostatique M500, équipé de cellules thermostatiques à 15°C pour les contrôles et les échantillons et à 4°C pour le réactif.

Les méthodes employées relèvent du protocole standard ISO 11348. En particulier, l'organisation spécifique des essais biologiques en termes d'analyse des dilutions et de nombre de contrôles a été la suivante :

- Pour les échantillons d'élutriat nous avons appliqué le protocole Comparaison à 90 % (Azur Environmental, 1995a) avec 5 répétitions du contrôle et de l'échantillon à 90 % de concentration, en effectuant les lectures après une exposition de 5 et 15 minutes
- Pour les échantillons de sédiments centrifugés (élutriats), le protocole du test en phase solide (SPT) a été appliqué avec la procédure Large Sample Method (Azur Environmental, 1995b) organisée avec 9-12 dilutions et 3 contrôles en fonction de la granulométrie de l'échantillon. Le test prévoit une première exposition de 20 minutes pendant laquelle les bactéries se trouvent en contact direct avec le sédiment et une deuxième phase de 10 minutes supplémentaires pendant laquelle la re-suspension bactérienne est incubée dans le luminomètre.

La relation dose-réponse, c'est-à-dire l'inhibition de la bioluminescence par la concentration de l'échantillon, a été développée à l'aide d'un logiciel dédié (MicrotoxOmni™ v. 1.16) qui, dans le cas des élutriats, a permis d'identifier le pourcentage moyen de variation de l'émission lumineuse par rapport au contrôle, tandis que dans le cas de la phase solide, la CE50 (concentration de l'échantillon correspondant à une réduction de 50 % de la bioluminescence). Dans ce dernier cas, la CE50 a été élaborée davantage, en l'exprimant sous forme d'UT (Unités Toxiques = 100/CE50), ce qui permet d'obtenir une relation directe entre la toxicité et la réduction de la bioluminescence, et sous forme d'indice de Toxicité des Sédiments (S.T.I.), ce qui permet d'exprimer la toxicité aiguë réelle de l'échantillon par rapport à la toxicité "naturelle" d'un échantillon de référence ayant les mêmes caractéristiques granulométriques (Onorati et al., 1998). Afin d'exprimer le résultat de l'essai sur l'échelle S.T.I., puisque le test en phase solide est effectivement appliqué sur la fraction granulométrique < 1 mm et puisque la composante naturelle de la toxicité est fonction de la fraction pélitique, nous avons également procédé à une analyse granulométrique ciblée visant à identifier le rapport entre les deux fractions mentionnées, indispensable pour l'évaluation du niveau réel de toxicité aiguë. Les modalités employées pour l'identification de ces fractions sont réparties en trois phases :

1. Traitement de l'échantillon par une solution H₂O₂ afin de faciliter la séparation et la désagrégation du sédiment
2. Tamisage sur jet d'eau distillée à l'aide de tamis ASTM 63 µm et 1 mm
3. Récupération des fractions ainsi obtenues et étuvage, sauf la fraction > à 1 mm

- L'élutriat est considéré toxique lorsque l'échantillon montre une inhibition moyenne de la bioluminescence statistiquement significative ($p < 0,05$) et supérieure ou égale à 10 %
- L'élutriat est considéré biostimulant lorsque l'échantillon montre une bioluminescence statistiquement supérieure au contrôle ($p < 0,05$) d'au moins 10 %
- La matrice solide (centrifugée) a été jugée toxique lorsque la valeur de S.T.I. était supérieure à 1

L'émission de la bioluminescence a été mesurée à l'intérieur du luminomètre thermostaté M500, équipé de cellules de mesure thermostatées à 15 °C pour les contrôles et les échantillons et à 4 °C pour le réactif.

Les méthodes employées relèvent du protocole standard ISO 11348. En particulier, l'organisation spécifique des tests biologiques en termes de balayage et de nombre de contrôles a été comme suit : pour les échantillons d'élutriat nous avons appliqué le protocole Comparison à 90 % (Azur Environmental, 1995a) avec 5 répétitions du contrôle et de l'échantillon à 90 % de concentration, en effectuant les lectures après une exposition de 5 et 15 minutes.

Le rapport dose-réaction, à savoir la concentration de l'échantillon-inhibition de la bioluminescence, a été élaboré par le biais d'un logiciel dédié (Microtox Omni™ v. 1.16) qui, pour les élutriats, a permis de détecter la variation moyenne en pourcentage de l'émission de lumière par rapport au contrôle.

L'échelle adoptée pour la quantification de la toxicité figure au tableau suivant (ICRAM-APAT, 2007).

Échelles de toxicité aiguë employées dans le cadre de l'essai biologique par *V. fischeri*

Matrice	Toxicité absente/négligeable	Toxicité présente	Toxicité élevée	Toxicité très élevée
Élutriat	$EC_{20} \geq 90 \%$ % Effet $\leq 20 \%$	$EC_{20} \geq 90 \%$ $EC_{50} \geq 90 \%$ % Effet $\leq 50 \%$	$EC_{50} \geq 90 \%$ % Effet $\leq 50 \%$	$EC_{50} \geq 20 \%$
Phase solide	S.T.I. 3	S.T.I. 6	S.T.I. 12	S.T.I. 12

Essai biologique avec *Paracentrotus lividus* :

La fiabilité de l'oursin en tant que bio-indicateur est reconnue au niveau mondial ; dès les années 80, les tests de fécondation et de développement embryonnaire ont été inclus dans la liste ICES (1997) des tests biologiques les plus fiables pour la surveillance de la pollution marine. Des procédures standards pour les tests de fécondation et de développement embryonnaire ont été mises au point pour les espèces de la côte orientale (*Arbacia punctulata*, *Strongylocentrotus droebachiensis*) et pour celles de la côte occidentale (*Strongylocentrotus purpuratus*, *Strongylocentrotus droebachiensis*, *Dendraster excentricus*) des États-Unis (USEPA, 1994, 1995, 2000 ; ASTM, 1995, 2004) et pour le Canada (Environment Canada, 1992). En Italie, l'espèce autochtone *Paracentrotus lividus* a trouvé son application dans le domaine écotoxicologique notamment en ce qui concerne l'étude des effets sur la fécondation et sur le développement embryonnaire (défauts du développement et aberrations mitotiques) de substances pures et d'effluents. En effet, l'essai biologique réalisé avec *P. lividus* peut être utilisé aussi bien dans l'évaluation de la qualité des matrices environnementales (eaux et sédiments marins) que dans l'estimation de la toxicité de substances ou préparations solubles dans l'eau de mer. En particulier, en ce qui concerne les sédiments marins, il est compatible avec l'eau interstitielle et l'élutriat.

Matrices aqueuses testées : La matrice environnementale soumise à l'évaluation écotoxicologique dans le cadre de cet essai biologique est l'élutriat. L'élutriat fournit des informations sur toutes les composantes extractibles dans l'eau. Cette dernière représente l'une des matrices les plus indicatives dans l'étude des effets de la manutention des fonds marins (ASTM, 1991 ; USACE ,1991) comme dans les dragages portuaires, sur les sites de décharge, etc.

Préparation de l'élutriat : L'élutriat a été préparé conformément au protocole standard US EPA (1991) en associant le poids de quatre parts d'eau filtrée prélevée dans une zone non contaminée et une part de sédiment. Le tout a été mis en agitation pendant 1 h à 400 rpm. La phase liquide a été ensuite collectée et centrifugée pendant 20 min à 3500rpm. Des sous-échantillons de surnageant ont été congelés et utilisés pour différents tests de manière à employer toujours le même échantillon dans le cadre des différentes expériences. En effet, la congélation ne semble pas altérer de manière significative les caractéristiques des nutriments (NO_3 et PO_4) de la phase liquide (Clementson & Wayte, 1992) et une étude menée par Carr et Chapman (1995) a permis de vérifier l'absence de différences significatives entre la toxicité des échantillons de matrices aqueuses qui viennent d'être extraits ou congelés. La congélation constitue, donc, un passage indispensable pour garantir la comparabilité entre les données expérimentales, car elle permet de stocker de manière adéquate les sous-échantillons en les rendant disponibles pour la répétition de l'essai dans une phase ultérieure. L'élutriat est testé à l'état non-dilué (100 %) et dilué avec de l'eau de mer filtrée à $0,45 \mu\text{m}$ à des concentrations finales de 25 % et 50 %.

Collecte des organismes : Pour assurer la maturité sexuelle, les oursins adultes sont ramassés entre le mois de septembre et de mai (Fenaux, 1968). Des exemplaires adultes ont été prélevés des fonds rocheux du littoral de Livourne dans une zone éloignée de toute source de pollution anthropique (décharges urbaines et industrielles). Les oursins sont collectés à une profondeur comprise entre 1 et 3 mètres et placés dans un récipient en plastique puis recouverts de papier buvard humidifié afin d'atténuer le stress résultant du transport afin d'éviter ainsi de possibles émissions de gamètes. En laboratoire, les exemplaires sont placés dans une chambre thermostatée, dans des aquariums en verre remplis d'eau de mer collectée sur le site d'échantillonnage des organismes et dotés d'un système d'aération et de filtrage (20 individus pour 100 L d'eau). La température (16 ± 1 °C), la salinité (34 ‰ – 38 ‰), le pH (7,8-8,2), l'ammoniac et les nitrates sont contrôlés chaque jour. Les oursins sont hébergés dans les aquariums pendant au moins une semaine avant que le test ne soit effectué.

Modalités d'exécution du test de spermotoxicité : La méthode suit le protocole mis au point par Dinnel et al. (1987) selon les procédures standards décrites par US EPA (1991, 1994, 1995) et reprises par l'ASTM (1991, 1995) et par l'EPS (1991, 1992). Le choix de certains paramètres utilisés se fonde sur des données figurant dans la documentation scientifique (Giambartolomei, 1990 ; Galarin et al., 1992 ; Arizzi Novelli et al., 2001 ; Ennas et al., 2002 ; Lera, Thèse 2002 ; Lera et Pellegrini, 2006 a ; Lera et al, 2006 b). Le test consiste à exposer un nombre défini de gamètes mâles pendant 1 h à une substance toxique ou à une matrice aqueuse complexe dont la toxicité doit être évaluée. L'objectif est d'évaluer l'efficacité de la fécondation par rapport à un témoin négatif.

Sont ajoutés ensuite les œufs et, 20 minutes plus tard, le test est bloqué par l'ajout de quelques gouttes de solution de Lugol 5 % (Carlo Erba, Milan). Le rapport sperme-œufs adopté est de 15 000:1 avec 1000 œufs dans 10 ml de solution d'essai. À la fin des tests, les œufs fécondés sont comptés et les pourcentages de fécondation correspondant aux différentes dilutions de la matrice aqueuse complexe testée sont calculés. Toutes les phases du test décrites ci-dessous sont censées être effectuées en parallèle, aussi bien avec de l'eau de mer reconstituée qu'avec de l'eau de mer naturelle filtrée, de manière à évaluer d'éventuelles différences dans les résultats de l'essai.

Modalités d'exécution du test d'embryotoxicité : La phase réelle du test consiste à obtenir les zygotes par l'union de la suspension de sperme (concentration souhaitée) avec la suspension d'ovules dans un rapport spermatozoïdes/ovules de 10:1. Laisser le bécher à 18 ± 1 °C et attendre au moins 20 min pour permettre la fécondation des œufs. L'essai d'embryotoxicité est effectué en exposant 1 ml de solution d'œufs fécondés à 10 ml de solution test dans une cellule thermostatique, dans le noir, à 18 ± 1 °C et pendant 72 h. Normalement, les zygotes se développent et atteignent le stade larvaire en 48 heures, mais la durée d'exposition choisie pour le test garantit que tous les zygotes atteignent le stade larvaire (pluteus) dans le témoin négatif.

Le test est fixé par l'ajout de quelques gouttes de solution de Lugol à 5 % (Carlo Erba, Milan). L'estimation du pourcentage de plutées normaux est effectuée en comptant 100 larves. Afin d'obtenir une estimation plus précise des effets embryotoxiques, les anomalies de développement peuvent être distinguées en distinguant les larves malformées, c'est-à-dire les larves développées présentant des malformations du squelette et/ou du tube digestif, et les stades pré-larvaires de blastula, gastrula, prisme et plutée précoce qui se sont arrêtées avant d'atteindre le développement complet.

Élaboration des résultats : L'effet de la substance testée, dont on souhaite évaluer la toxicité, est détecté en fonction du pourcentage d'œufs non fécondés par rapport à un échantillon témoin d'eau de mer. Comme précédemment mentionné, le test est considéré acceptable si le taux de fécondation du témoin est compris entre 70 % et 90 %. En appliquant la formule d'Abbott (Finney, 1971), le pourcentage d'œufs non fécondés dans chaque chambre de test est comparé et normalisé par rapport à l'échantillon témoin.

$$\text{Abbott} = (X-Y)/(100-Y) \cdot 100$$

X= % d'œufs non fécondés dans l'échantillon à tester

Y= % d'œufs non fécondés dans l'échantillon témoin

Les valeurs ainsi obtenues sont utilisées dans deux élaborations différentes : en ce qui concerne les échantillons, leur éventuelle toxicité est évaluée en calculant la CE20 et la CE50 obtenues avec le programme spécifique Tox Calc 5.0 en utilisant la méthode d'analyse Probit. Les valeurs obtenues sont comparées à l'échelle de toxicité indiquée dans le tableau suivant et l'échantillon peut être évalué contaminé ou non contaminé (ICRAM-APAT, 2007).

Échelle de toxicité de l'essai avec *P. lividus*

EC20/EC50	Toxicité
EC20 ≥ 90 %	Absente/ Négligeable
EC20 < 90 % et EC50 > 100 %	Moyenne
40 % ≤ EC50 ≤ 100 %	Elevée
EC50 ≥ 40 %	Très élevée

Pour le cuivre, en revanche, les valeurs CE50 sont obtenues par deux méthodes statistiques différentes, à savoir : Trimmed Spearman-Kärber (Hamilton et al., 1978) et Probit Analysis (Finney, 1971). La valeur de CE50 indique la concentration de la substance d'essai (Cu(NO₃)₂ x 3H₂O (1000 mg/l) qui entraîne une baisse de la fécondation de 50 % par rapport à un échantillon témoin négatif.

Essai biologique avec *Phaeodactylumtricornutum* :

Phaeodactylum tricornutum est une algue monocellulaire appartenant au groupe des Diatomées. Il s'agit d'une espèce euryhaline et cosmopolite. Le principe du test consiste à exposer une culture d'algues pure en phase de croissance exponentielle à des concentrations connues de l'échantillon, dans des conditions physiques et chimiques normalisées et avec un apport homogène et défini de nutriments. Au terme de la période d'incubation, la croissance des algues est comparée, dans l'échantillon, avec celle du témoin.

Les essais biologiques ont été effectués selon des protocoles UNI EN ISO (2006) avec quelques modifications spécifiques. Une part de suspension d'algues en phase de croissance exponentielle a été décomptée par Coulter Counter et diluée dans un échantillon témoin d'eau marine, jusqu'à ce que l'on obtienne la densité de cellule souhaitée. Par la suite, les échantillons et l'échantillon témoin ont été distribués en trois répliques dans des plaques jetables stériles à 24 cellules de mesure et placées en incubation pendant 72 h en chambre thermostatique à 20 ± 2 °C, avec éclairage continu de type cool white et une intensité comprise entre 7 000 et 8 000 lux. Au terme de la période préalablement fixée, nous avons mesuré la densité en algues de chaque cellule de mesure.

Le niveau de toxicité, tel que figurant dans le tableau suivant, est évalué en fonction du pourcentage d'inhibition de la croissance des algues. Si l'inhibition a une valeur négative ($\leq 50\%$), on parle de biostimulation de la croissance des algues, qui peut être due à des phénomènes hormétiques ou à une présence élevée de nutriments. L'importance de la différence entre l'échantillon et l'échantillon témoin a été calculée par le biais du test-t de Student précédé du test F concernant l'homogénéité de la variance (Fowler et Cohen, 1993).

- L'échantillon a été considéré toxique lorsque la différence entre l'échantillon et l'échantillon témoin était statistiquement significative ($p < 0,05$) et égale ou supérieure à 20 %
- L'échantillon a été considéré biostimulant lorsque l'augmentation de la croissance de l'échantillon à 100 % par rapport à l'échantillon témoin était statistiquement significative ($p < 0,05$) et égale ou supérieure à -50 %

L'analyse des échantillons a été menée en prévoyant 6 échantillons doublés pour le contrôle négatif et 3 échantillons doublés pour chaque échantillon environnemental testé ; par la suite, la méthode d'essai avec *P. Tricornutum* employée par le laboratoire d'écotoxicologie STS Livorno a été revue, en portant à 6 le nombre d'échantillons doublés y compris pour les échantillons environnementaux testés. Par conséquent, le test effectué sur les échantillons a été mené en préparant 6 échantillons doublés aussi bien pour le contrôle négatif que pour chaque échantillon environnemental, et en maintenant 3 échantillons doublés pour chaque concentration de la substance toxique de référence testée.

Nous avons utilisé, en vue de la formulation du jugement de toxicité, l'échelle d'évaluation figurant dans le tableau ci-dessous, qui se fonde sur le pourcentage d'inhibition enregistré en testant l'élutriat à 80 % (ICRAM-APAT, 2007).

Échelle de toxicité employée dans l'essai biologique avec *Phaeodactylum tricornutum*

Évaluation de la toxicité	Valeur d'inhibition
Biostimulation	$I \leq -50 \%$
Inhibition absente/négligeable	$-50 \% \leq EC50 \leq 20 \%$
Inhibition modérée	$20 \% \leq I \leq 50 \%$
Inhibition élevée	$50 \% \leq I \leq 80 \%$
Inhibition très élevée	$80\% < I \leq 100 \%$

6.3.2) Résultats d'analyses

Dans ce paragraphe, nous présentons les résultats d'analyse obtenus pour chaque paramètre physico-chimique et écotoxicologique étudié.

➤ **Résultats des analyses granulométriques**

Les analyses granulométriques effectuées sur les échantillons ont fait ressortir ce qui suit :

- Les 3 échantillons prélevés dans le port de CENTURI ont fait ressortir une prévalence de la fraction sablonneuse (qui dépasse, dans l'ensemble des échantillons, 80 %) et une composition résiduelle répartie entre la fraction pélitique et la fraction gravier.
- Sur le site de TOULON, les 3 échantillons prélevés ont fait ressortir une prévalence de la fraction pélitique (60 %) par rapport à la fraction sablonneuse. La fraction de gravier est évidente (15 %) uniquement dans l'échantillon POINT 1.
- Les 3 échantillons prélevés sur le site de CAGLIARI ont fait ressortir une prévalence absolue de la fraction sablonneuse (80 %), une fraction pélitique résiduelle (15 %) et un pourcentage négligeable de fraction de gravier.
- Deux échantillons prélevés le long du canal NAVICELLI (POINT 1 et POINT 2) présentent une prévalence de la fraction pélitique (respectivement 60 et 68 %) et une fraction résiduelle sablonneuse (respectivement 24 et 30 %), tandis que le troisième échantillon prélevé (POINT 3) présente la composition granulométrique opposée (60 % sable et 27 % pélite).

- L'échantillon prélevé dans le port de GÈNES a fait ressortir une prévalence de la fraction sablonneuse (76 %) et une fraction pélitique résiduelle (24 %). Le gravier est totalement absent.
- Sur le site portuaire de LIVOURNE, les échantillons prélevés ont fait ressortir une composition granulométrique différente dans chacun des 3 échantillons : Les échantillons prélevés aux POINTS 1 et 3 de la cuve de remplissage présentent une composition granulométrique formée pour moitié de sable (50-53 %) et pour l'autre moitié de pélites (38 %) et de gravier (8-10 %) ; l'échantillon prélevé au POINT 2 présente également une prévalence de la composante sablonneuse (40 %), mais une fraction de gravier plus importante (51 %) par rapport à la pélite(6 %).

Tableau de synthèse des analyses granulométriques

SINTESI Analisi granulometriche(%)			
CAMPIONE	GHIAIE/Graviers (%)	SABBIE/Sable (%)	PELITI/pélites (%)
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	0,00	92,65	7,35
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	8,14	86,82	5,04
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	8,48	89,78	1,74
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	15,59	24,33	60,08
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	1,09	38,32	60,60
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	1,79	34,82	63,39
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	5,17	72,41	22,41
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	5,64	81,77	12,59
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	1,24	86,04	12,72
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	15,59	24,33	60,08
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	0,54	30,83	68,63
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	13,49	59,52	26,99
GENOVA 1 (26/06/2017);	0,00	76,48	23,52
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	10,62	50,92	38,46
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	51,67	41,67	6,67
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	8,13	53,11	38,76

➤ **Résultats des analyses chimiques : Concentration des métaux et matière organique**

Le tableau ci-dessous contient les résultats des concentrations en métaux et de la fraction de matière organique détectés dans les échantillons de sédiment prélevés [mg/kg poids sec, µg/kg poids sec par Hg, % matière organique MO].

CAMPIONE	METALLI														S.O.
	Al	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg*	Mn	Mo	Ni	Pb	V	Zn	[%]
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	5079	5,1	7,7	0,2	137	38,9	9502	16,1	177	3,9	101	27,1	24,6	104	4,28
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	8078	5,8	11,5	0,3	245	56,0	17028	16,1	316	4,5	200	36,7	33,7	160	3,60
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	5262	6,3	8,6	0,1	92,8	12,3	8189	11,1	162	2,1	70,0	16,0	24,7	56,2	1,50
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	7154	10,7	41,2	0,2	11,8	14,7	7562	251	109	2,9	9,80	56,8	16,9	74,1	2,78
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	7048	9,3	43,0	0,2	11,9	15,8	7755	293	114	2,9	10,0	57,7	16,5	76,2	2,96
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	7515	9,5	48,0	0,2	12,9	17,4	8499	301	122	2,9	10,8	59,1	18,0	79,0	2,87
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	9488	12,9	819	1,6	16,6	44,2	9117	391	131	3,9	10,5	164	23,9	236	3,52
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	6155	15,7	453	1,9	11,4	55,3	7290	450	122	2,7	7,90	151	17,7	344	2,17
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	5272	15,3	249	1,9	9,90	46,7	7227	220	120	2,9	10,8	124	16,8	330	2,34
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	20061	8,4	270	17,9	179	97,0	25951	293	498	13	62,3	142	48,2	675	6,27
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	28300	9,7	119	2,3	96,5	59,1	35458	162	565	2,7	80,2	70,5	58,8	176	5,63
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	12410	3,8	37,5	0,7	43,3	27,6	16042	152	188	1,6	35,0	29,5	26,8	83,6	2,40
GENOVA 1 (26/06/2017);	7880	9,7	44,2	0,3	50,6	37,2	14092	353	616	1,0	36,7	52,5	16,8	103	1,37
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	10987	11,3	52,5	0,2	43,6	17,6	14014	40,4	613	1,1	34,8	25,2	29,4	57,3	1,46
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	6136	17,6	27,6	0,1	24,8	16,8	13026	30,7	294	4,3	24,2	22,5	17,7	60,3	2,03
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	8331	10,0	41,9	0,2	13,0	15,6	7894	243	108	2,8	10,9	59,1	18,8	83,1	2,10

- Sur le site de CENTURI, les 3 échantillons ont montré en moyenne une contamination principalement représentée par la concentration des éléments suivants :
 Pb > L1 (échantillon n°2)
 Hg ≈ L1 (échantillon n° 3)

- Sur le site de TOULON, les 3 échantillons prélevés ont fait ressortir, en moyenne, une contamination représentée de manière prédominante par une concentration des éléments suivants :
 Cr > L2 (échantillon n° 2)
 Zn > L2 (échantillon n° 2)
 Cu > L2 (échantillon n° 2)
 Ni > L2 (échantillon n° 2)
 Pb > L1 (échantillon n°2)

- Sur le site de CAGLIARI, les 3 échantillons prélevés ont fait ressortir, en moyenne, une contamination représentée de manière prédominante par une concentration des éléments suivants :
 Zn > L2 (échantillon n° 1,2,3)
 Cd > L2 (échantillon n° 1,2,3)
 Pb > L2 (échantillon n° 1,2,3)
 Cu > L2 (échantillon n° 2) Cu > L1 (échantillon n° 1,2,3)
 As > L1 (échantillon n° 1,2,3)
 Hg > L1 (échantillon n° 1, 2)
 Ba élevé (échantillon n° 1, 2)

- Sur le site de NAVICELLI, les 3 échantillons prélevés ont fait ressortir, en moyenne, une contamination représentée de manière prédominante par une concentration des éléments suivants :
 Cr > L2 (échantillon n° 1) Cr > L1 (échantillon n° 2)
 Ni > L2 (échantillon n° 2) Ni > L1 (échantillon n° 1,3)
 Zn > L2 (échantillon n° 1,2)
 Cu > L2 (échantillon n° 1,2)
 Cd > L2 (échantillon n° 1,2) Cd > L1 (échantillon n° 3)
 Pb > L1 (échantillon n° 1,2)
 Al élevé (échantillon n° 1, 2)
 Mn élevé (échantillon n°1, 2)
 Fe élevé (échantillon n° 1, 2)
 V élevé (échantillon n° 1, 2)
 Mo élevé (échantillon n° 1)

- Sur le site de GÈNES, l'échantillon prélevé a fait ressortir, en moyenne, une contamination représentée de manière prédominante par une concentration des éléments suivants :

Ni>L1
 Zn>L1
 Pb>L1
 Hg>L1
 Mn élevé

- Sur le site de LIVOURNE, les 3 échantillons prélevés ont fait ressortir, en moyenne, une contamination représentée de manière prédominante par une concentration des éléments suivants :

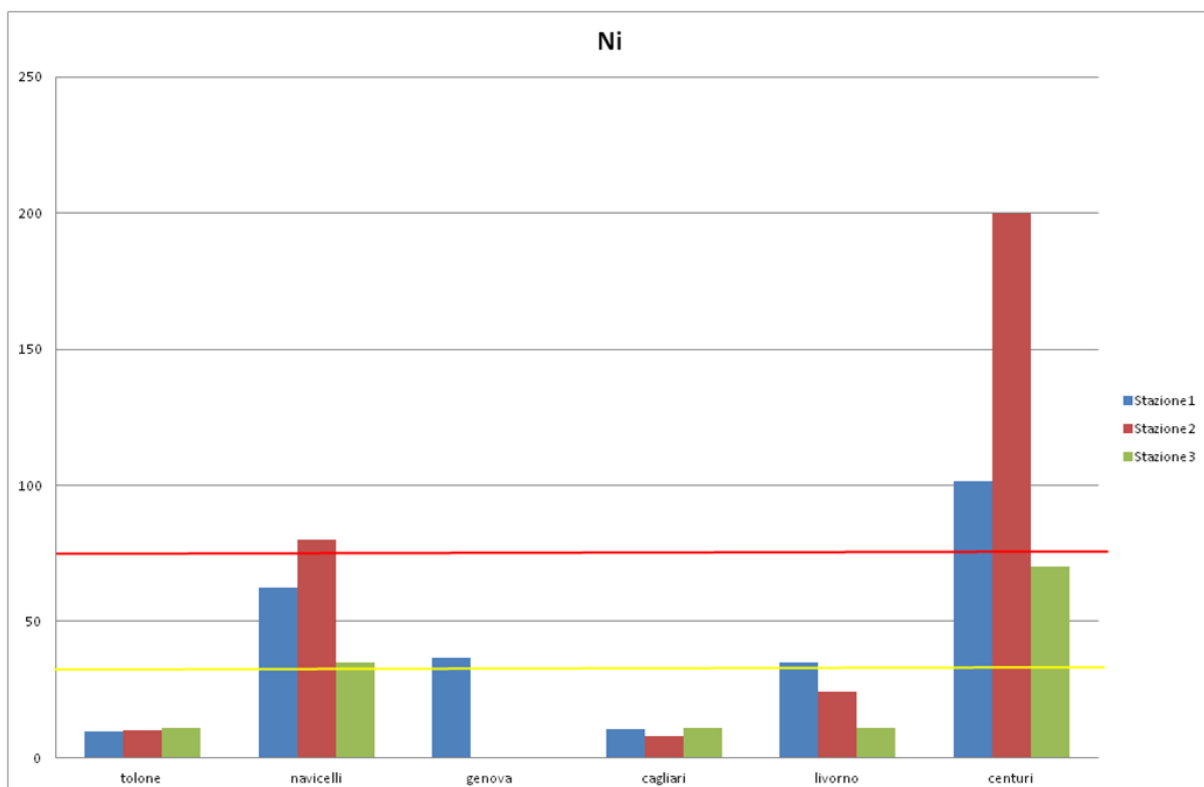
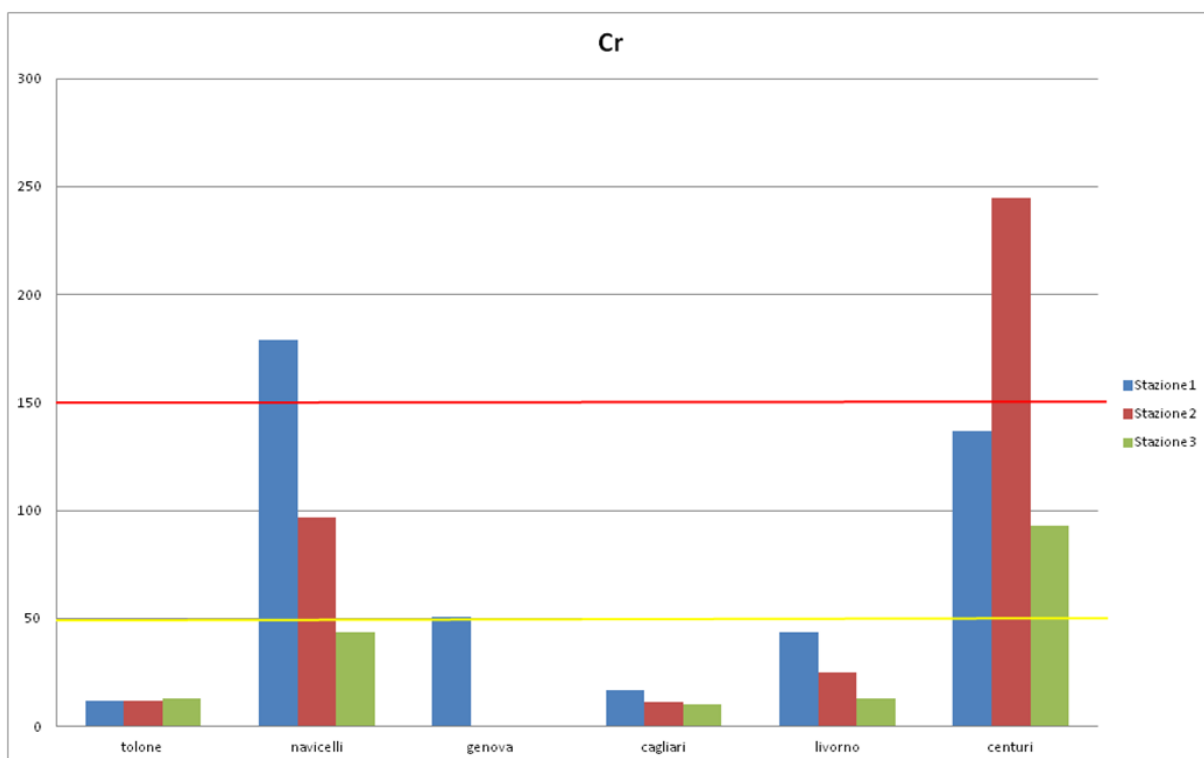
Ni > L1 (échantillon n° 1)
 As > L1 (échantillon n°2)
 Pb > L1 (échantillon n°3)
 Mn élevé (échantillon n° 1)

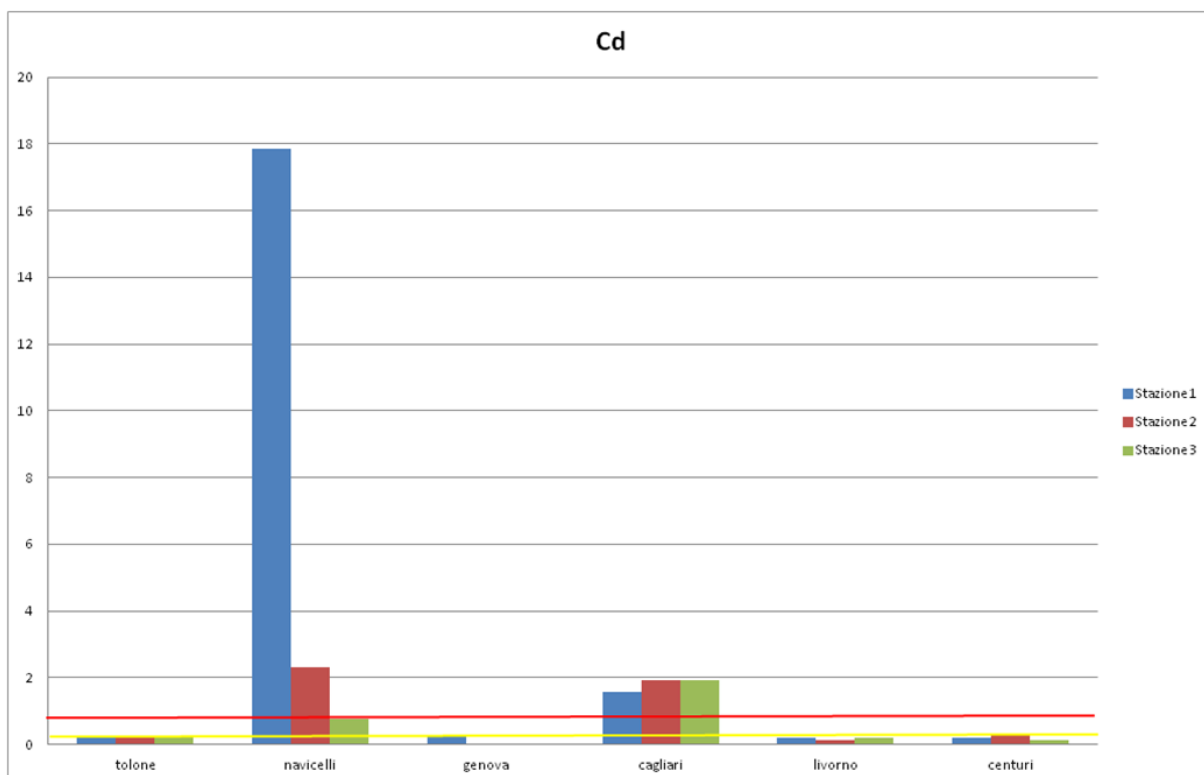
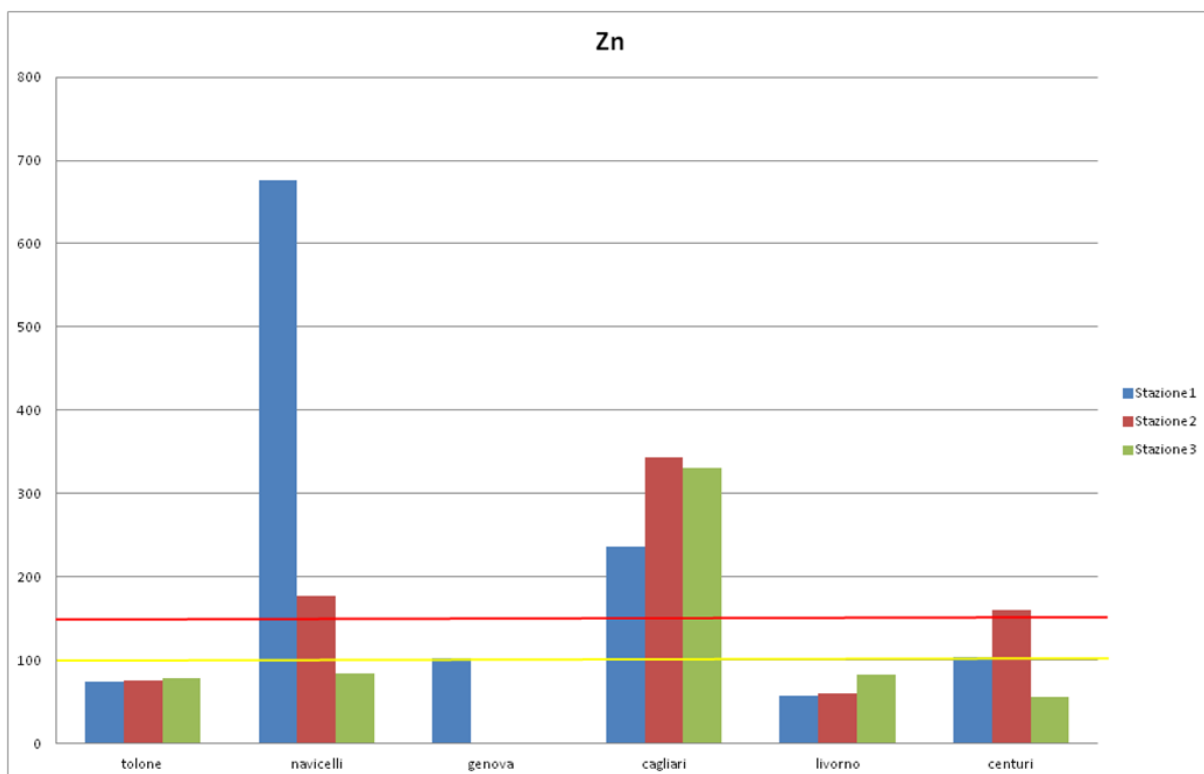
Pour la représentation des concentrations de métaux indiquées ci-dessous, les graphiques illustratifs relatifs montrent les limites réglementaires en vigueur (décret ministériel 173/2016), telles qu'elles sont également appliquées par l'OMI (Organisation maritime internationale) et indiquées dans le tableau ci-dessous :

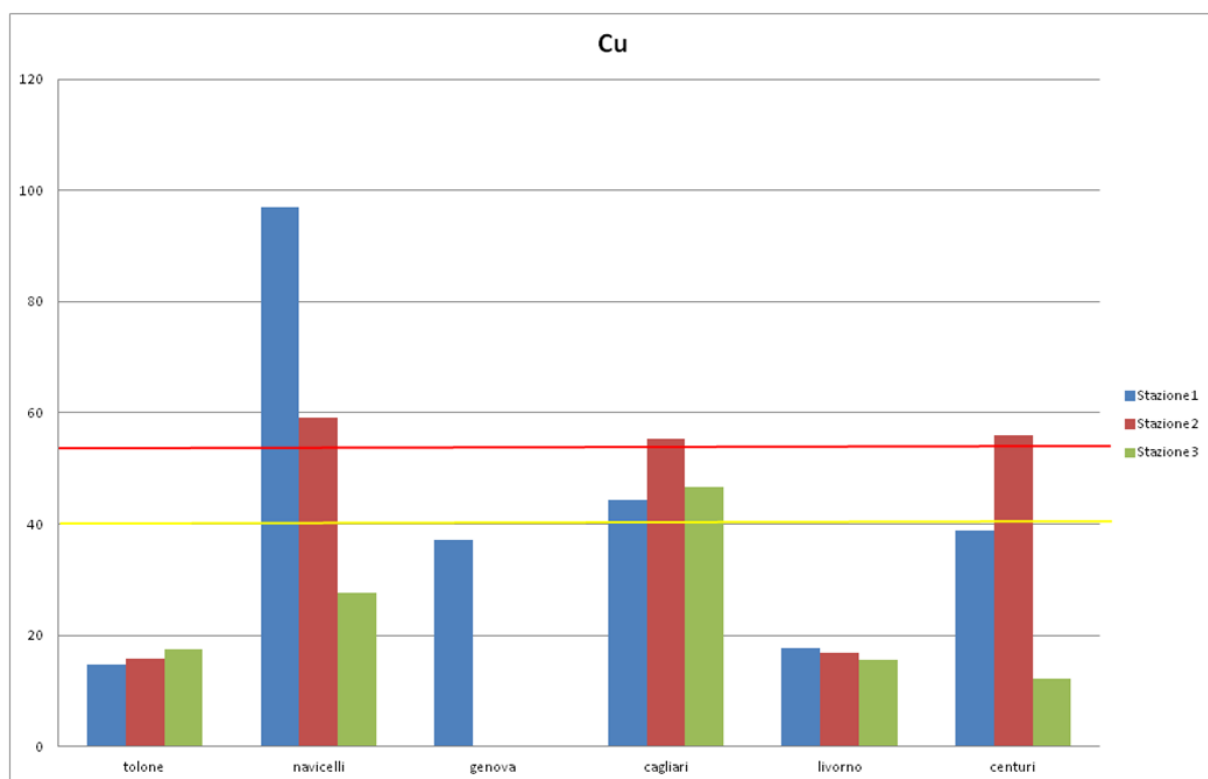
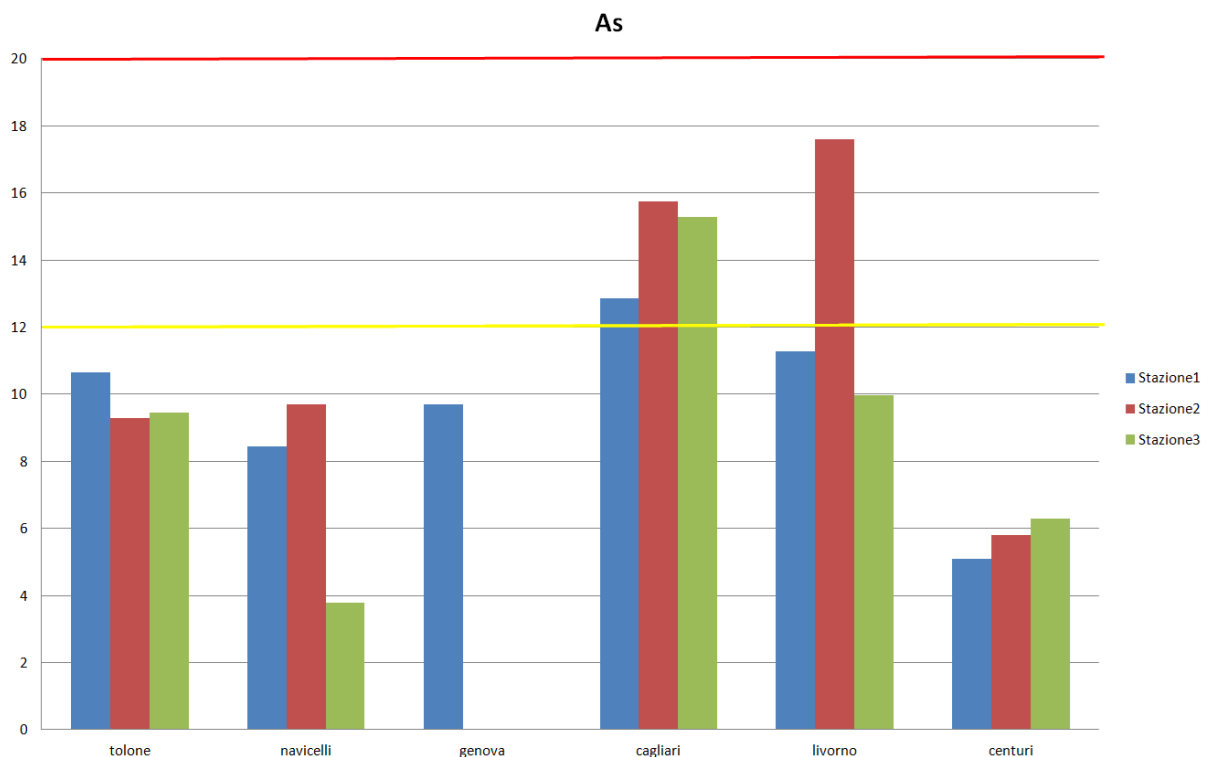
Seuils légaux établis par l'A. min. 173/2016 – L1 / L2

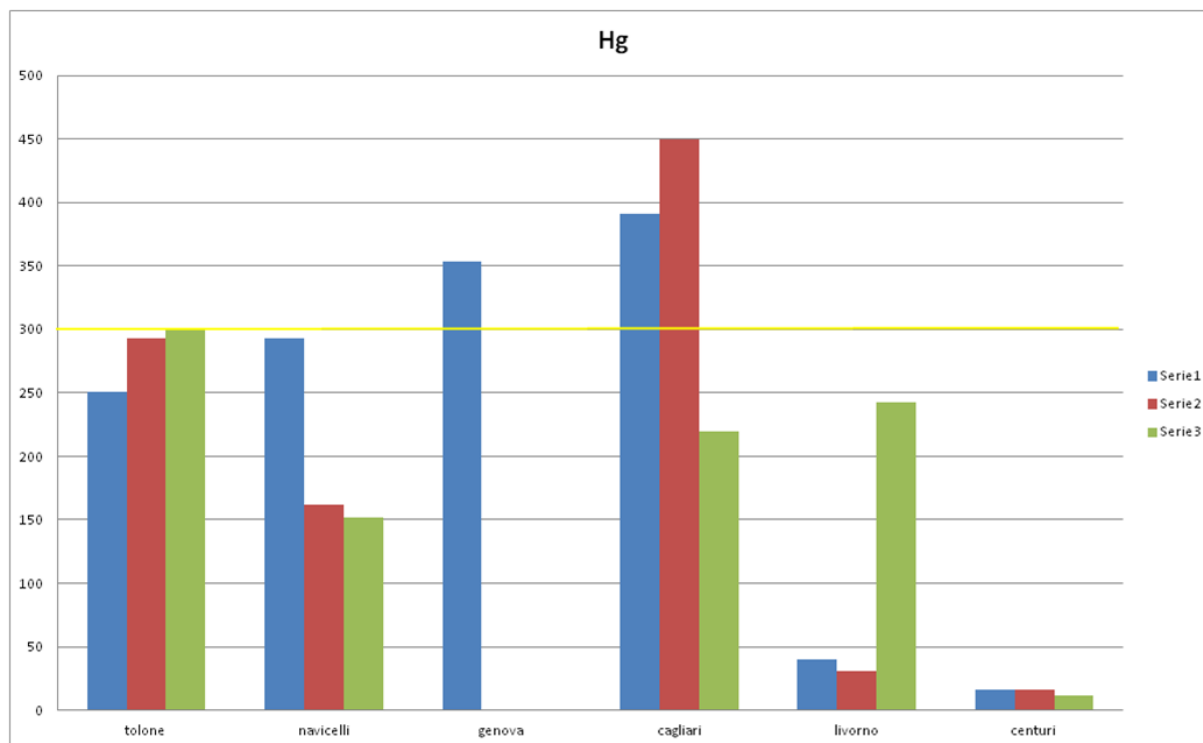
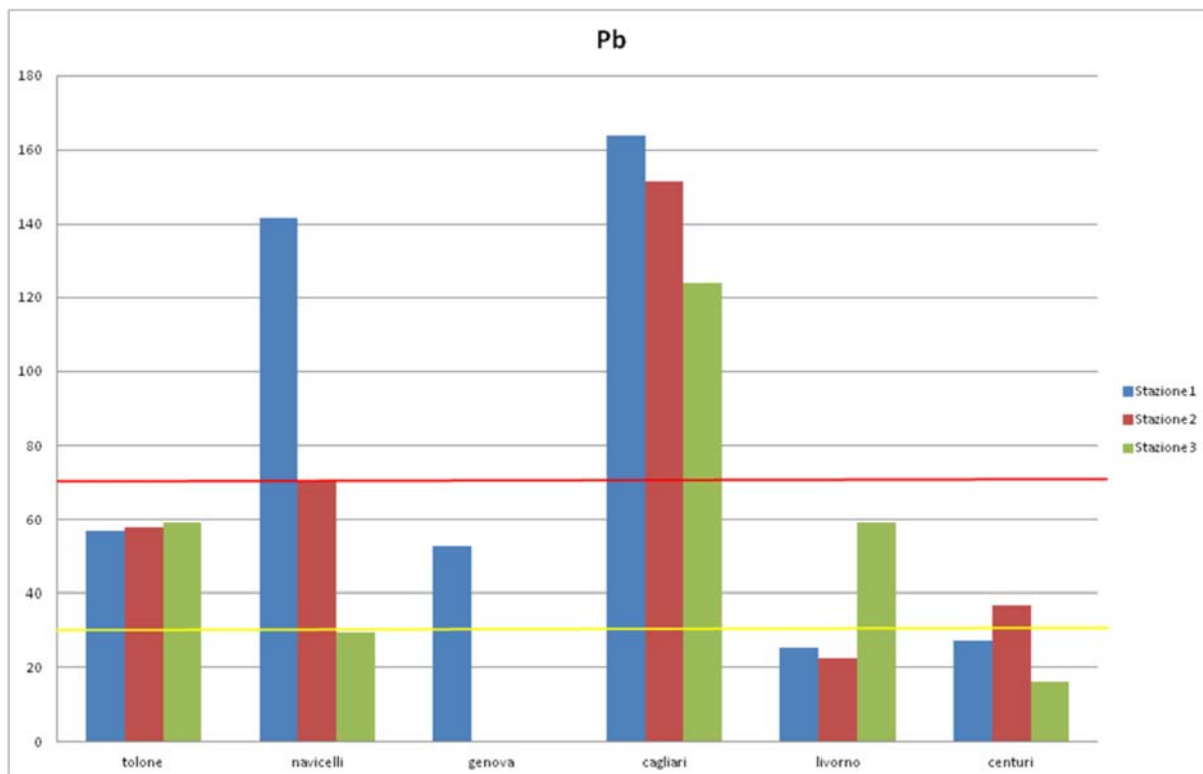
Trace elements	L1	L2
	[mg kg ⁻¹] dry weight	
Arsenic	12	20
Cadmium	0.3	0.8
Chromium	50	150
Chromium VI	2	2
Copper	40	52
Mercury	0.3	0.8
Nickel	30	75
Lead	30	70
Zinc	100	150
Organic contaminants	[µg kg ⁻¹] dry weight	
Organotin compounds	5 (TBT)	72 (MBT, DBT, TBT)
Σ PCB*	8	60
Σ 2,4'-4,4' DDD	0.8	7.8
Σ 2,4'-4,4' DDE	1.8	3.7
Σ 2,4'-4,4' DDT	1.0	4.8
Chlordane	2.3	4.8
Aldrin	0.2	10
Dieldrin	0.7	4.3
Endrin	2.7	10
α-HCH	0.2	10
β-HCH	0.2	10
γ-HCH (Lindane)	0.2	1.0
Heptachlor epoxide	0.6	2.7
HCB	0.4	50
Petroleum Hydrocarbon C>12	Not available	50000
ΣPAHs16	900	4000
Anthracene	24	245
Benzo[a]anthracene	75	500
Benzo[a]pyrene	30	100
Benzo[b]fluoranthene	40	500
Benzo[k]fluoranthene	20	500
Benzo[g,h,i]perylene	55	100
Crysenes	108	846
Indenopyrene	70	100
Phenanthrene	87	544
Fluorene	21	144
Fluoranthene	110	1494
Naphtalene	35	391
Pyrene	153	1398
T.E. PCDD, PCDF and Dioxin Like PCBs	2 x 10 ³	1 x 10 ²

Sum of CB: 28, 52, 77, 81, 101, 118, 126, 128, 138, 153, 156, 169, 180.









➤ **Résultats des analyses chimiques : concentration des TBT et composés organostanniques**

Le tableau ci-dessous indique les teneurs mesurées en TBT et en composés organostanniques exprimées en $\text{ng}_{\text{Sn}}\cdot\text{g}^{-1}$ (PS) :

CAMPIONE	ng TBT g^{-1} d.w.	TBT ng Sn g^{-1} d.w.	ng DBT g^{-1} d.w.	DBT ng Sn g^{-1} d.w.	ng MBT g^{-1} d.w.	MBT ng Sn g^{-1} d.w.
TOULON 1	<4	<2	<8	<4	<6	<4
TOULON 2	<4	<2	<8	<4	<6	<4
TOULON 3	<4	<2	<8	<4	<6	<4
CENTURI 1	355	145	35	18	15	10
CENTURI 2	91	37	27	14	21	14
CENTURI 3	<4	<2	<8	<4	<6	<4
GENOVA 1	70	29	37	19	14	9
NAVICELLI 1	1180	483	220	112	58	39
NAVICELLI 2	56	23	47	24	15	10
NAVICELLI 3	48	20	29	15	13	9
LIVORNO 1	10	4	<8	<4	18	12
LIVORNO 2	8	3	<8	<4	9	6
LIVORNO 3	8	3	<8	<4	8	5
CAGLIARI 1	68	28	21	11	14	9
CAGLIARI 2	21	9	<8	<4	<6	<4
CAGLIARI 3	6	3	<8	<4	<6	<4

Concentrations en TBT exprimées en $\text{ng}_{\text{Sn}}\cdot\text{g}^{-1}$ (PS)

➤ **Résultats des analyses chimiques : concentration d'hydrocarbures**

Les tableaux ci-dessous montrent les concentrations d'hydrocarbures aromatiques polycycliques exprimées sous la forme de congénères individuels, de somme et en tant qu'hydrocarbures légers et lourds.

CAMPIONE/ Echantillon	Naftalene	Acenafthilene	1-metilnaftalene	2-metilnaftalene	Acenaftene	Fluorene	Fenantrène	Antrace	Fluoranthène	Pirene
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1.23	< 0.5	< 0.05	16.08	4.90
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	3.59	< 0.5	0.37	8.69	1.55
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	< 0.05	2.63	0.59
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	11.14	14.49	< 0.5	36.20	265.68	146.49
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	19.13	< 0.5	52.91	88.25	298.57
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	24.04	< 0.5	75.02	923.73	379.92
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	7.41	< 0.5	1.56	31.04	18.61
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	8.60	< 0.5	2.37	41.64	41.07
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	6.25	< 0.5	4.93	42.67	28.85
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	23.59	317.80	189.77
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	36.75	313.00	159.63
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	0.76	5.95	3.03
GENOVA 1 (26/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	2.89	24.91	13.97
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	17.32	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	1.96	12.45	10.90
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	13.61	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	< 0.05	< 0.05	0.90
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	29.28	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	0.09	4.12	0.83

Concentration en hydrocarbures exprimée en ng/g (P.S.)

CAMPIONE/ Echantillon	Benzo (a) antracene	Crisene	7,12- dimeti lbenzo (a)ant racene	Benzo(b)fluorantene	Benzo(k)fluorantene	Benzo(a)pirene	Dibenzo(a,h)antracene	Benzo(g,h,i)perilene	Indeno(1,2,3-cd)pirene
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	< 0.01	< 0.01	< 0.05	3.16	0.30	0.56	3.05	1.57	0.25
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	< 0.01	1.87	< 0.05	1.32	0.62	0.67	1.91	2.27	< 0.01
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	< 0.01	2.60	< 0.05	0.46	0.30	0.34	1.18	0.72	0.09
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	113.08	110.69	< 0.05	144.22	132.80	108.11	30.73	90.22	75.01
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	231.43	175.42	< 0.05	213.86	211.77	173.11	49.75	143.77	117.71
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	343.37	283.02	< 0.05	285.80	290.53	232.90	58.71	177.97	143.56
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	13.08	18.82	< 0.05	13.97	12.68	8.31	3.96	7.83	7.00
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	39.25	29.84	< 0.05	30.25	32.58	22.85	7.67	18.86	15.33
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	28.27	23.52	< 0.05	26.17	27.23	20.25	6.98	17.24	14.44
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	34.61	187.76	69.22	38.03	21.58	10.64	3.25	5.77	4.66
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	60.88	50.73	52.32	30.50	26.47	21.63	6.01	14.20	6.16
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	3.04	2.04	7.33	3.21	1.87	1.32	1.75	2.35	0.61
GENOVA 1 (26/06/2017)	9.96	9.80	17.46	14.83	15.04	11.28	4.17	10.47	9.80
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	12.45	13.76	< 0.05	17.03	14.62	10.62	4.45	11.02	10.68
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	0.83	2.02	< 0.05	1.74	1.34	0.80	1.16	1.30	0.35
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	0.65	1.56	< 0.05	3.74	2.12	1.42	1.22	3.12	2.01

Concentration en hydrocarbures exprimée en ng/g (P.S.)

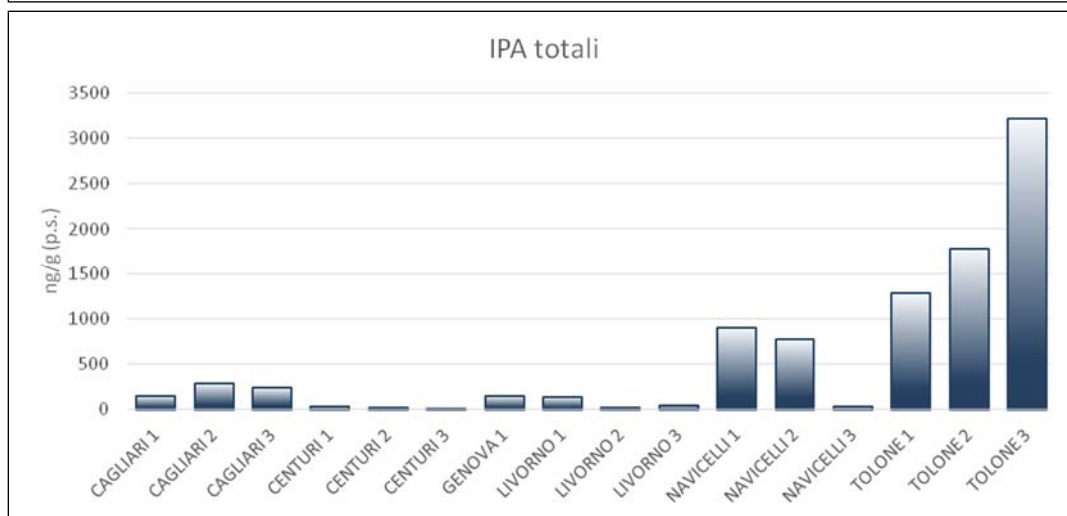
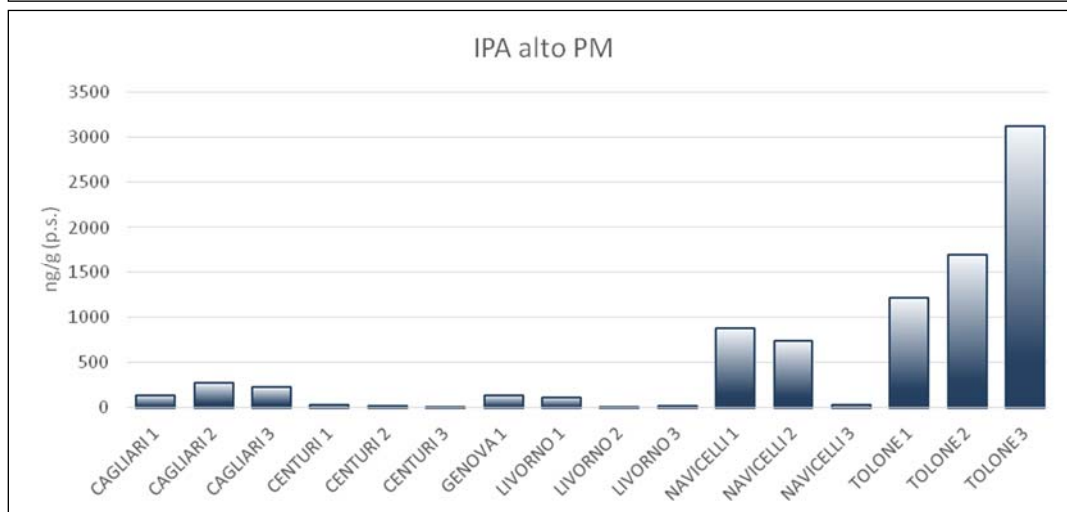
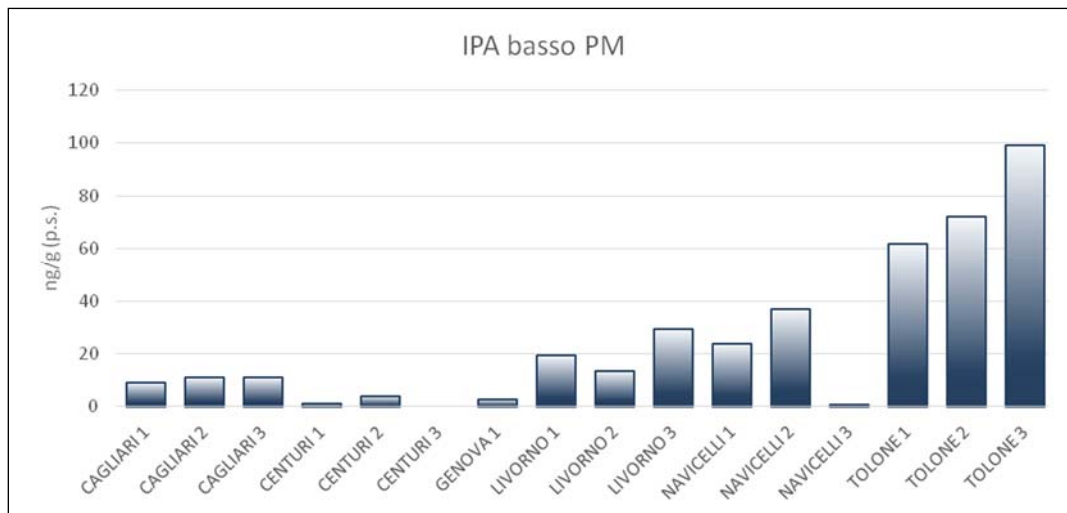
CAMPIONE/ Echantillon	IPA basso PM	IPA alto PM	IPA totali
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	1.23	29.87	31.10
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	3.96	18.89	22.86
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	< 0.1	8.90	8.90
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	61.83	1217.03	1278.86
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	72.04	1703.64	1775.68
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	99.06	3119.50	3218.56
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	8.97	135.31	144.28
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	10.97	279.34	290.31
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	11.18	235.62	246.79
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	23.59	883.10	906.69
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	36.75	741.51	778.26
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	0.76	32.51	33.27
GENOVA 1 (26/06/2017)	2.89	141.69	144.58
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	19.27	117.98	137.26
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	13.61	10.45	24.06
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	29.37	20.79	50.16

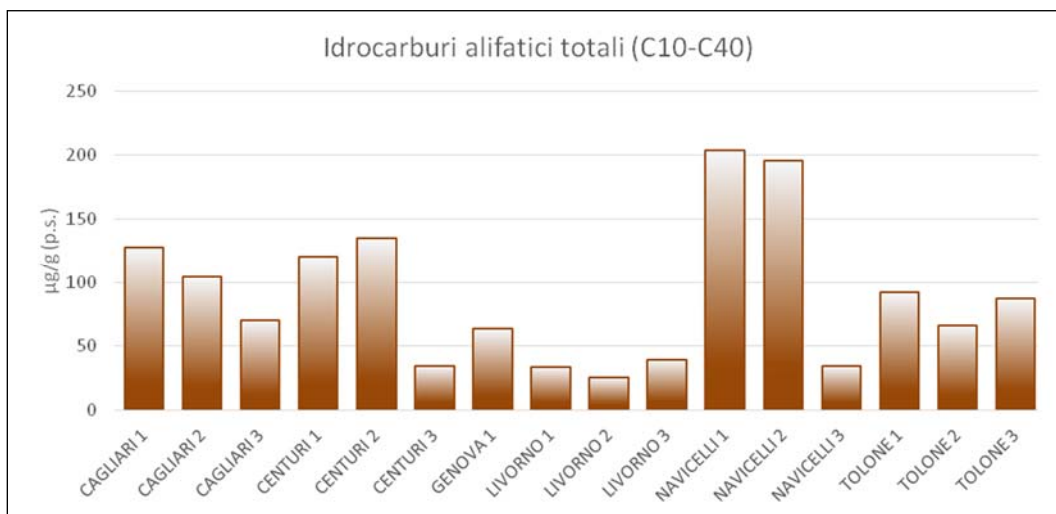
Concentration en HAP exprimée en ng/g (P.S.)

CAMPIONE/ Echantillon	Idrocarburi totali (C10- C40)	>C10- C12	>C12- C14	>C14- C16	>C16- C18	>C18- C20	>C20- C22	>C22- C24	>C24- C26	>C26- C28	>C28- C30	>C30- C32	>C32- C34	>C34- C36	>C36- C38	>C38- C40
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	120.77	0.37	0.73	6.04	19.18	20.68	14.08	9.96	3.01	1.63	0.73	6.41	6.92	7.69	23.34	< 0.01
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	134.98	0.85	1.16	10.88	10.35	9.47	12.17	5.06	3.47	1.24	2.83	15.29	17.49	14.96	< 0.01	29.78
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	34.77	< 0.01	0.27	3.08	2.97	3.47	4.36	0.89	0.82	0.57	0.38	2.99	1.41	1.82	11.45	0.29
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	92.19	1.03	1.57	6.69	8.31	7.64	11.16	3.78	3.82	1.71	5.66	9.36	11.09	3.45	16.92	< 0.01
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	65.95	0.03	0.39	4.33	5.68	6.31	11.33	3.09	4.85	1.78	5.58	1.78	5.83	2.23	12.75	< 0.01
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	86.92	1.05	1.03	5.65	7.07	7.08	10.13	2.72	4.73	1.91	8.69	6.78	11.67	2.99	15.28	0.16
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	127.99	0.43	1.48	8.20	9.13	4.12	5.47	2.48	2.38	2.91	8.87	18.44	34.27	12.24	16.73	0.85
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	104.51	0.57	1.28	6.16	5.82	4.84	6.38	1.38	3.44	5.79	8.93	18.48	14.21	10.75	< 0.01	16.46
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	70.49	0.16	0.66	4.00	6.14	6.14	6.23	2.19	2.14	1.96	4.64	9.07	6.26	4.08	16.11	0.69
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	204.20	1.13	3.46	16.25	38.84	54.96	38.90	5.77	3.11	2.20	3.38	6.10	5.46	5.04	18.86	0.73
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	195.48	0.72	2.11	10.58	16.48	20.40	17.64	6.94	4.13	5.09	12.62	19.21	32.78	20.49	25.15	1.15
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	34.46	0.01	0.35	2.95	4.07	3.87	4.25	0.74	1.12	0.46	0.55	0.86	0.90	2.11	12.22	< 0.01
GENOVA 1 (26/06/2017)	63.81	0.38	1.18	7.05	5.19	5.34	6.92	1.04	1.98	0.96	1.74	8.25	4.89	16.03	2.86	< 0.01
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	33.75	0.80	0.54	3.23	4.84	3.65	3.31	1.26	0.83	0.74	0.65	0.87	0.90	1.64	10.49	< 0.01
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	25.66	< 0.01	0.21	2.44	2.68	2.77	2.49	0.73	0.67	0.28	0.25	0.63	0.49	10.15	1.88	< 0.01
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	39.17	0.17	0.33	2.65	3.82	3.54	4.09	1.83	2.00	0.79	0.77	0.82	2.01	2.40	13.94	< 0.01

Concentration en hydrocarbures exprimée en µg/g (P.S.)

Les graphiques relatifs aux analyses d'hydrocarbures sont présentés ci-dessous à titre d'illustration :





➤ **Résultats des analyses chimiques : concentration en PCB**

Le tableau suivant contient les concentrations mesurées pour les polychlorobiphényles, exprimées en ng/g (p.s.) :

CAMPIONE/ Echantillon	PCB 28	PCB 52	PCB 101	PCB 118	PCB 138	PCB 153	PCB 180
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
GENOVA 1 (26/06/2017);	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

Concentration en PCB exprimée en ng/g (P.S.)

6.4) RÉSULTATS DES ANALYSES ÉCOTOXICOLOGIQUES

Le tableau indique les degrés de toxicité (tels qu'ils sont reportés dans la section "Matériaux et méthodes") liés aux analyses écotoxicologiques effectuées :

CAMPIONE/ Échantillon	ANALYSES ÉCOTOXICOLOGIQUES		
	Inhibition de la croissance de l'algue <i>Phaeodactylum tricorutum</i>	test de développement embryonnaire de l'Oursin <i>Phaeodactylum tricorutum</i>	MTX <i>Vibrio fisheri</i>
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition élevée	Inhibition absente/négligeable
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition absente/négligeable	Inhibition absente/négligeable
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition absente/négligeable	Inhibition absente/négligeable
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition absente/négligeable	Inhibition absente/négligeable
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition absente/négligeable	Inhibition absente/négligeable
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition absente/négligeable	Inhibition absente/négligeable
CAGLIARI POINT 1 (07/06/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition élevée	Inhibition absente/négligeable
CAGLIARI POINT 2 (07/06/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition très élevée	Inhibition absente/négligeable
CAGLIARI POINT 3 (07/06/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition très élevée	Inhibition absente/négligeable
NAVICELLI POINT 1 (08/06/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition très élevée	Modérée
NAVICELLI POINT 2 (08/06/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition très élevée	Inhibition absente/négligeable
NAVICELLI POINT 3 (08/06/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition très élevée	Modérée
GÊNES 1 (26/06/2017);	Inhibition absente/négligeable	Inhibition modérée	Inhibition absente/négligeable
LIVOURNE POINT 1 (29/06/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition modérée	Inhibition absente/négligeable
LIVOURNE POINT 2 (29/06/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition élevée	Inhibition absente/négligeable
LIVOURNE POINT 3 (29/06/2017)	Inhibition absente/négligeable	Inhibition élevée	Inhibition absente/négligeable

Degrés de toxicité liées aux analyses écotoxicologiques

CONCLUSIONS :

Vous trouverez en ANNEXE les résultats obtenus et élaborés par les laboratoires ISPRA et INSA, qui ont été comparés et commentés dans le cadre des réunions et des Comités techniques.

Le contrôle et l'évaluation croisée de ces résultats a permis d'identifier les zones et les quantités de sédiments à acheminer pour les phases suivantes de traitement pilote.

Les quantités de sédiments suivantes ont donc été identifiées :

- ✓ 15 tonnes à prélever sur le site identifié par la mention « CENTURI POINT 1 », dans le port de CENTURI
- ✓ 5 tonnes à prélever sur le site identifié par la mention « LIVOURNE POINT 1 », dans le port de LIVOURNE
- ✓ 13 tonnes à prélever sur le site identifié par la mention « CAGLIARI POINT 1 », dans le port de CAGLIARI
- ✓ 10 tonnes à prélever sur le site identifié par la mention « TOULON POINT 1 », dans le port de TOULON
- ✓ 5 tonnes à prélever sur le site identifié par la mention « NAVICELLI POINT 1 », dans le canal des Navicelli (Pise)
- ✓ 50 kg à prélever au point de prélèvement « GENOVA 1 », sur le site portuaire de Gênes

6.5) PHASE DE CARACTÉRISATION GÉOTECHNIQUE

6.5.1) Objectifs

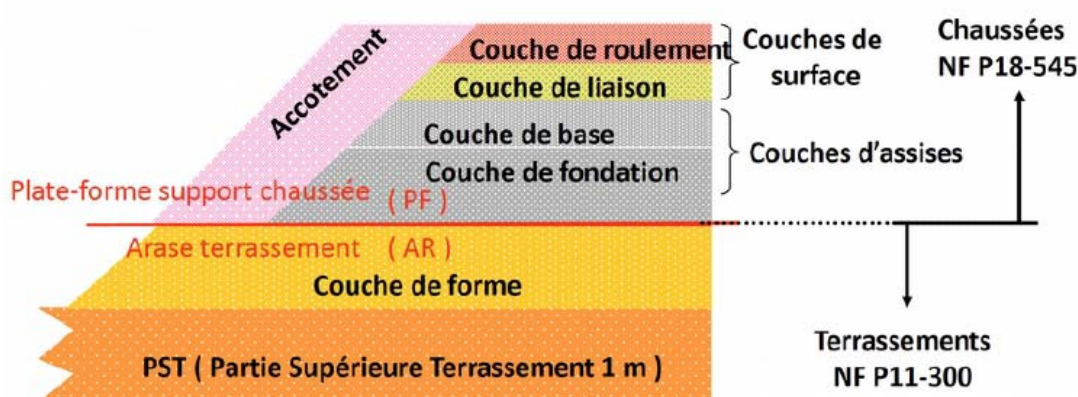
La caractérisation géotechnique visait à évaluer la possibilité d'utiliser les matériaux de dragage comme matériaux de construction, en particulier pour les routes, en adoptant les critères prévus par les réglementations française et italienne.

6.5.2) Structure routière de référence en France et en Italie

La figure ci-dessous synthétise la structure routière typique selon les schémas français.

En France, deux normes régissent l'utilisation des matériaux géologiques :

- la NF P18-545, pour les matériaux granulaires à hautes performances mécaniques constituant la couche de base et les couches liées à celle-ci. Ces matériaux ne sont pas présents dans les dragages réalisés et ne feront l'objet d'aucun approfondissement
- la NF P11-300 pour les matériaux utilisés pour la construction de remblais et couches intermédiaires entre la surface et la fondation (couches de forme).



En Italie, le schéma général de superstructure routière ne prévoit pas expressément une couche de forme entre le terrain naturel de la partie supérieure de terrassement et la couche de fondation.




Avec des terrains de fond de type argileux, on prévoit souvent une couche de sable qui a une fonction « anti-contaminante », car elle doit éviter l'infiltration de l'argile dans le matériau granulaire de la fondation. Sa fonction est maintenant remplacée par le géotextile.

Si la partie supérieure de terrassement est de mauvaise qualité, il convient de prévoir son assainissement, à savoir le remplacement du terrain existant par un terrain de meilleure qualité sur lequel poser la fondation. Dans ce cas, on peut parler, probablement, de *couche de forme* même pour l'Italie.

En ce qui concerne le plan de construction, le Conseil national de la recherche (CNR) a mis en application, en 1998, suite à sa publication au Bulletin officiel n° 178, le Catalogue des fondations routières qui définit des formules-types de superstructures routières, en fonction des conditions géotechniques de la couche de fond représentées par le module résilient (Mr) déterminé selon l'AASHTO T274-82 et du type de trafic.

N. 1F Module résilient du solitaire	AUTOSTRADE EXTRAURBANE					
	Numero di passaggi di veicoli commerciali					
	40.000	1.500.000	1.000.000	10.000.000	25.000.000	45.000.000
150 N/mm ²						
90 N/mm ²						
30 N/mm ²				SOTTOFONDO NON ADEGUATO AL TIPO ED ENTITA' DEL TRAFFICO (PREVEDERE BONIFICA)		

N. 4F Module résilient du solitaire	STRADE EXTRAURBANE SECONDARIE - ORDINARIE					
	Numero di passaggi di veicoli commerciali					
	40.000	1.500.000	1.000.000	10.000.000	25.000.000	45.000.000
150 N/mm ²						
90 N/mm ²						
30 N/mm ²						

-  CONGLOMERATO BITUMINOSO PER STRATO DI USURA
-  CONGLOMERATO BITUMINOSO PER STRATO DI COLLEGAMENTO
-  CONGLOMERATO BITUMINOSO PER STRATO DI BASE

 MISTO GRANULARE NON LEGATO

N.B. Gli spessori sono indicati in cm.

Nous allons présenter, à titre d'exemple, un certain nombre de formules-types prévues par le Catalogue pour différentes couches de fond et différents types de trafic. Outre la valeur M_r déterminée selon l'AASHTO T274-82, la norme technique autorise l'utilisation des corrélations suivantes entre le module de réaction K ou l'indice CBR.

$M_r = 150 \text{ N/mm}^2$	CBR = 15%	$K = 100 \text{ KPa/mm}$
$M_r = 90 \text{ N/mm}^2$	CBR = 9%	$K = 60 \text{ KPa/mm}$
$M_r = 30 \text{ N/mm}^2$	CBR = 3%	$K = 20 \text{ KPa/mm}$

En ce qui concerne les caractéristiques de la couche de fond, constituée par des matériaux inertes non liés, la valeur de l'indice CBR d'un échantillon compacté jusqu'à une densité au moins égale à 98 % de la densité AASHO modifiée (Proctor modifié) après immersion dans l'eau pendant 4 jours doit être égale ou supérieure à 30 %.

Les caractéristiques prévues par les normes techniques françaises et italiennes (granulométrie, haut niveau de résistance Los Angeles et insensibilité à l'eau) ne sont pas présentes dans les sédiments prélevés dans les ports qui participent au projet.

Les sédiments, en revanche, peuvent être classés afin d'en vérifier l'utilisabilité pour la construction de terre-pleins, couches de fond ou couches de forme.

6.5.3) Normes techniques de référence – comparaison entre les normes françaises et les normes italiennes

En ce qui concerne les normes françaises, nous nous sommes reportés au GTR 92 Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des couches de forme, du « *Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC)* » et du « *Service d'études sur les transports (SETRA)* ». La norme en vigueur est la NF-P 11 300 de septembre 1992, contenant une classification des terres utilisables dans les travaux publics.

En Italie, on applique la norme CNR³ UNI⁴ 10006 CNR-UNI 10006 « *Costruzione e manutenzione delle strade, Tecniche di impiego delle terre* » [Construction et maintenance des routes. Techniques d'emploi des terrains], de 1963, qui adopte les critères de la norme américaine **HRB-AASHO M 145 – 49** pour la classification des terrains destinés aux travaux publics. L'application de cette norme est prescrite par le « *Cahier des charges -type* », rédigé par le ministère des Infrastructures et des Transports, qui sert de référence pour la publication des appels d'offres émis par l'Ente Nazionale per le Strade (ANAS) et par les Società Autostrade et les autres sociétés propriétaires des autoroutes.

3 CNR: Consiglio Nazionale delle Ricerche/Conseil national de la recherche

4 UNI: Ente Italiano di Normazione/Organisme italien de normalisation

- **Norme française** : La norme française classe les terrains par groupes et sous-groupes en fonction de trois catégories d'essais :

<p>1. les essais d'identification ou de nature</p>	<p>La granularité l'indice de plasticité la valeur au bleu (méthylène) du sol (VBS) sur la fraction 0/50mm</p>
<p>2. les essais d'état</p> <p>Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol, mais fonction de l'environnement</p> <p>L'état très humide (th) L'état humide (h) L'état d'humidité moyenne (m) L'état sec (s) L'état très sec (ts)</p>	<p>On peut utiliser l'un ou l'autre des trois paramètres suivants:</p> <p>* La position de la teneur en eau naturelle (wn) de la fraction 0/20 mm du sol par rapport à l'Optimum Proctor Normal (wopn): wn/wopn</p> <p>* la position de la teneur en eau naturelle (wn) par rapport aux limites d'Atterberg wL et wp, qui s'exprime par l'indice de consistance (Ic): Ic= (wL - wn)/(wL- wp)</p> <p>* L'indice portant immédiat (IPI) qui exprime la valeur du poinçonnement CBR mesurée sans surcharges ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor Normal</p>
<p>3. les essais de comportement mécanique</p>	<p>La valeur LOS ANGELES (LA) La valeur MICRO DEVAL en présence d'eau M_{DE} ou la valeur de friabilité de sables F_s</p>

La NF P 11-300 répartit les sols en 4 classes distinctes : Classe A : sols fins ; Classe B : sols sableux et graveleux avec fines ; Classe C : sols comportant des fines et de gros éléments; Classe D : sols insensibles à l'eau.

La Classe A se distingue des autres classes par deux critères :

- Essais d'identification ou de nature
 - taille maximale des éléments < 50 mm
 - fraction pouvant être tamisée par un tamis avec maille 80 µm > 35 %.
- Essais d'état
 - Valeur du bleu de méthylène (VBS) ou indice de plasticité (Ip)

4 sous-groupes ont été créés en fonction des seuils : de A1 (Ip < 12) peu plastiques à A4 (Ip > 40) à forte plasticité.

D'autres sous-catégories ont été définies en fonction de l'état hydrique du sol, à l'état naturel (th; h; m; s; ts), par l'Indice Portant Immédiat (IPN) ; de la teneur naturelle en eau (w_n) comparée à la teneur optimale proctor (w_{opn}); de l'indice de consistance I_c .

La **Classe B** concerne la classification des sols sablonneux ou graveleux, avec présence de fines. En ce qui concerne les sols utilisés pour les terre-pleins, la classification par sous-groupes se fonde sur la nature granulométrique et l'état hydrique. Les sols employés pour les « couches de forme », (couche intermédiaire entre terrain naturel et la couche de fond) servent à permettre la circulation fluide des engins, à faciliter le nivellement, le roulage et à protéger des effets de la pluie et du ruissellement le terrain naturel ou la dernière couche du terre-plein. Ces sols doivent, donc, être insensibles à l'eau, résistants à la circulation des engins, avec des dimensions bien définies des principaux éléments et, éventuellement, insensibles au gel. Dans ce cas, outre les paramètres granulométriques (« classification selon nature ») des conditions d'humidité (« classification selon l'état hydrique »), la norme française évalue les propriétés des sols par la « classification selon le comportement », en se rapportant aux valeurs de Friabilité des sables (FS), à la résistance à l'usure avec essai Los Angeles (LA) et à la résistance à l'usure en présence d'eau, par l'essai Micro Deval (MDE).

La **Classe C** concerne les sols composés de fines (passant au tamis à $80\ \mu\text{m} > 12\%$), mélangées à des éléments grossiers $D_{\text{max}} > 50\ \text{mm}$. Elle ne fait pas référence à une éventuelle utilisation pour la création de terre-pleins ou de couches de forme.

La **Classe D** concerne les sols insensibles à l'eau, présentant une valeur de bleu de méthylène de $VBS \leq 1$ et passant au tamis avec mailles $80\ \mu\text{m} \leq 12$. Les sous-catégories sont constituées en fonction de l'intervalle granulométrique, de la friabilité (FS), de la résistance à l'usure (LA) et de la résistance à l'usure en présence d'eau (MDE).

Classe **A**

Tableau 1 - **Classification des sols fins**

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm > 35%	A Sols fins	VBS ≤ 2,5 ⁽¹⁾ ou I _p ≤ 12	A₁ Limos peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu collés, arènes peu plastiques...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 3 ou W _n ≥ 1,25 W _{OPN}	A ₁ th
				3 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 8 ou 1,10 ≤ W _n < 1,25 W _{OPN}	A ₁ h
				8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,1 W _{OPN}	A ₁ m
				0,7 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	A ₁ s
				W _n < 0,7 W _{OPN}	A ₁ ts
		12 < I _p ≤ 25 ⁽¹⁾ ou 2,5 < VBS ≤ 6	A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 2 ou I _c ⁽¹⁾ ≤ 0,9 ou W _n ≥ 1,3 W _{OPN}	A ₂ th
				2 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 5 ou 0,9 ≤ I _c ⁽¹⁾ < 1,05 ou 1,1 W _{OPN} ≤ W _n < 1,3 W _{OPN}	A ₂ h
				5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < I _c ≤ 1,2 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,1 W _{OPN}	A ₂ m
				1,2 < I _c ≤ 1,4 ou 0,7 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	A ₂ s
				I _c > 1,3 ou W _n < 0,7 W _{OPN}	A ₂ ts
		25 < I _p ≤ 40 ⁽¹⁾ ou 6 < VBS ≤ 8	A₃ Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 1 ou I _c ⁽¹⁾ ≤ 0,8 ou W _n ≥ 1,4 W _{OPN}	A ₃ th
				1 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 3 ou 0,8 ≤ I _c ⁽¹⁾ < 1 ou 1,2 W _{OPN} ≤ W _n < 1,4 W _{OPN}	A ₃ h
				3 < IPI ≤ 10 ou 1 < I _c ≤ 1,15 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,2 W _{OPN}	A ₃ m
				1,15 < I _c ≤ 1,3 ou 0,7 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	A ₃ s
				I _c > 1,3 ou W _n < 0,7 W _{OPN}	A ₃ ts
		I _p > 40 ⁽¹⁾ ou VBS > 8	A₄ Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	
				A ₄ h	
				A ₄ m	
				A ₄ s	

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe **B**

Tableau 2 - **Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines**

CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS							
CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME							
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	Sous classe fonction du comportement
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm ≤ 35%	B Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₁ Sables silteux...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		FS ≤ 60	B ₁₁
						FS > 60	B ₁₂
		tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% VBS > 0,2	B₂ Sables argileux (peu argileux)...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 4 ou W _n ≥ 1,25 W _{OPN}	B₂ th	FS ≤ 60	B ₂₁ th
						FS > 60	B ₂₂ th
				4 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 8 ou 1,10 W _{OPN} ≤ W _n < 1,25 W _{OPN}	B₂ h	FS ≤ 60	B ₂₁ h
						FS > 60	B ₂₂ h
				0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,10 W _{OPN}	B₂ m	FS ≤ 60	B ₂₁ m
						FS > 60	B ₂₂ m
				0,5 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	B₂ s	FS ≤ 60	B ₂₁ s
						FS > 60	B ₂₂ s
		W _n < 0,5 W _{OPN}	B₂ ts	FS ≤ 60	B ₂₁ ts		
				FS > 60	B ₂₂ ts		
		tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₃ Graves silteuses...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₃₁
				LA > 45 et MDE > 45	B ₃₂		

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe B (suite)

Tableau 2 - Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines

CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS				CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME			
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	Sous classe fonction du comportement
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm ≤ 35%	B	tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS > 0,2	B ₄ Graves argileuses (peu argileuses)...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 7 ou W _n ≥ 1,25 W _{OPN}	B ₄ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ th
				7 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 16 ou 1,10 W _{OPN} ≤ W _n < 1,25 W _{OPN}	B ₄ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ th
				0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,10 W _{OPN}	B ₄ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ h
				0,6 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	B ₄ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ h
				W _n < 0,6 W _{OPN}	B ₄ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ m
					B ₄ ts	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ m
		tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS < 1,5 ⁽¹⁾ ou I _p ≤ 12	B ₅ Sables et graves très siltieux...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 5 ou W _n ≥ 1,25 W _{OPN}	B ₅ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ th
				5 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 12 ou 1,1 W _{OPN} ≤ W _n < 1,25 W _{OPN}	B ₅ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ th
				12 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 30 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,10 W _{OPN}	B ₅ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ h
				0,6 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	B ₅ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ h
				W _n < 0,6 W _{OPN}	B ₅ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ m
					B ₅ ts	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ m
		tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% VBS > 1,5 ⁽¹⁾ ou I _p > 12	B ₆ Sables et graves argileux à très argileux	IPI ⁽¹⁾ ≤ 4 ou W _n ≥ 1,3 W _{OPN} ou I _c ≤ 0,8	B ₆ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 LA > 45 et MDE > 45	B ₆₁ th
				4 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 10 ou 0,8 < I _c ≤ 1 ou 1,1 W _{OPN} ≤ W _n < 1,3 W _{OPN}	B ₆ h		B ₆₂ th
				10 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 25 ou 1 < I _c ≤ 1,2 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,1 W _{OPN}	B ₆ m		B ₆₁ h
				0,7 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN} ou 1,2 < I _c ≤ 1,3	B ₆ s		B ₆₂ h
				W _n < 0,7 W _{OPN} ou I _c > 1,3	B ₆ ts		B ₆₁ m
					B ₆ ts		B ₆₂ m

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe C

Tableau 3 - Classification des sols comportant des fines et des gros éléments

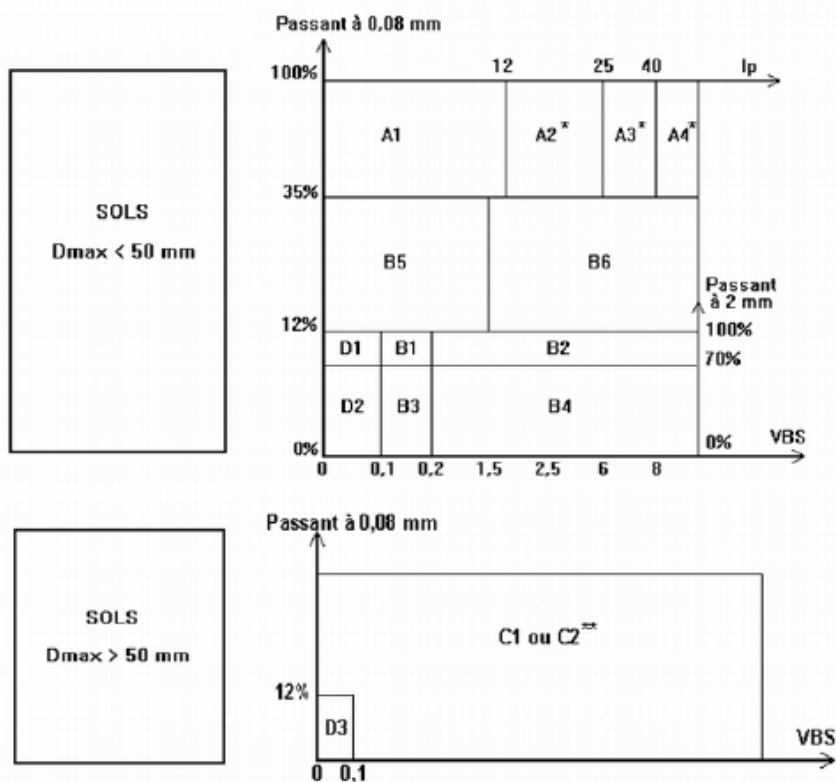
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique et le comportement																											
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature																												
D _{max} > 50 mm et tamisat à 80 µm > 12% ou si le tamisat à 80 µm ≤ 12% la VBS est > 0,1	C	Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm > 60 à 80% et matériaux roulés. La fraction 0/50 est un sol de classe A	C ₁ A ₁	Le sous-classement, en fonction de l'état hydrique et du comportement des sols de cette classe, s'établit en considérant celui de leur fraction 0/50 mm qui peut être un sol de la classe A ou de la classe B * 1 ^{er} exemple : un sol désigné C ₁ A ₂ h est un sol qui est : ● soit entièrement roulé, ● soit entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction 0/50 représente plus de 60 à 80% de la totalité du matériau. Dans les deux cas, sa fraction 0/50 mm appartient à la classe A ₂ avec un état hydrique h. * 2 ^{ème} exemple : un sol désigné C ₁ B ₄₂ m est un sol qui est : ● entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction 0/50 mm représente moins de 60 à 80% de la totalité du matériau. La fraction 0/50 mm est un sol de la classe B ₄₂ se trouvant dans un état hydrique m. Les différents sous-classes composant la classe C sont :																											
			Argiles à silex, éboulis, moraines, alluvions grossières...																												
			C ₁ B ₁																												
			Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...																												
Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 est un sol de classe A	C ₂ A ₁	Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...	<table border="1"> <tr> <td>C₁A₁</td> <td>C₁A₂</td> <td>C₂A₁</td> <td>C₂A₂</td> <td rowspan="2">Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C₁A₃</td> <td>C₁A₄</td> <td>C₂A₃</td> <td>C₂A₄</td> </tr> <tr> <td>C₁B₁₁</td> <td>C₁B₁₂</td> <td>C₂B₁₁</td> <td>C₂B₁₂</td> <td rowspan="2">Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique</td> </tr> <tr> <td>C₁B₂₁</td> <td>C₁B₂₂</td> <td>C₂B₂₁</td> <td>C₂B₂₂</td> </tr> <tr> <td>C₁B₃₁</td> <td>C₁B₃₂</td> <td>C₂B₃₁</td> <td>C₂B₃₂</td> <td rowspan="2">Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C₁B₄₁</td> <td>C₁B₄₂</td> <td>C₂B₄₁</td> <td>C₂B₄₂</td> </tr> </table>		C ₁ A ₁	C ₁ A ₂	C ₂ A ₁	C ₂ A ₂	Etat th, h, m, s ou ts	C ₁ A ₃	C ₁ A ₄	C ₂ A ₃	C ₂ A ₄	C ₁ B ₁₁	C ₁ B ₁₂	C ₂ B ₁₁	C ₂ B ₁₂	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique	C ₁ B ₂₁	C ₁ B ₂₂	C ₂ B ₂₁	C ₂ B ₂₂	C ₁ B ₃₁	C ₁ B ₃₂	C ₂ B ₃₁	C ₂ B ₃₂	Etat th, h, m, s ou ts	C ₁ B ₄₁	C ₁ B ₄₂	C ₂ B ₄₁	C ₂ B ₄₂
C ₁ A ₁	C ₁ A ₂	C ₂ A ₁			C ₂ A ₂	Etat th, h, m, s ou ts																									
C ₁ A ₃	C ₁ A ₄	C ₂ A ₃			C ₂ A ₄																										
C ₁ B ₁₁	C ₁ B ₁₂	C ₂ B ₁₁			C ₂ B ₁₂	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique																									
C ₁ B ₂₁	C ₁ B ₂₂	C ₂ B ₂₁	C ₂ B ₂₂																												
C ₁ B ₃₁	C ₁ B ₃₂	C ₂ B ₃₁	C ₂ B ₃₂	Etat th, h, m, s ou ts																											
C ₁ B ₄₁	C ₁ B ₄₂	C ₂ B ₄₁	C ₂ B ₄₂																												
Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 est un sol de classe B	C ₂ B ₁	Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...																													

Classe **D**

Tableau 4 - **Classification des sols insensibles à l'eau**

CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS				CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME		
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Valeurs seuils retenues		Sous classe
VBS ≤ 0,1 et tamisat à 80 µm ≤ 12%	D Sols insensibles à l'eau	D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm > 70%	D₁ Sables alluvionnaires propres, sables de dune...	FS ≤ 60	D ₁₁	
				FS > 60	D ₁₂	
		D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm ≤ 70%	D₂ Graves alluvionnaires propres, sables...	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₂₁	
				LA > 45 et MDE > 45	D ₂₂	
		D _{max} > 50 mm	D₃ Graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires,...	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₃₁	
				LA > 45 et MDE > 45	D ₃₂	

Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature



➤ **Norme italienne :**

En Italie, l'outil d'évaluation et d'acceptation des matériaux est « le cahier des charges particulières » rédigé pour chaque projet, qui représente la « loi spéciale » régissant l'exécution des différents types de travaux.

Comme déjà mentionné, le modèle de référence de tous les cahiers des charges est le CAHIER DES CHARGES TYPE POUR LES TRAVAUX PUBLICS du MINISTÈRE DES INFRASTRUCTURES ET DES TRANSPORTS, établissant les critères de vérification de l'adéquation pour l'emploi dans les travaux publics des sols provenant de zones de terrassement et de « carrières de prêt ».

Le cahier des charges-type prévoit :

a) essais d'identification de la nature et de l'état des sols

- granulométrie et limites d'Atterberg, pour la classification selon la norme CNR-UNI 10006/63
- teneur en eau naturelle (CNR-UNI 10008/63) et consistance

b) essais finalisés à la définition des modalités de compactage

- compactage AASHO standard et/ou modifié (CNR 69/78) selon la variation de la teneur en eau, avec identification de la densité maximale de la matière sèche (gsmax) et de l'humidité optimale de compactage (wopt)

c) essais relatifs aux caractéristiques mécaniques

- analyses granulométriques comparatives, avant et après l'essai de compactage, uniquement pour les matériaux pour lesquels l'on soupçonne la présence de composants fragiles ou instables
- indice portant CBR, selon des modalités d'essai tenant compte de la destination du matériau, des risques de saturation en eau (gravitationnelle et/ou capillaire) et du degré d'épaississement prévisible
- afin d'évaluer les effets de la variation de l'humidité et du degré d'épaississement sur la portance des couches réalisées, une étude CBR complète, prenant en compte différentes énergies et humidités de compactage, selon la norme SN 670320b, peut se révéler utile.

Pour les roches évolutives (à savoir, qui se modifient avec l'usage : argilites, marnes, schistes) il convient de mesurer, en outre :

- la résistance à la compression simple sur petits cubes (CNR 4/53) et le volume correspondant
- la perte de poids à l'essai Los Angeles (CNR 34/73) déterminée, de préférence, pour la Classe A (dimensions inférieures à 38,10 mm)

Lorsque, dans le cadre de l'utilisation de roches évolutives, l'évaluation du comportement par des essais de compactage AASHO et des essais CBR en laboratoire ne serait pas possible ou significative, l'adéquation à l'emploi peut être déterminée en mesurant le module de déformation Md (CNR 146/92), dans le cadre des essais préalables grandeur nature, sur le terrain.

Classification des sols

En ce qui concerne la classification HRB AASHO 145-49 /CNR UNI 10006, elle a pour but d'évaluer les caractéristiques du sol de la couche de fond (substrat naturel et/ou sol à utiliser comme couche de forme). Contrairement au système de classification français NF-P 11 300, la norme CNR UNI 10006 ne prévoit aucune répartition en sous-groupes par des essais d'évaluation de l'état hydrique et du comportement.

Classification HRB AASHO M 145-49 AASHO M 145-49	Sols graveleux-sablonneux Fraction passant au tamis 0,075 UNI 2332 ≤ 35 %							Terres limoneuses-argileuses Fraction passant au tamis 0,075 UNI 2332 > 35 %					Tourbes et terres organiques palustres
	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7		
Groupe	A 1-a	A 1-b		A 2-4	A 2-5	A 2-6	A 2-7				A 7-5	A 7-6	
Sous-groupe													
Analyse granulométrique Fraction passant au tamis													
AASHO M 145-49	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,4 UNI 2332 %	30	50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075 UNI 2332 %	15	25	10	35	≤ 35	≤ 35	35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35
Caractéristiques de la fraction passant au tamis tamis 0,4 UNI 2332													
Limite liquide	-	-	40	> 40	> 40	40	> 40	£ 40	> 40	40	> 40	> 40	> 40
Indice de plasticité	≤ 6	N.P	10	≤ 10 max	≤ 10	> 10	> 10	10	≤ 10	> 10	> 10 (IP≤ LL-30) :	> 10 (IP≤ LL-30) :	> 10
Indice de groupe	0		0	0			4	≤ 8	≤ 12	≤ 16	20		

Types de matériaux constituant le groupe	Gravier ou brèche, Gravier ou brèche sablonneuse, pierre ponce, scories volcaniques	Sable fin	Gravier ou sable limoneux	Gravier ou sable argileux	Limons peu compressibles	Limons peu compressibles	Argiles peu compressibles	Argiles fortement compressibles moyennement plastiques	Argiles fortement compressibles moyennement plastiques	Tourbes de formation récente ou éloignée, débris organiques d'origine palustre
Qualités portantes, telles que le fond en absence de gel	Excellentes à bonnes			Médiocres à mauvaises					A ne pas prendre en considération comme fond	
Action du gel sur les qualités portantes du fond	Aucune action ou action négligeable			Moyenne	Très élevée	Moyenne	Elevée	Moyenne		
Retrait ou gonflement	Absent		Absent ou léger		Léger à moyen		Élevé		Très élevé	
Perméabilité	Élevée		Moyenne ou faible			Faible ou très faible				
Identification du sol in situ	Facilement identifiable à l'œil nu	Rugueux au toucher, meuble à l'état sec	La plupart des granulés sont identifiables à l'œil nu - rugueux au toucher. Ténacité moyenne à élevée à l'état sec indiquant la présence d'argile		Réaction à l'essai d'agitation (*) Pulvérulents ou peu tenaces à l'état sec. Difficilement modelables à l'état humide		Pas de réaction à l'essai d'agitation (*). Tenaces à l'état sec - Facilement modelables en petites baguettes à l'état humide		Fibreux, de couleur brun foncé ou noir - Facilement identifiables à l'œil nu	
(*) essai sur chantier qui peut servir à distinguer les limons des argiles. On l'exécute en agitant sur la paume de la main un échantillon de roche mouillée et en l'écrasant ensuite avec les doigts. La roche en vrac réagit à cet essai si, après agitation, un voile brillant d'eau libre apparaît sur la surface et disparaît, ensuite, en écrasant l'échantillon avec les doigts.										

Comme le montre la classification ci-dessus, les paramètres appliqués dans celle-ci se limitent à la granulométrie et aux limites d'Atterberg. L'utilisation de l'essai au bleu de méthylène n'est pas prévue (VBS).

Les critères de classification ne comprennent pas :

- les « essais d'état », à savoir les essais destinés à évaluer l'état d'humidité de la terre sur le site,
- les « essais de comportement mécanique ».

Dans la norme HRB AASHO 145-49 /CNR UNI 10006 les sols sont répartis en trois catégories générales :

- Terres graveleuses-sablonneuses avec fraction limoneuse et argileuse, passant au tamis avec tamis 0,075 mm (75 µm) < 35 %
- Terres limoneuses et argileuses passant au tamis avec tamis 0,075 mm (75 µm) < 35 %
- Tourbes et terres organiques palustres

Réparties, à leur tour, en groupes et sous-groupes :

D'autres groupes et sous-groupes sont définis en fonction :

- du tamisage avec tamis 2 mm, 0,4 mm et 0,075 mm
- de la valeur du seuil de liquidité (SL)
- de la valeur de l'indice de plasticité (IP)
- de l'indice de groupe (IG)

L'indice de groupe définit le comportement statique d'un sol dont la portance sera d'autant plus satisfaisante que l'indice sera faible. Ig est calculé par la relation suivante :

$$IG = 0,2 a + 0,05 ac + 0,01 bd$$

Où :

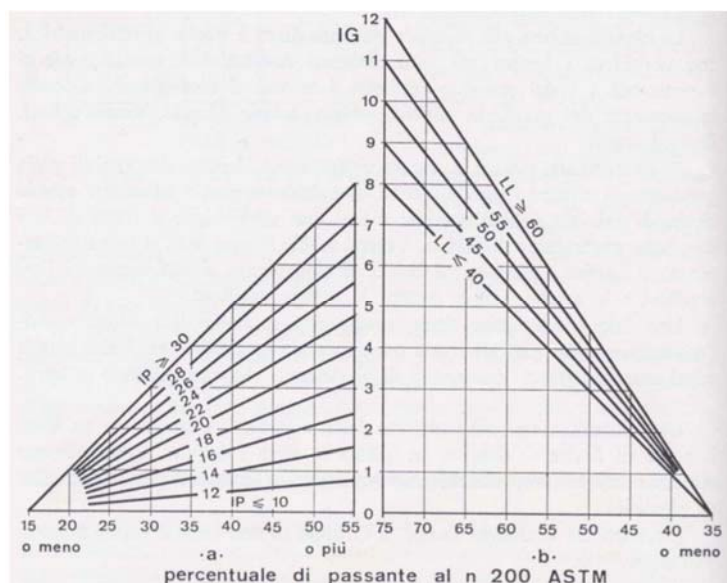
a est le pourcentage de matière passant au tamis avec tamis 0,075 UNI 2332 moins 35. Si ce pourcentage est supérieur à 75 ou inférieur à 35 ; **a** est égal, respectivement, à 75 et 35

b est le pourcentage de matière passant au tamis avec tamis 0,075 UNI 2332 moins 15. Si ce pourcentage est supérieur à 55 ou inférieur à 15 ; **b** est égal, respectivement, à 55 et 15

c est la valeur du seuil liquide *SL* moins 40. Si ce pourcentage est supérieur à 60 ou inférieur à 40 **c** est égal, respectivement, à 60 et 40

d est la valeur de l'indice de plasticité *IP* moins 10. Si la valeur de l'indice de plasticité est supérieure à 30 ou inférieure à 10, **d** est égal, respectivement, à 30 et 10

Les valeurs de **a**, **b**, **c** et **d**, et celles résultant de l'indice de groupe doivent être arrondies au nombre entier le plus proche. Au lieu de la méthode d'analyse, il est possible d'utiliser le graphique suivant :



Si $IG = 0$ le sol est classé comme bon

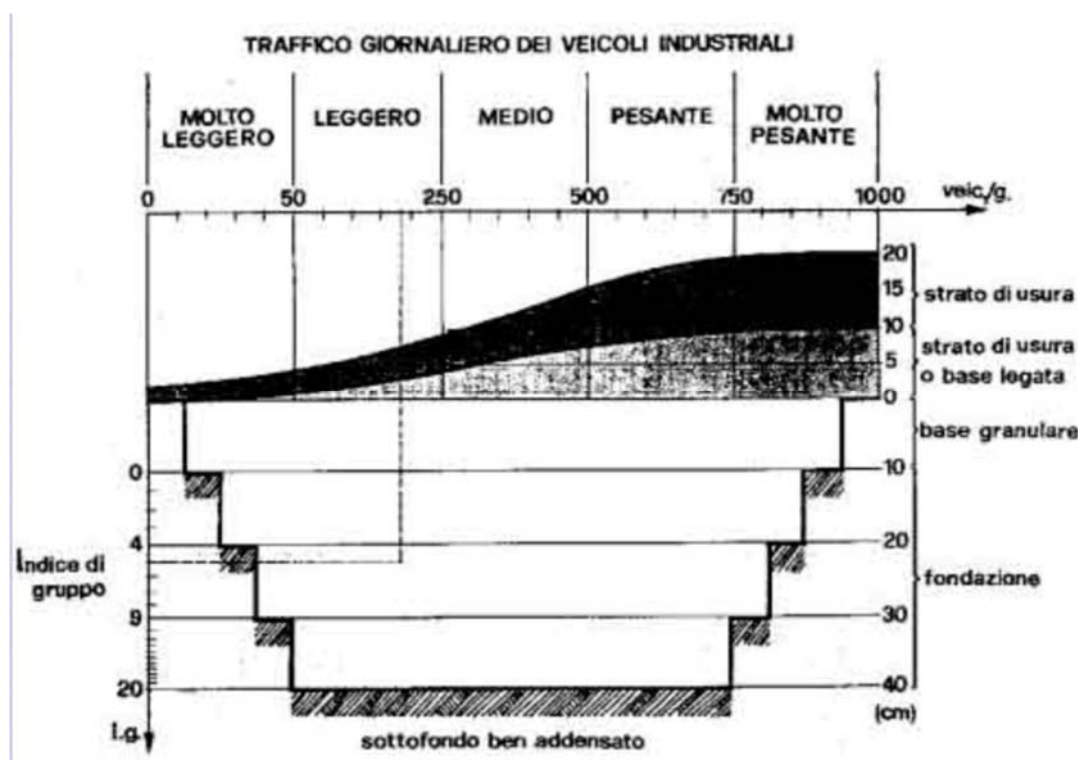
$1 \leq IG \leq 10$ le sol est classé comme médiocre

$10 < IG \leq 20$ le sol est classé comme mauvais ou très mauvais

Par le passé, l'indice de groupe et le type de trafic servaient à déterminer les épaisseurs et la superstructure routière, à l'aide du graphique suivant :

- avec un indice de groupe faible (ex. $IG = 0$), dans les mêmes conditions de trafic, une faible épaisseur de fondation est suffisante

- avec un indice de groupe élevé ($IG = 20$), l'épaisseur de fondation doit être beaucoup plus importante



Dans le CNR UNI 10006, la classification HRB-AASHO est complétée par la description des caractéristiques lithologiques ; les qualités portantes en l'absence de gel ; les effets du gel sur les qualités portantes du sol de la couche de fond ; la tendance au retrait ou au gonflement ; les caractéristiques de perméabilité ; les critères d'identification des sols in situ, comme indiqué dans le tableau suivant.

Comme déjà mentionné, en Italie l'évaluation de l'acceptabilité du comportement d'un sol en fonction de son état hydrique et de ses caractéristiques de résistance n'a pas lieu par comparaison avec les seuils prévus par un système de classification, mais il convient de se reporter aux dispositions prévues par le Cahier des Charges Particulières-type pour les travaux publics (CSA Type).

Il convient de mentionner les dispositions du CSA Type concernant l'utilisation des sols :

« Il faut utiliser, dans la formation de terre-pleins avec des matériaux provenant de travaux d'excavation (..), par ordre de priorité, les matériaux en vrac des groupes A1, A2-4, A2-5, A3 et, par conséquent, A2-6 et A2-7.

Pour les sols appartenant aux groupes A4, A5, A6 et A7, il convient de décider s'ils doivent être employés en adoptant les précautions décrites ci-dessous, s'ils doivent être traités, ou s'ils doivent être portés à la décharge.

Les matériaux employés, quel que soit leur groupe d'appartenance, doivent être entièrement exempts de matières organiques et végétales ou d'éléments solubles ou instables dans le temps.

Les sols à teneur en matières organiques d'origine végétale inférieure à 5 % peuvent être employés pour la création de couches de terre-pleins placés à plus de 2 mètres du plan de pose du revêtement. »

Groupe A1- *Font partie de ce groupe les matières rocheuses évolutives et les terres granulaires plus ou moins grossières, presque insensibles à l'eau et au gel, qui peuvent donner lieu, en termes de mouvement du sol, à un vaste spectre de comportements, en ce qui concerne :*

- *La teneur en fines (fraction inférieure à 0,075 mm)*
- *L'assortiment granulométrique*
- *La présence de granulats de grosses dimensions*

En ce qui concerne leur emploi, il convient de considérer que, après le compactage, les graviers et les sables d'origine alluvionnaire avec une faible teneur en fines (moins de 5 %), perméables et meubles, sont d'autant plus soumis à l'érosion par les eaux de pluie que l'assortiment granulométrique n'est pas correctement gradué. Il convient donc de prévoir une couverture végétale de protection pour les ravins.

Les débris de nappe phréatique, les roches altérées, les dépôts morainiques ainsi que les alluvions hétérogènes, avec une teneur en fines comprise entre 10 et 15 %, donnent lieu à la formation de couches très compactes peu soumises à l'érosion, tout en nécessitant un contrôle attentif de l'humidité de compactage afin d'obtenir des valeurs de portance élevées.

Les matériaux avec des éléments supérieurs à $D=50$ mm et, en particulier, ceux provenant d'excavations pratiquées dans des roches (dures et tenaces) et nécessitant des précautions et des dispositions particulières en ce qui concerne leur étalement en couches d'une épaisseur régulière et leur compactage.

Les opérations suivantes doivent être effectuées :

- *Élimination des éléments de dimensions supérieures à $D=500$ mm ;*
- *Correction granulométrique (suite à fractionnement et/ou à ajout de morceaux manquants).*

(..) Les sols du sous-groupe A1-a, en particulier si la granulométrie est bien assortie, sont réservés aux ouvrages en terre qui requièrent des propriétés mécaniques plus élevées et/ou aux couches de fond.

Groupe A3 : *Les sables appartenant à ce groupe, en particulier lorsqu'ils présentent une fraction graveleuse (> 2 mm) modérée, ne sont pas adaptés au compactage et à la circulation des engins de chantier par manque de cohésion et de portance. Généralement, l'emploi sans précautions particulières se limite à l'assainissement des plans de pose des terre-pleins et des couches anticapillaires ; les sols appartenant à ce groupe peuvent être employés pour la formation du corps du terre-plein si leur coefficient d'uniformité (D_{60}/D_{10}) n'est pas inférieur à 7.*

Pour les sables à granulométrie uniforme il faut prévoir, en revanche, un traitement au béton ou une correction granulométrique, ou les deux.

Sous-groupes A2-4 et A2-5 – *Les graviers et les sables limoneux à faible plasticité de ces deux sous-groupes peuvent être employés sans difficulté particulière pour la construction de terre-pleins : la faible plasticité ($IP < 10$) et une fraction fine limitée ($< 35\%$) permettent, en effet, de modifier facilement leur teneur en eau.*

Ils présentent, en générale, une faible perméabilité et remontée capillaire et ne requièrent, donc, aucune disposition particulière pour la protection contre le gel de la couche de fond et du revêtement supérieur.

Lorsque la fraction fine ne dépasse pas 12 % et en l'absence de granules de grosses dimensions ($D > 71$ mm), ces sols ne présentent aucun problème particulier en termes de compactage.

Sous-groupes A2-6 et A2-7 – *Les graviers et les sables argileux appartenant à ces sous-groupes peuvent être généralement employés de manière satisfaisante pour la création de terre-pleins en particulier lorsqu'ils présentent un indice de groupe $IG=0$. Toutefois, leur comportement est influencé, en grande partie, par la quantité et la nature de la fraction argileuse présente.*

La portance et les caractéristiques mécaniques présentent des valeurs intermédiaires entre celles des graviers et des sables qui constituent la structure lithique du matériau et celles des argiles de la fraction fine. Une fois posées, elles présentent une perméabilité et une hauteur de remontée capillaire moyenne-basse, ce qui entraîne un risque élevé de formation de lentilles de glace par effet du gel.

C'est la raison pour laquelle, en présence d'une nappe superficielle et de conditions de basse température prolongées, leur emploi doit être évité pour la formation de couches de fond et limité aux couches placées à une profondeur supérieure à 2,00 mètres par rapport au plan de pose du revêtement routier, après préparation, à une moindre profondeur, d'une couche anticapillaire d'une épaisseur égale ou supérieure à 30 cm.

L'énergie et l'humidité de compactage des sols appartenant aux sous-groupes étudiés doivent être constamment contrôlées ; en effet, lorsque la teneur en eau approche ou dépasse le seuil de plasticité de la fraction fine, cela peut donner lieu à une instabilité ou à une baisse de la portance suite à un sur-compactage du matériau(..).

Groupes A4, A5, A6 et A7– L'opportunité d'employer des sols appartenant à ces catégories doit être évaluée selon les lignes directrices suivantes :

- disponibilité de sols de remplacement, y compris compte tenu des distances de transport et des exigences de nature environnementale
- dispositions à adopter pour protéger de l'eau (de pluie ou capillaire) les ouvrages en terre réalisés avec ces sols
- techniques d'amélioration, telles que le traitement à la chaux, visant à ramener les propriétés physico-chimiques et mécaniques dans les limites de garantie des performances, au cours de la durée de vie de l'œuvre.

Terres A4 et A5

En ce qui concerne l'emploi des matériaux appartenant aux groupes A4 et A5, les critères suivants doivent être pris en considération :

- la consistance de ces terres ($IP < 10$) change de manière sensible même suite à de faibles variations de la teneur en eau ; de faibles augmentations de l'humidité peuvent également entraîner une rapide transition des comportements typiques des terrains secs, difficiles à compacter, à ceux des terrains trop humides, qui souvent ne peuvent pas fournir le niveau de densité requis

En ce qui concerne l'assortiment granulométrique et la densité, la plage de variation de la perméabilité et de la puissance de remontée capillaire peut être relativement vaste ; ceci donne lieu à un fort potentiel de saturation en eau (débit d'imbibition capillaire) et à une très grande sensibilité au gonflement et au gel. Les remblais réalisés avec ces types de sols doivent, donc, être protégés des eaux internes et externes, par le biais de couches anticapillaires, d'écrans drainants et de renforcements latéraux engazonnés.

- la présence de cailloux et d'éléments de plus grosses dimensions peut empêcher l'action des dispositifs de mélange ce qui en rendrait impossible la stabilisation à la chaux.

Terres A6 et A7

Les difficultés de compactage d'argiles des groupes A6 et A7, les propriétés mécaniques généralement modestes des couches ainsi que les moyens de protection contre l'infiltration d'eau qui doivent être mis en œuvre pour éviter le retrait-gonflement du matériau posé, limitent l'emploi de ces sols à la construction de remblais de moindre importance ou des comblements non structurels.

En l'absence d'éléments de grosses dimensions, les terres des groupes A6 et A7 se prêtent à une stabilisation à la chaux. »

Essais de réception et seuils

Outre les règles définies pour la qualité des sols à utiliser pour les remblais, des essais et des seuils spécifiques ont été établis en fonction de certains usages particuliers des matériaux géologiques :

- Terres pour couches anticapillaires à placer à la base des remblais ;
- Terres pour couches constitutives de remblais ou massifs pour sols renforcés ;
- Terres pour couches de forme (plan de pose de revêtement routier) pour des tronçons de route en tranchée ou en surface.

Couches anticapillaires

Les couches anticapillaires sont des couches de remblai composées de matériaux granulaires très perméables, éventuellement protégés par des géotextiles ayant une fonction anti-contaminante. Elles doivent empêcher l'infiltration de l'argile du terrain naturel et la contamination, par celle-ci, du matériau granulaire de la couche de forme supérieure.

La couche anticapillaire en matériau naturel d'une épaisseur généralement comprise entre 30 et 50 cm, doit être composée de sols granulaires (gravier, gravillon), dotés d'une granulométrie comprise entre 2 et 50 mm, avec matière passant au tamis de 2 mm d'un poids égal ou inférieur à 15 % et matière passant au tamis de 0,075 mm égale ou inférieure à 3 %.

Le matériau doit être totalement exempt d'éléments instables (gélifs, tendres, solubles, etc.) et de résidus végétaux ; l'emploi de fragments ou matériaux recyclés est autorisé.

Sauf vérifications plus restrictives, le contrôle de la qualité de la couche anticapillaire doit être effectué par le biais d'analyses granulométriques qui devront être réalisées à raison de 101 échantillons tous les 100 m³ de matériau placés sur le site.

On les obtient en insérant entre les couches de remblai des éléments résistants à la traction, de type monodirectionnel (armatures métalliques, généralement plates), ou bien bidirectionnel (géotextiles, grilles métalliques, géo-grilles, etc.). Les matériaux choisis doivent obligatoirement posséder des caractéristiques spéciales, afin d'assurer le maintien en bon état du massif.

Pour le terrain du remblai en terre renforcée, il convient d'employer des terres appartenant aux groupes : A1-a, A1-b, A3, A2-4 et A2-5 de la classification CNR - UNI 10006/1963.

Les conditions suivantes doivent être respectées dans tous les cas :

- le terrain de remplissage doit présenter un matériau passant au tamis à 0,075 mm inférieur à 15 %

- Les terrains avec matériau passant au tamis 0,075 mm supérieur à 15 %, peuvent également être employés si :

➤ le pourcentage de l'échantillon examiné pour la sédimentation, de dimensions inférieures à 15 micron est inférieur à 10 %.

➤ le pourcentage ci-dessus reste compris entre 10 % et 20 % et l'angle de frottement interne, mesuré avec des essais de coupe directe sur échantillons saturés est supérieur à 25°.

➤ Le terrain de remplissage ne doit contenir aucun élément supérieur à D = 200 mm.

➤ La valeur de résistivité du matériau, saturé après une heure de contact terre-eau à une température de 20 °C, doit être supérieure à 1 000 Ohm/cm pour les ouvrages à sec et à 3 000 Ohm/cm pour les ouvrages inondables.

➤ La valeur d'activité des ions (pH) mesurée sur l'eau de l'échantillon de terre saturé doit être comprise entre 5 et 10.

➤ La teneur en chlorures et sulfates doit être déterminée uniquement pour les matériaux ayant une résistivité comprise entre 1 000 et 5 000 Ohm/cm et ne doit pas dépasser les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous :

	Ouvrages à sec	Ouvrages en eau douce
Ion Cl	200 mg/kg	100 mg/kg
Ion SO4	1000 mg/kg	500 mg/kg

Couche de fond

Le fond est le volume de terre encore sensible aux sollicitations résultant du trafic routier et transmises par le revêtement.

Il peut s'agir du terrain naturel présent sur le site, s'il a été jugé adapté selon la classification CNR UNI 10006, ou des terres adéquates ; dans ce dernier cas, il représente la zone de transition entre le terrain sur le site (en tranchée ou en surface, sur le terrain naturel) et le revêtement et peut correspondre à la *couche de forme* de la norme française ; ou bien il peut être placé entre le remblai et le revêtement.

Cette couche sert à assurer les caractéristiques requises pour le plan de pose de la superstructure routière (composée d'une couche de fond, des couches de base, d'une couche de liaison et d'usure), notamment en ce qui concerne la portance et la régularité de la surface finie.

La couche de fond doit donc pouvoir concilier les imperfections et l'hétérogénéité des terrassements avec l'homogénéité nécessaire, pour la pose du revêtement et notamment :

- Elle doit conférer au support du revêtement, en chaque point, une portance suffisante pour assurer les niveaux de stabilité et de fonctionnalité admis pour le projet et pour la superstructure (homogénéisation de la portance) ;
- Elle doit protéger, pendant la construction, les couches sous-jacentes des infiltrations d'eau de pluie et, pendant l'exploitation la couche de fond supérieure des remontées de fines polluantes ; cette dernière fonction peut être attribuée à une couche particulièrement prévue à cet effet (sable) ou à un géotextile non tissé.

En général, l'épaisseur totale du fond (à réaliser, selon les cas, en étalant et en compactant une ou plusieurs couches) dépend de la nature du matériau employé, de la portance du support (terrain naturel ou corps du remblai) et de la portance prévue, dans le cadre du projet, pour le plan de pose de la superstructure.

En ce qui concerne le choix du matériau et les règles de construction, il convient de tenir compte, par ailleurs, des risques de saturation en eau de la couche (résultant de la présence éventuelle d'une nappe superficielle), des conditions climatiques prévues pendant la phase de construction (précipitations) et d'exploitation (gel), ainsi que du trafic d'engins de chantier prévu et des nécessités liées à la construction du revêtement.

Les paramètres requis par les normes italiennes sont les suivants :

- Matériaux exempts d'éléments de dimensions supérieures à $D=100$ mm
- Terrains granulaires, avec assortiment granulométrique correctement gradué, constitués, de préférence, d'éléments à vive arête, contenant une faible quantité de fines (matériau passant au tamis à $0,075$ mm inférieur à 12 %), non plastiques, avec $IP < 6$.

Le tout-venant de carrière et des matériaux mélangés d'origine fluviale (naturels ou avec granulométrie corrigée), dotés d'une granulométrie de $0/100$ mm bien assortie, appartenant au groupe A1-a de la classification CNR-UNI 10006, sont adaptés pour la construction de couches de fond d'excellente qualité.

Sous réserve de la proposition de solutions différentes, qui devront être justifiées du point de vue technique et économique, on peut employer des terres du groupe $IG = 0$, même non traitées avec liant, à condition qu'elles soient dépourvues d'éléments de dimensions supérieures à $D > 100$ mm et qu'elles soient conformes aux caractéristiques de portance indiquées ci-après.

Par ailleurs, dans le respect des dimensions maximales indiquées ci-dessus, on peut employer :

- des terres appartenant aux groupes A1-b, A2-4 et A2-5, avec matériaux passant au tamis à $0,075$ mm supérieurs à 12 %, après stabilisation au béton ou avec chaux et ciment ;
- des terres appartenant aux groupes A2-6 et A2-7 contenant un pourcentage de fines supérieur à 5 % après stabilisation mixte (avec chaux et ciment) ou uniquement à la chaux.

Peuvent également être considérés adaptés en tant que couche de fond, s'ils sont présents dans le terrain du site :

- Des limons appartenant aux groupes A4 et A5 après stabilisation avec chaux et ciment, ainsi que les argiles des groupes A6 et A7, dotées de niveaux de plasticité relativement faibles ($IP < 25$ %), après stabilisation à la chaux.

Si les résultats des essais CBR réalisés en laboratoire sont significatifs (à savoir pour un matériau de taille inférieure à 20 mm), le sol peut être jugé adéquat pour l'emploi si les valeurs de l'indice portant CBR (énergie AASHO modifiée) ne sont pas inférieures à ce qui suit :

a) pour les fonds constitués de terrains granulaires, climat sec, absence de risque de saturation en eau par infiltration latérale ou par le haut ou par remontée capillaire :

CBR = 20 ($w = w_{opt} \pm 2\%$; sans immersion)

b) pour les fonds constitués de terrains granulaires, si l'une des conditions susmentionnées n'est pas présente :

CBR = 20 ($w = w_{opt} \pm 2\%$; 4 jours d'immersion)

c) pour les fonds constitués de terrains limoneux-argileux ou en présence de drainages insuffisants :

CBR = 20 ($w = w_{opt} \pm 2\%$; saturation complète)

6.5.4) Résultats des analyses

Ci-dessous sont présentées les analyses géotechniques exécutées sur des sédiments prélevés dans les ports de Toulon, Gênes, Livourne, canal Navicelli (Pise – Livourne), Corse – Port de Centuri et Cagliari.

En ce qui concerne la description des points d'échantillonnage, nous renvoyons aux précédents chapitres sur la caractérisation environnementale.

Les essais géotechniques ont été exécutés selon les procédures utilisées en Italie. La différence principale par rapport aux normes françaises est constituée par la quantification du matériau fin.

En France on utilise un tamis avec maille 80 μm , tandis qu'en Italie on emploie un tamis 75 μm .

Les effets concrets de cette différence, dans les cas examinés, ne sont pas significatifs.

L'essai au bleu de méthylène n'a pas été réalisé (VBS). Nous avons pu classer, tout de même, le sédiment selon la norme française, en nous rapportant aux valeurs des limites d'Atterberg.

Afin d'évaluer la possibilité de compacter les sédiments pour la construction de remblais et les conditions de portance dans le domaine des travaux publics, nous avons eu recours à l'essai Proctor modifié (AASHTO mod.) et aux essais pour la détermination de l'indice CBR %.

En ce qui concerne l'essai CBR, au lieu d'exécuter un seul essai sur un échantillon compacté à la densité maximale Proctor mod. nous avons préféré compacter les échantillons Proctor avec différents % d'eau, dans des emporte-pièces CBR en réalisant l'essai CBR sur chaque échantillon.

Nous avons obtenu, ainsi, le graphique « humidité % » ; « densité à l'état sec », qui nous a permis de connaître la valeur d'humidité optimale et la valeur maximale d'épaississement correspondante, ainsi qu'une estimation de la valeur de portance CBR, en fonction du degré d'humidité de la terre.

La valeur maximale CBR a été évaluée par la courbe d'humidité % - CBR %.

L'examen des courbes CBR fait ressortir une évolution parfois irrégulière des courbes d'essai.

Ceci est dû à la présence de fibres et débris de *Posidonia oceanica* dans des sédiments sablonneux ou limoneux-argileux.

En ce qui concerne les essais AASHO (Proctor), nous avons toujours été en mesure d'estimer les valeurs d'humidité optimale - densité maximale, même si les courbes n'étaient pas toujours régulières.

Port de Toulon

Trois échantillons différents, P1, P2 et P3, ont été envoyés par le Port de Toulon.

Les pourcentages de passant aux tamis UNI sont indiqués, pour les trois échantillons, aux tableaux suivants :

P1

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei gran	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	99,3	98,7	97,1	93,8	76,9

La plupart des sédiments sont de diamètre inférieur à 0,075 mm

Le passant à 0,4 mm, à savoir 98,7 %, n'est pas plastique (NP)

L'indice de groupe est 8

Classification CNR UNI 10006 **A4** ; Classification NF P11-300 : **A1**- limons peu plastiques

Du point de vue géotechnique, le sédiment peut être classé comme limon compressible

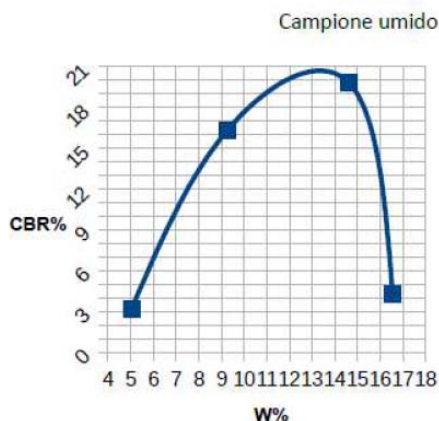
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont médiocres ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est très significatif.

Le gonflement suite à l'action de l'eau est léger à moyen.

La perméabilité est moyenne ou faible.

La densité maximale Proctor modifiée (AASHO mod) est de 17,353 kN ; l'humidité optimale est de 14,5 %



Port de Toulon Point 3

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	99,4	99,0	97,6	94,9	79,5

La plupart des sédiments sont de diamètre inférieur à 0,075 mm

Le passant à 0,4 mm, à savoir 79,5 %, n'est pas plastique (NP)

L'indice de groupe IG est 8

Classification CNR UNI 10006 **A4** ; Classification NF P11-300 : **A1**- limons peu plastiques

Du point de vue géotechnique, le sédiment peut être classé comme limon compressible

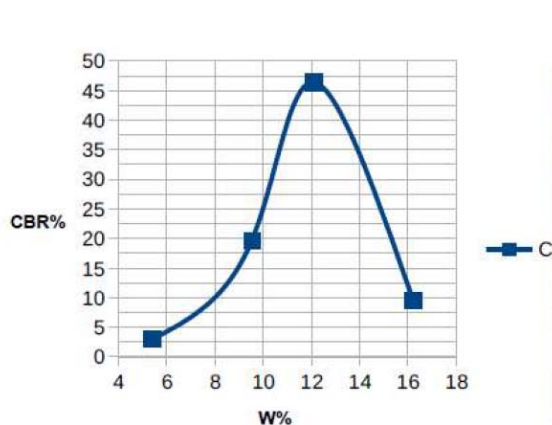
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont médiocres ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est très significatif.

Le gonflement suite à l'action de l'eau est léger à moyen.

La perméabilité est moyenne ou faible.

La densité maximale Proctor modifiée (AASHO mod) est de 17,300 kN ; l'humidité optimale est de 12,10 %



Port de Gênes

Un seul échantillon a été fourni par le Port de Gênes.

Les pourcentages de passant aux tamis UNI sont indiqués au tableau suivant :

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	98,4	96,9	93,5	81,9	18,4

La plupart des sédiments sont de diamètre inférieur à 0,18 mm et supérieur à 0,075mm.

Il s'agit, donc, du point de vue géotechnique, d'un sable fin limoneux

Le passant au tamis à 0,042 mm, à savoir 97,1 % du total, n'est pas plastique (NP)

L'indice de groupe IG est 0

La classification CNR UNI 10006 est **A2-4** sables fins limoneux ; Classification NF P11-300 : **B1**
- Sables silteux

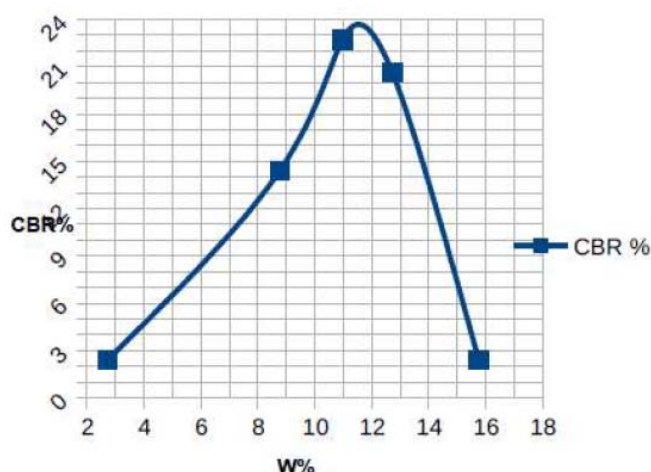
Les qualités portantes, si utilisé comme terrain de fond, sont bonnes;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est très léger.

Le gonflement suite à l'action de l'eau est inexistant

La perméabilité est élevée

La densité maximale Proctor modifiée (AASHO mod) est de 16,450 kN ; l'humidité optimale est de 11,50 %



Canal des Navicelli

3 échantillons ont été fournis par le canal des Navicelli : P1, P2 et P3

Point 1

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	98,0	97,8	96,3	94,1	90,7	88,1	83,3	79,1	75,8

La plupart des sédiments sont de diamètre inférieur à 0,075 mm

Le passant à 0,4 mm, à savoir 83,3 %, possède un indice de plasticité de 12

L'indice de groupe IG est 12

Classification CNR UNI 10006 **A7-5** ; Classification NF P11-300 : **A1**- limons peu plastiques

Du point de vue géotechnique, le sédiment peut être classé comme terrain argileux fortement compressible, moyennement plastique

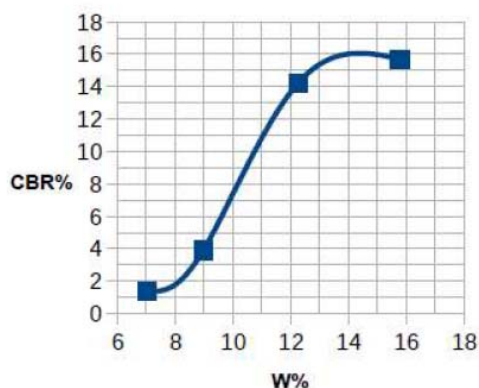
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont mauvaises ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est moyen

Le gonflement suite à l'action de l'eau est élevé

La perméabilité est moyenne ou faible.

La densité maximale Proctor modifiée (AASHO mod) est de 15,685 kN ; l'humidité optimale est de 15,50 %



Canal Navicelli Point 2

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	98,0	95,6	93,4	83,9	52,7	44,5

Plus de 35 % des sédiments sont de diamètre inférieur à 0,075 mm

Le passant à 0,4 mm, à savoir 83,9 %, possède un indice de plasticité de 5

L'indice de groupe IG est 2

Classification CNR UNI 10006 **A4** ; Classification NF P11-300 : **A1**- limons peu plastiques

Du point de vue géotechnique, le sédiment peut être classé comme limon sablonneux peu compressible

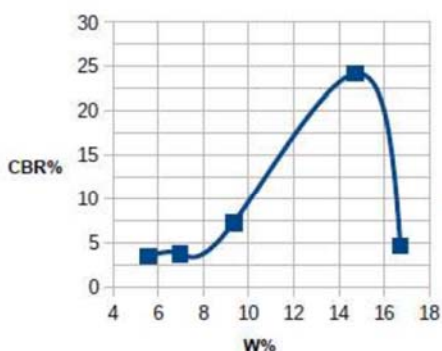
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont médiocres ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est très significatif.

Le gonflement suite à l'action de l'eau est léger à moyen.

La perméabilité est moyenne ou faible.

La densité maximale Proctor modifiée (AASHTO mod) est de 18,385 kN ; l'humidité optimale est de 14,70 %



Campione asciutto in grumi



Canal Navicelli Point 3

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	98,9	98,2	97,3	95,9

La plupart des sédiments sont de diamètre inférieur à 0,075 mm

Le passant à 0,4 mm, à savoir 98,2 %, possède un indice de plasticité de 15

L'indice de groupe IG est 12

Classification CNR UNI 10006 **A7-5** ; Classification NF P11-300 : **A2**- Limon

Du point de vue géotechnique, le sédiment peut être classé comme terrain argileux fortement compressible, moyennement plastique

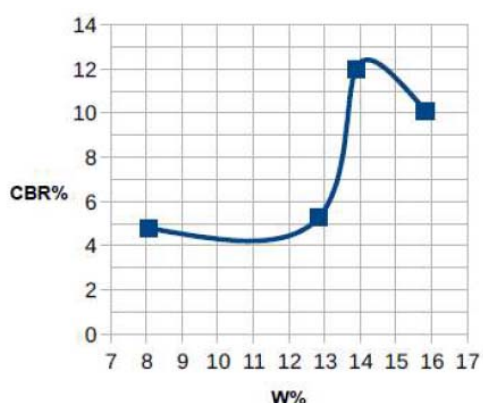
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont mauvaises

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est moyen

Le gonflement suite à l'action de l'eau est élevé

La perméabilité est moyenne ou faible

La densité maximale Proctor modifiée est 16,400 kN et l'humidité optimale est de 13,80 %



campione asciutto in grumi

Corse - Port de Centuri

Le port corse de Centuri a fourni 3 échantillons

Corse 1 :

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	98,5	96,2	91,6	64,2	22,9	6,0

La plupart des sédiments sont de diamètre inférieur à 2 mm et supérieur à 0,075 mm.

Le passant à 0,4 mm, à savoir 64,2 %, n'est pas plastique (NP)

L'indice de groupe est 0

Classification CNR UNI 10006 **A3** ; Classification NF P11-300 : **D1** - sable

Du point de vue géotechnique, le sédiment peut être classé comme sable fin

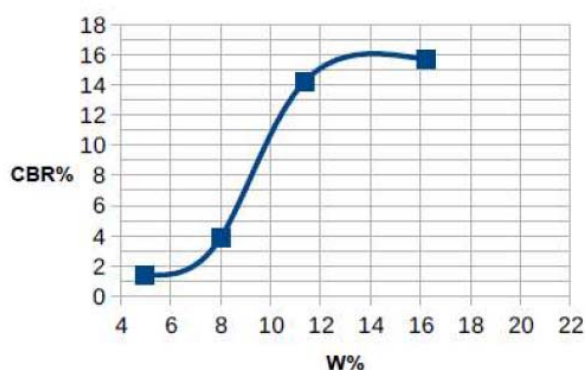
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont bonnes ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est léger ou inexistant

Le gonflement suite à l'action de l'eau est inexistant

La perméabilité est élevée

La densité maximale Proctor modifiée est de 13,30 kN et l'humidité optimale est de 17,00 %



Campione sciolto con fibre di Posidonia

Corse 2

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,4	91,2	83,2	74,5	48,2	17,7	4,8

La plupart des sédiments sont de diamètre inférieur à 2 mm et supérieur à 0,075 mm.

Le passant à 0,4 mm, à savoir 48,2 %, n'est pas plastique (NP)

L'indice de groupe IG est 0

Classification CNR UNI 10006 **A1-b** ; Classification NF P11-300 : **D1**- sable

Du point de vue géotechnique, le sable peut être classé comme sable moyen, avec un pourcentage de gravier d'environ 17 %.

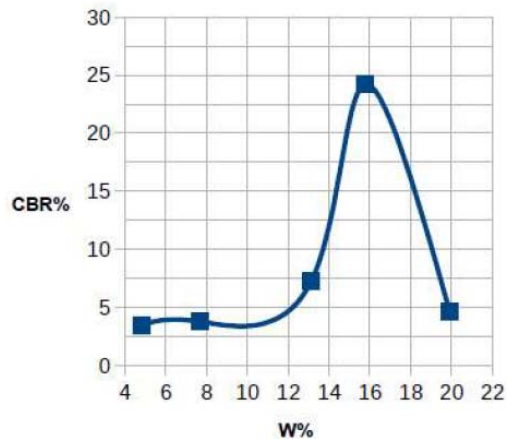
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont excellentes à bonnes ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est léger ou inexistant.

Le gonflement suite à l'action de l'eau est inexistant

La perméabilité est élevée

La densité maximale Proctor modifiée est de 13,55 kN et l'humidité optimale est de 16,00 %



Con fibre e fusti di Posidonia

Corse 3

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,8	97,4	92,5	82,6	44,2	13,0	3,4

La plupart des sédiments sont de diamètre inférieur à 2 mm et supérieur à 0,075 mm.

Le passant à 0,4 mm, à savoir 44,2 %, n'est pas plastique (NP)

L'indice de groupe IG est 0

Classification CNR UNI 10006 **A1-b** ; Classification NF P11-300 : **D1**- sable

Du point de vue géotechnique, le sable peut être classé comme sable moyen, avec un pourcentage de gravier d'environ 7 %.

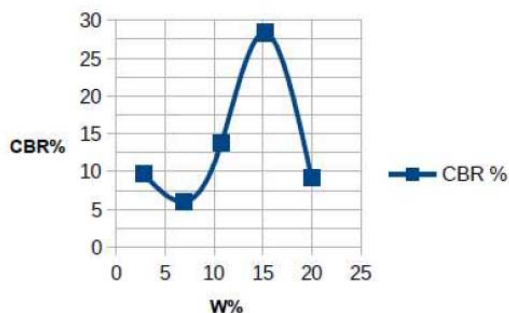
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont excellentes à bonnes ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est léger ou inexistant

Le gonflement suite à l'action de l'eau est inexistant

La perméabilité est élevée

La densité maximale Proctor modifiée est de 14,95 kN et l'humidité optimale est de 14,30 %



Con foglie e fusti di Posidonia

Port de Livourne – Cuve de remplissage

Nous avons reçu 3 échantillons

Port de Livourne 1

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,1	95,7	93,3	91,2	89,2	86,0	80,5	48,6

Environ la moitié des sédiments (48,6 %) est de diamètre inférieur à 0,075 mm

Le passant à 0,4 mm, à savoir 86 %, n'est pas plastique (NP)

L'indice de groupe est 3

Classification CNR UNI 10006 A4 ; Classification NF P11-300 : A1- limons peu plastiques

Du point de vue géotechnique, le sédiment peut être classé comme limon peu compressible

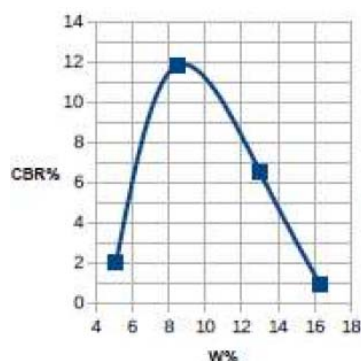
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont médiocres ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est très significatif

Le gonflement suite à l'action de l'eau est léger ou moyen

La perméabilité est moyenne ou faible

La densité maximale Proctor modifiée est de 18,450 kN et l'humidité optimale est de 12,80 %



Port de Livourne 2

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	90,5	86,7	82,5	77,6	69,6	56,6	45,3	30,4	20,1	15,8

Le sédiment est composé à 43,4 % de gravier, à 40,8 % de sable et à 15,8 % de fines.

Le passant à 0,4 mm, à savoir 30,4 %, n'est pas plastique (NP)

L'indice de groupe est 0

Classification CNR UNI 10006 A1-b ; Classification NF P11-300 : B5 – Sables et graviers très silteux

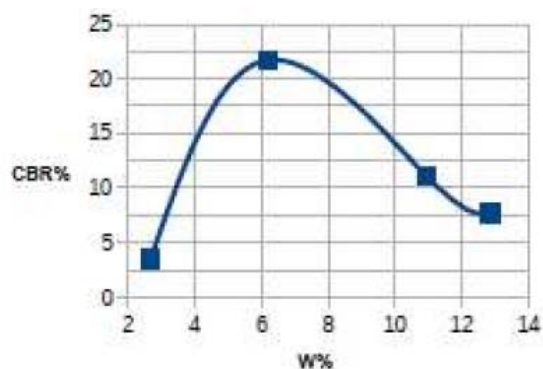
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont excellentes à bonnes ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est léger ou inexistant

Le gonflement suite à l'action de l'eau est inexistant

La perméabilité est élevée

La densité maximale Proctor modifiée est de 18,400 kN et l'humidité optimale est de 11,30 %



Port de Livourne 3

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	97,4	95,9	94,8	92,0	89,2	86,3	82,4	73,9	50,4

Environ la moitié des sédiments (50,4 %) est de diamètre inférieur à 0,075 mm

Le passant à 0,4 mm, à savoir 82,4 %, n'est pas plastique (NP)

L'indice de groupe est 3

Classification CNR UNI 10006 **A4** ; Classification NF P11-300 : **A1**- limons peu plastiques

Du point de vue géotechnique, le sédiment peut être classé comme limon peu compressible

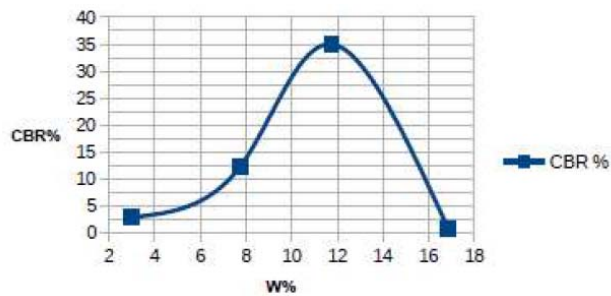
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont médiocres ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est très significatif

Le gonflement suite à l'action de l'eau est léger ou moyen

La perméabilité est moyenne ou faible

La densité maximale Proctor modifiée est de 19,020 kN et l'humidité optimale est de 9,50 %



Port de Cagliari - Cuve de remplissage

Port de Cagliari 1

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	96,4	96,4	96,1	95,5	94,5	92,2	89,2	79,6	50,4	28,7

Le sédiment est composé à 7,8 % gravier, à 12,6 % de sable grossier, à 48 % de sable moyen et fin et à 28,7 % de fines.

Il s'agit, donc, du point de vue géotechnique, d'un sable fin limoneux

Le passant au tamis à 0,042 mm, à savoir 79,5 % du total, n'est pas plastique (NP)

L'indice de groupe est 0

Classification CNR UNI 10006 **A2-4**; Classification NF P11-300 : **B5** – Sables et graviers très silteux

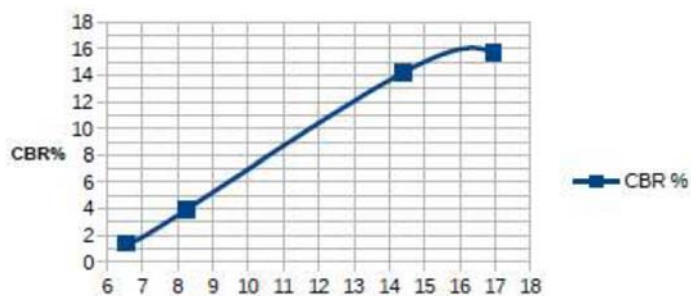
Les qualités portantes, si utilisé comme terrain de fond, sont bonnes ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est léger

Le gonflement suite à l'action de l'eau est inexistant

La perméabilité est élevée

La densité maximale Proctor modifiée est de 16,30 kN et l'humidité optimale est de 15,00 %



Port de Cagliari 2

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,7	98,4	97,7	96,3	94,3	85,1	49,4	19,7

Le sédiment au tamis de 2 mm est égal à 96,3 %, le passant au tamis 0,075 mm est inférieur à 20 % : par conséquent, le sédiment est, de façon prédominante, sablonneux-limoneux.

Le passant à 0,4 mm, à savoir 85,1 %, n'est pas plastique (NP)

L'indice de groupe est 0

Classification CNR UNI 10006 **A2-4** ; Classification NF P11-300 : **B5** – Sables et graviers très silteux

Du point de vue géotechnique, le sédiment est essentiellement un sable limoneux

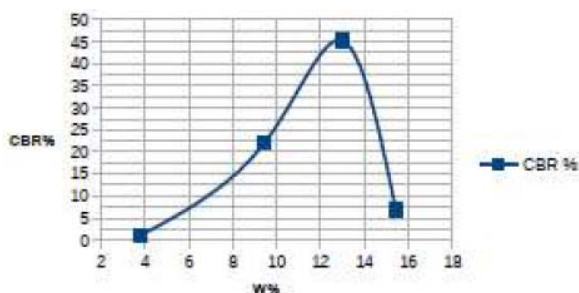
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont bonnes ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est moyen

Le gonflement suite à l'action de l'eau est léger ou inexistant

La perméabilité est élevée

La densité maximale Proctor modifiée est de 16,900 kN et l'humidité optimale est de 13,2 %



Port de Cagliari 3

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	99,4	98,6	97,4	91,7	62,9	38,2

Le passant au tamis 0,075 mm est de 38,2 %

Le passant au tamis 2 mm est de 98,6 %

Le passant à 0,4 mm, à savoir 82,4 %, n'est pas plastique (NP)

L'indice de groupe est 1

Classification CNR UNI 10006 **A4** ; Classification NF P11-300 : **A1**- limons peu plastiques

Du point de vue géotechnique, le sédiment peut être classé comme limon peu compressible

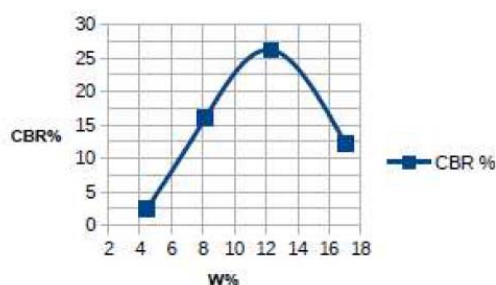
Les qualités portantes, en l'absence de gel, si utilisé comme terrain de fond, sont médiocres ;

L'effet du gel sur les qualités portantes, si utilisé comme fond, est très significatif

Le gonflement suite à l'action de l'eau est léger ou moyen

La perméabilité est moyenne ou faible

La densité maximale Proctor modifiée est de 15,700 kN et l'humidité optimale est de 13,50 %



UBICAZIONE	NF P11 - 300	CNR UNI 10006	Giudizio CNR UNI 10006	Classificabili come utilizzabili per rilevati e couche de forme NF P11- 300
PORTO DI TOLONE 1	A1	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO DI TOLONE 2	A1	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO DI TOLONE 3	A1	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO DI GENOVA	B1	A2.4	BUONO	SI
CANALE NAVICELLI PISA-LIVORNO 1	A1	A7.5	SCADENTE	NO
CANALE NAVICELLI PISA-LIVORNO 2	A1	A4	MEDIOCRE	NO
CANALE NAVICELLI PISA-LIVORNO 3	A2	A7.5	SCADENTE	NO
CORSICA 1	D1	A3	BUONO	SI
CORSICA 2	D1	A1-b	BUONO/OTTIMO	SI
CORSICA 3	D1	A1-b	BUONO/OTTIMO	SI
PORTO LIVORNO 1	A1 h	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO LIVORNO 2	B5 h	A1-b	BUONO/OTTIMO	SI
PORTO LIVORNO 3	A1	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO CANALE CAGLIARI 1	B5	A2.4	BUONO	SI
PORTO CANALE CAGLIARI 2	B5	A2.4	BUONO	SI
PORTO CANALE CAGLIARI 3	A1	A4	MEDIOCRE	NO

Classés comme
 matériau utilisables
 pour la construction
 de remblais et de
 couches de forme

NF P11 - 300

6.5.5) Géotechnique – conclusions

Les données des analyses géotechniques figurent dans les quatre tableaux suivants.

LE TABLEAU 1 indique, pour chaque échantillon :

Paramètres indicatifs de la granulométrie de l'échantillon :

- fraction passant au tamis avec maille de 2mm
- fraction passant au tamis avec maille de 0,4 mm
- fraction passant au tamis avec maille de 0,075 mm

Paramètres indicatifs de la susceptibilité à l'eau

Seuil de liquidité (SL)

Limite de plasticité (LP)

Indice de plasticité (IP)

Classification géotechnique des sédiments

Classification HRB - AASHO M 145-49 – CNR UNI 10006

Classification **NF-P 11 300**

Compactabilité et portance

Indice de groupe (IG)

Densité maximale et humidité optimale Proctor modifié

Indice CBR % maximal par rapport à l'humidité de compactage.

Le **TABLEAU 2** contient les valeurs relatives aux essais Proctor modifié et CBR %, exécutées sur chacun des échantillons ; la valeur de densité sèche maximale Proctor modifié et de l'Humidité optimale % de compactage.

Les tableaux 3 à 8 contiennent les graphiques Humidité % - CBR % qui ont permis d'estimer la valeur CBR maximale.

Vous trouverez en annexe les certificats d'essai délivrés par le Laboratorio Geotecnico della Città Metropolitana di Cagliari (Laboratoire géotechnique de la ville métropolitaine de Cagliari).

Les données suivantes sont fournies pour chaque échantillon :

- La courbe granulométrique avec passants au tamis
- Les valeurs de SL LP IP IG
- Les courbes des essais CBR selon les différents degrés d'humidité
- Le certificat de l'essai Proctor mod. (AASHO modifiée)

TABLEAU 4

Ce tableau contient le tableau synoptique de la classification française et italienne avec les avis d'utilisabilité des terres pour les travaux publics.

N.B. Ces différents éléments sont donnés dans la contribution intégrale italienne présentée en suivant dans la partie VIII.

VII. PRODOTTO FRANCESE INTEGRALE

SOMMARIO :

7.1)	PROCEDURA FRANCESE DI CARATTERIZZAZIONE PRELIMINARE	136
7.1.1)	Valutazione delle caratteristiche di pericolo dei sedimenti associate al loro contenuto di sostanze pericolose	136
7.1.2)	Valutazione della caratteristica di pericolo HP14 «ecotossico»	140
7.1.3)	Caratterizzazione della frazione lisciviabile dei sedimenti (Saggio di conformità EN 12457-2)	159
7.1.4)	Caratterizzazione del comportamento alla percolazione - Prova di conformità alla norma CEN/TS 14405	160
7.2)	CARATTERIZZAZIONE COMPLEMENTARE DELL'INFLUENZA DEL PH IN CONDIZIONI STAZIONARIE SUL COMPORTAMENTO ALLA LISCIVIAZIONE SECONDO LA NORMA EN 14 429	161
7.2.1)	Principio dell'analisi	162
7.2.2)	Risultati e commenti	162

Contesto dello studio :

In materia di analisi della qualità ambientale dei sedimenti ai fini della valutazione delle possibili condizioni di gestione, la normativa francese e quella italiana si basano su metodologie di caratterizzazione preliminare diverse.

Il presente resoconto illustra i risultati dell'attuazione delle procedure di caratterizzazione applicabili in Francia nell'ambito dell'individuazione delle condizioni di gestione dei sedimenti di dragaggio.

Le analisi e i saggi sono stati effettuati su campioni di sedimenti provenienti da sei luoghi diversi della zona Marittimo. Nella maggior parte di questi siti sono stati eseguiti tre prelievi distinti. Complessivamente sono stati prelevati 16 campioni di sedimenti da caratterizzare.

Due dei siti di prelievo sono localizzati in Francia (Centuri in Corsica e Tolone nel dipartimento del Var) e quattro in Italia (Cagliari, Pisa, Genova e Livorno).

7.1) PROCEDURA FRANCESE DI CARATTERIZZAZIONE PRELIMINARE

7.1.1) Valutazione delle caratteristiche di pericolo dei sedimenti associate al loro contenuto di sostanze pericolose

➤ Procedura

Per i sedimenti gestiti a terra, la Francia applica a priori la regola generale di definizione del carattere pericoloso o non pericoloso dei rifiuti, derivante dalla trasposizione della Direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 novembre 2008 nel diritto francese.

In effetti, trattandosi di una voce specchio («*entrée miroir*», termine utilizzato per definire un rifiuto presente sotto due possibili forme nella lista europea dei rifiuti, una a carattere pericoloso, l'altra a carattere non pericoloso), la verifica della pericolosità del rifiuto deve basarsi sull'analisi delle 15 caratteristiche di pericolo da HP1 a HP15, descritte nell'allegato III della Direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 novembre 2008. Tra le 15 caratteristiche di pericolo, alcune riguardano in particolare i rifiuti che comportano rischi specifici, come ad esempio: esplosivo (HP1), comburente (HP2), infiammabile (HP3) o ancora infettivo (HP9) o di liberazione di gas a tossicità acuta in presenza di acqua o di un acido (HP12). In molti casi, queste caratteristiche possono essere considerate non pertinenti.

L'INERIS e il Cerema hanno lavorato congiuntamente all'elaborazione di alcune soglie per i parametri misurati di norma nei sedimenti. Tali soglie permetterebbero di garantire l'innocuità dei rifiuti seguendo una procedura di valutazione del pericolo semplificata rispetto quella classica (per le caratteristiche HP4, HP5, HP6, HP7, HP8, HP10, HP11 et HP13).

➤ Valori di riferimento

I lavori di cui sopra hanno portato ad adottare i seguenti valori di riferimento come soglie per la classificazione dei parametri considerati:

	Proposition de seuils (%)
Arsenic	0,0330
Cadmium	0,0530
Chrome VI	0,0250
Cuivre	0,4000
Mercure	0,0500
Nickel	0,0130
Plomb	0,0510 ⁽¹⁾
Zinc	0,7230
PCB 28	0,0050 pour la somme des 7 congénères
PCB 52	
PCB 101	
PCB 118	
PCB 138	
PCB 153	
PCB 180	
Naphtalène	1,0000
Acénaphthylène	0,0500
Phénanthrène	5,0000
Fluoranthène	5,0000
Benzo(a)anthracène	0,1000
Chrysène	0,1000
Benzo(b)fluoranthène	0,1000
Benzo(k)fluoranthène	0,1000
Benzo(a)pyrène	0,1000
Dibenzo(a,h)anthracène	0,1000
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	1,0000
Tributylétain	0,3000

Tabella 21 - Valori di riferimento per la valutazione del pericolo dei sedimenti rispetto alle caratteristiche HP4, HP5, HP6, HP7, HP8, HP10, HP11, HP13

➤ **Applicazione della procedura**

Per ciascuno dei sei sedimenti, l'analisi dei parametri è stata realizzata secondo norme specifiche.

I riferimenti normativi sono indicati nella seguente tabella.

Paramètres	Méthode d'analyse
Matière sèche	NF EN 12880
Refus pondéral à 2 mm	NF ISO 11464
Préparation physico-chimique (séchage à 40°C)	NF ISO 11464
Minéralisation Eau Régale - Bloc chauffant après p	NF EN 13346 Méthode B
Arsenic (As)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Cadmium (Cd)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Chrome (Cr)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Cuivre (Cu)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Nickel (Ni)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Plomb (Pb)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Zinc (Zn)	NF EN ISO 11885 - NF EN 13346 Méthode B
Mercuré (Hg)	NF EN 13346 Méthode B (Sol) - NF ISO 16772 (Sol) - Adaptée de NF ISO 16772 (Boue, Sédiments)
Naphtalène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Acénaphthylène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Phénanthrène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Fluoranthène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Benzo(a)-anthracène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Chrysène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Benzo(b)fluoranthène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Benzo(k)fluoranthène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Benzo(a)pyrène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Dibenzo(a,h)anthracène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Benzo(ghi)Pérylène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Indeno (1,2,3-cd) Pyrène	NF ISO 18287 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 28	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 52	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 101	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 118	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 138	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 153	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
PCB 180	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
SOMME PCB (7)	NF EN 16167 (Sols) - XP X 33-012 (boue, sédiment)
Tributylétain cation (TBT)	XP T 90-250

Tabella 22 - Norme per l'analisi chimica dei sedimenti

I risultati delle analisi sono riassunti nella tabella 3 riportata qui sotto:

Tabella 23 - Risultati della caratterizzazione chimica dei sedimenti rispetto ai valori di riferimento ai fini della valutazione del pericolo dei sedimenti per le caratteristiche HP4, HP5, HP6, HP7, HP8, HP10, HP11, HP13

Paramètres	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Naphtalène	Acénaphthylène	Phénanthrène	Fluoranthène	Benzo(a)-anthracène	Chrysène	Benzo(b)fluoranthène	Benzo(k)fluoranthène	Benzo(a)pyrène	DiBenzo(a,h)anthracène	Benzo(ghi)Pérylène	Indeno (1,2,3-cd)Pyrène	SOMME PCB (7)	TBT	
Centuri 1	4,43	<0,40	159	51,2	<0,10	125	25,6	83,6	0,0064	0,0041	0,016	0,041	0,02	0,013	0,035	0,011	0,021	0,0044	0,017	0,017	0,0011	0,134	
Centuri 2	5,86	<0,40	296	77,3	<0,10	255	41,6	186	0,015	0,0039	0,01	0,016	0,0068	0,0078	0,013	0,0058	0,0089	<0,0025	0,0055	0,0064	<0,0012	0,107	
Centuri 3	5,26	<0,40	155	26,4	<0,10	118	14,8	74	0,0075	<0,0025	0,0033	0,011	0,0053	0,0064	0,0093	0,0038	0,0064	<0,0025	0,004	0,0051	<0,001	0,034	
Centuri M									0,0095	0,0038	0,0093	0,017	0,0081	0,0085	0,013	0,0053	0,0089	0,0029	0,0061	0,0073	<0,001		
Toulon1	7,72	<0,40	9,55	15	0,34	8,71	41,1	52,2	0,076	0,076	0,56	1,8	1	0,96	2,4	0,53	2	0,099	0,56	0,53	<0,001	0,005	
Toulon2	8,61	<0,40	10,8	16,1	0,45	9,82	46,1	54,3	0,082	0,08	0,55	1,7	0,99	0,94	2,3	0,85	1,9	0,096	0,58	0,54	<0,001	0,005	
Toulon3	7,57	<0,40	9,85	14,1	0,33	9,21	43,6	50,9	0,079	0,076	0,55	1,8	1,1	1,2	2,2	0,72	2,1	0,12	1,4	1,5	<0,001	0,005	
Toulon M	7,94	<0,40	10,9	14	0,33	9,2	45,7	57,9	0,037	0,22	0,46	1,3	0,72	0,72	1,5	0,49	1,3	0,19	0,85	0,91	0,024	0,005	
Cagliari1	13,7	1,81	14,6	48,8	0,41	9,89	200	227	0,02	0,029	0,094	0,27	0,18	0,2	0,37	0,14	0,28	0,073	0,27	0,35	0,013	0,029	
Cagliari2	18,5	2,31	10,1	47,3	0,31	7,15	157	344	0,02	0,042	0,14	0,45	0,28	0,22	0,48	0,19	0,36	0,097	0,32	0,3	0,024	0,009	
Cagliari3	22,7	2,5	8,87	41,5	0,27	6,23	140	361	0,016	0,042	0,12	0,45	0,32	0,26	0,56	0,22	0,41	0,12	0,34	0,35	0,0077	0,005	
Cagliari M	29	2,52	14,5	63,5	0,9	9,64	175	358	0,014	0,039	0,12	0,44	0,28	0,21	0,52	0,2	0,39	0,091	0,35	0,35	0,012	0,015	
Pize1	7,03	1,07	63	44,6	0,29	60,1	23,5	120	0,0067	0,011	0,037	0,25	0,1	0,11	0,11	0,043	0,088	0,012	0,041	0,039	0,013	0,044	
Pize2	7,76	2,42	80,1	63,7	0,3	68,4	44,4	152	0,049	0,18	0,8	5,9	2,8	2,7	2,3	1,2	2,4	0,17	1,3	1,3	0,056	0,071	
Pize M	8,14	8,26	118	68	0,27	69,9	67,4	249	0,1	0,081	0,45	2,5	1,2	1,2	1,1	0,43	1,2	0,072	0,35	0,36	0,059	0,415	
Pize3	7,53	9,96	133	65,4	0,21	76,2	69,9	272	0,028	0,034	0,28	0,91	0,46	0,46	0,33	0,18	0,28	0,035	0,14	0,16	0,062	0,464	
Gène	9,15	<0,40	50,5	25,8	0,3	36,5	50,6	72,4	0,028	0,013	0,079	0,28	0,067	0,078	0,19	0,073	0,12	0,049	0,12	0,12	0,025	0,042	
Gène	9,15	<0,40	50,5	25,8	0,3	36,5	50,6	72,4	0,028	0,013	0,079	0,28	0,067	0,078	0,19	0,073	0,12	0,049	0,12	0,12	0,025	0,042	
Livourne1	14	<0,40	38,3	15,2	<0,10	36,2	13,9	52,9	0,015	0,032	0,04	0,11	0,065	0,069	0,13	0,065	0,11	0,027	0,094	0,079	<0,001	0,005	
Livourne2	13,4	<0,42	55,3	34,5	<0,10	54,5	19,7	87,2	0,034	0,039	0,14	0,53	0,23	0,24	0,35	0,17	0,19	0,035	0,11	0,084	<0,001	0,010	
Livourne3	15,4	<0,41	42	32,1	<0,10	39,8	16,3	64,6	0,016	0,034	0,082	0,2	0,12	0,12	0,22	0,11	0,19	0,039	0,14	0,13	<0,001	0,005	
LivourneM									0,017	0,038	0,06	0,19	0,12	0,12	0,25	0,12	0,18	0,04	0,14	0,13	<0,001		
Seuils Danger Substances	330	530	250	4000	500	130	510	7230	10000	500	50000	50000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	50	3000

La presente tabella mostra che solo uno dei tre campioni prelevati dal sito di Centuri, in Corsica, il campione Centuri 2, presenta un contenuto di metalli (nichel e cromo) al di sopra dei valori di riferimento definiti nel quadro della valutazione semplificata del pericolo dei sedimenti, rispetto alle caratteristiche di pericolo da HP4 a HP8, HP10, HP11 e HP13.

Per questo campione, il superamento della soglia consentita per il cromo è da considerare soltanto se il cromo contenuto nel sedimento lo è sempre nella sua forma esavalente, il che non è verosimile nel caso di sedimenti prelevati in ambiente naturale e non in zona di scarico industriale o di deposito specifico.

Per via del contenuto di nichel, il campione Centuri 2 potrebbe avere un carattere pericoloso. Secondo il metodo di valutazione semplificato, gli altri prelievi non rivelano alcun dato sospetto dal punto di vista dei contenuti.

7.1.2) Valutazione della caratteristica di pericolo HP14 «ecotossico»

La Francia ha adottato un approccio nazionale per la valutazione della caratteristica di pericolo «ecotossico» dei sedimenti, senza però tradurlo in un testo normativo.

Di fatto, nel 2009 il gruppo di lavoro sui sedimenti del Ministero dell'Ambiente francese allora in carica ha proposto una procedura sperimentale applicabile specificamente ai sedimenti (marini o fluviali). Tale procedura è rappresentata nel seguente diagramma.

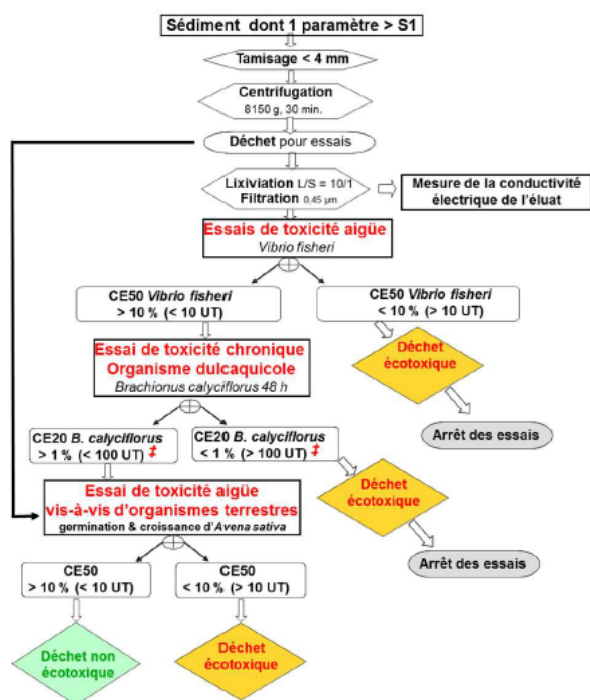


Figura 10 - Protocollo di valutazione della caratteristica di pericolo HP14 per i sedimenti (MEEDDM, 2009)

➤ **Caratterizzazione preliminare**

La valutazione del pericolo dei sedimenti rispetto alle loro caratteristiche ecotossicologiche segue dunque un approccio graduale, con una tappa preliminare che verte sull'esame del contenuto di certi elementi minerali e composti organici presenti nei sedimenti. Sarà necessario proseguire con la valutazione soltanto nel caso in cui i risultati delle analisi preliminari mostrino parametri superiori ai seguenti valori:

Polluants	Valeur seuil S1 ²²
Arsenic	30
Cadmium	2
Chrome	150
Cuivre	100
Mercure	0,001
Nickel	50
Plomb	100
Zinc	300
HAP : \sum des 16 congénères	22,8
PCBs : \sum des 7 congénères	0,680
Tributylétain ²³	0,1

Tabella 24 - Valori di riferimento S1 per la valutazione preliminare del pericolo HP14

Qualora vengano riscontrati uno o più valori che superano le soglie consentite, sarà necessario eseguire le analisi tossicologiche sul rifiuto, dopo averlo sottoposto a centrifuga. Saranno effettuati due test sull'eluato ottenuto dalla lisciviazione e uno sulla matrice solida.

Nel caso dei 6 sedimenti presi in esame, i risultati delle analisi sono confrontati ai valori di riferimento elencati nella tabella qui di seguito (tabella 5):

Paramètres	As (mg/kg MS)	Cd (mg/kg MS)	Cr (mg/kg MS)	Cu (mg/kg MS)	Hg (mg/kg MS)	Ni (mg/kg MS)	Pb (mg/kg MS)	Zn (mg/kg MS)	Somme des HAP (16) (mg/kg MS)	SOMME PCB (7) (mg/kg MS)	Tributylétain (mg/kg MS)
Corse 1	4,43	<0,40	159	51,2	<0,10	125	25,6	83,6	0,26	0,0011	0,134
Corse 2	5,86	<0,40	296	77,3	<0,10	255	41,6	186	0,13	<0,0012	0,107
Corse 3	5,26	<0,40	155	26,4	<0,10	118	14,8	74	0,078	<0,001	0,034
Toulon1	7,72	<0,40	9,55	15	0,34	8,71	41,1	52,2	13	<0,001	<0,005
Toulon2	8,61	<0,40	10,8	16,1	0,45	9,82	46,1	54,3	12	<0,001	<0,005
Toulon3	7,57	<0,40	9,85	14,1	0,33	9,21	43,6	50,9	15	<0,001	<0,005
Cagliari1	13,7	1,81	14,6	48,8	0,41	9,89	200	227	2,6	0,013	0,029
Cagliari2	18,5	2,31	10,1	47,3	0,31	7,15	157	344	3,4	0,024	0,009
Cagliari3	22,7	2,5	8,87	41,5	0,27	6,23	140	361	3,7	0,0077	<0,005
Pize 1	7,03	1,07	63	44,6	0,29	60,1	23,5	120	1,1	0,013	0,044
Pize 2	7,76	2,42	80,1	63,7	0,3	68,4	44,4	152	30	0,056	0,071
Pize 3	7,53	9,96	133	65,4	0,21	76,2	69,9	272	4,5	0,062	0,463
Gène	9,15	<0,40	50,5	25,8	0,3	36,5	50,6	72,4	1,5	0,025	0,041
Livourne1	14	<0,40	38,3	15,2	<0,10	36,2	13,9	52,9	0,98	<0,001	<0,005
Livourne2	13,4	<0,42	55,3	34,5	<0,10	54,5	19,7	87,2	2,9	<0,001	0,010
Livourne3	15,4	<0,41	42	32,1	<0,10	39,8	16,3	64,6	1,6	<0,001	<0,005
Seuils S1	30	2	150	100	0,001	50	100	300	22,8	0,68	0,1

Tabella 25 - Risultati dell'analisi della composizione dei sedimenti confrontati con i valori di riferimento S1

La tabella mostra che ognuno dei sedimenti analizzati presenta almeno un parametro al di sopra della soglia S1. Di conseguenza, risulta opportuno eseguire la caratterizzazione ecotossicologica su ciascun sedimento.

➤ Caratterizzazione ecotossicologica dei sedimenti

Procedura: Nell'ambito di questo studio, i seguenti test hanno permesso di valutare la tossicità acuta e cronica degli eluiti dei sedimenti nei confronti degli organismi acquatici:

- saggio di tossicità acuta di inibizione della luminescenza del batterio *Vibrio fischeri* (NF EN ISO 11348-2) in 15 e 30 minuti;
- saggio di tossicità cronica di inibizione dell'attività riproduttiva del rotifero *Brachionus calyciflorus* (NF ISO 20666) in 48 ore;
- saggio di tossicità cronica di inibizione dell'attività riproduttiva di *Ceriodaphnia dubia* (NF ISO 20665) in 7 giorni.

Il seguente test, con lo scopo di caratterizzare il grado di tossicità dei sedimenti nei confronti di organismi terrestri, è stato realizzato direttamente sui sedimenti sottoposti a centrifuga:

- saggio di tossicità acuta di inibizione della germinazione e della crescita di *Avena sativa* (NF ISO11269-2) in vaso, su 21 giorni.

I test sono stati realizzati in presenza delle concentrazioni massime consentite per la classificazione dei sedimenti pericolosi (HP14), ovvero 10% per i saggi di tossicità acuta e 1% per quelli di tossicità cronica. Ciò significa che, in conformità con il protocollo adottato, gli organismi sono stati esposti a una sola diluizione dell'eluito nell'ambiente di saggio (del 10% per il saggio di tossicità acuta e dell'1% per quello di tossicità cronica), e alla sola diluizione del 10% del sedimento centrifugato per il saggio di tossicità acuta sui vegetali.

➤ Selezione dei sedimenti oggetto dei test

La selezione dei sotto-campioni oggetto dei test ecotossicologici è stata effettuata al termine del Comitato Tecnico tenutosi il 20 settembre 2017 a La Seyne sur Mer, che ha condotto a stabilire quanto segue:

- **Sedimento di Centuri:** il punto di prelievo n. 1 è il più adeguato (considerata la granulometria e il contenuto di poseidonie).
- **Sedimento di Tolone:** il sedimento è omogeneo ed è possibile costituire un campione medio.
- **Sedimento di Cagliari:** il sedimento è omogeneo ed è possibile costituire un campione medio nella zona più accessibile.
- **Sedimento di Livorno:** il sedimento è omogeneo ed è possibile costituire un campione medio.

Nel caso dei sedimenti per i quali non è previsto alcun pretrattamento, né il recupero:

- **Sedimento di Navicelli:** il punto di prelievo n. 1 è il più adeguato.
- **Sedimento di Genova:** questo sedimento è stato oggetto di un solo punto di prelievo.

➤ Valori di riferimento per la caratteristica di pericolo HP14

La procedura si basa sulla realizzazione di una batteria di saggi ecotossicologici (acuti e cronici) con organismi acquatici e terrestri di vari livelli trofici, in conformità con il protocollo in vigore in Francia, descritto nella sezione dedicata ai sedimenti del rapporto INERIS-DRC-15-149793-06416A⁵. I valori di riferimento che permettono di distinguere un sedimento pericoloso da uno non pericoloso sono:

⁵ Rapporto INERIS-DRC-15-149793-06416A del 04/02/2016 "*Classification réglementaire des déchets - Guide d'application pour la caractérisation de la dangerosité*" (Classificazione regolamentare dei rifiuti - Guida applicativa per la caratterizzazione del pericolo), disponibile online.

- ✓ per i saggi di tossicità acuta (organismi acquatici o terrestri) il valore di riferimento è $CE_{50} \leq 10\%$, ovvero il sedimento è da considerare pericoloso se la concentrazione che provoca il 50 % d'inibizione con uno dei saggi di tossicità acuta è uguale o minore del 10%. *Quindi, dal momento che il saggio è realizzato in presenza di una concentrazione massima del 10%, il sedimento è definito pericoloso se l'inibizione osservata è uguale o maggiore del 50%.*
- ✓ per i saggi di tossicità cronica (organismi acquatici): il valore di riferimento è $CE_{20} \leq 1\%$, ovvero il sedimento è da considerare pericoloso se la concentrazione che provoca il 20% d'inibizione con uno dei saggi di tossicità cronica è uguale o minore del 1%. *Quindi, dal momento che il saggio è realizzato in presenza di una concentrazione massima dell'1%, il sedimento è definito pericoloso se l'inibizione osservata è uguale o maggiore del 20%.*

I risultati ottenuti con questa batteria di biosaggi permettono di caratterizzare un sedimento rispetto alla caratteristica di pericolo HP14, posto che il campione ricevuto in laboratorio sia rappresentativo del deposito di sedimenti.

Si noti che tutti i risultati della batteria di saggi devono essere presi in considerazione. Ciò significa che una sola risposta positiva ("tossica"), per uno solo degli organismi, è sufficiente perché il sedimento sia qualificato come pericoloso.

➤ **Applicazione della procedura**

I campioni di sedimenti sono stati conservati in cella frigorifera a +4°C.

I biosaggi sono stati effettuati a partire da sotto-campioni dei campioni primari omogeneizzati.

Una prima serie di saggi (saggio di tossicità acuta per *V. Fischeri*, saggio di tossicità cronica per *B. calyciflorus* su eluito e saggi vegetali sui sedimenti sottoposti a centrifuga) è stata realizzata nel corso della settimana del 10 ottobre 2017. Per confermare i risultati di tossicità cronica ottenuti, i biosaggi di tossicità cronica con *B. calyciflorus* e *C. dubia* su eluito sono stati eseguiti, con nuovi eluiti, durante la settimana del 1 dicembre 2017.

a. Preparazione dei campioni e misure accessorie

I sedimenti di aspetto globalmente omogeneo non sono stati setacciati. Soltanto gli eventuali sassi, frammenti di conchiglie e agglomerati di poseidonia sono stati rimossi a mano.

Conformemente al protocollo descritto in precedenza, i sedimenti sono stati sottoposti a centrifuga per 30 minuti a 8150 G (ovvero a circa 3000 rpm) in modo tale da eliminare i sali marini, per loro natura tossici per gli organismi continentali e considerati come non pericolosi secondo la normativa.

Per ciascun sedimento, è stato ottenuto un eluito, attraverso un saggio di lisciviazione ai sensi della norma NF EN 12457-2 (per un rapporto di 100 g di materiale secco per litro d'acqua, 24 ore di agitazione per rivoltamento), senza regolazione del pH, filtrato a 0,45 µm, secondo il protocollo definito dalla guida INERIS 2016 citata in precedenza.

Il contenuto d'acqua dei sedimenti in seguito alla centrifuga è stato misurato e i valori ottenuti sono riassunti nella tabella qui sotto. Le caratteristiche del substrato di diluizione (ISO) sono elencate nella stessa tabella, a titolo informativo.

	sicidità	umidità
Centuri punto 1	68,08%	31,92%
Tolone medio (punti 1-2-3)	74,47%	24,53%
Cagliari medio (punti 1-2-3)	82,96%	17,04%
Navicelli punto 1	62,16%	37,84%
Genova 1	75,26%	24,74%
Livorno medio (punti 1-2-3)	94,97%	5,03%
Substrato ISO	100,00 %	0,00%

Tabella 26 - Siccità/contenuto d'acqua dei sedimenti

Dopo aver messo in contatto il sedimento con l'acqua (rapporto L/S=5) per 2 ore ad agitazione lieve, sono stati misurati il pH e la conduttività dei sedimenti centrifugati, così come quelli degli eluiti (dopo il filtraggio). I valori ottenuti sono ricapitolati qui di seguito. Le caratteristiche del substrato di diluizione (ISO) sono elencate nella stessa tabella, a titolo informativo.

Gli eluiti sono stati realizzati il 9 e il 10 ottobre 2017, in modo da permettere di effettuare i biosaggi entro le 48 ore. Dopo il filtraggio, sono stati conservati al buio a una temperatura di +4°C. Per la seconda serie di saggi, gli eluiti sono stati realizzati tra il 30 novembre e il 1 dicembre 2017.

Sedimento	Sedimenti centrifugati (rapporto S/L = 1/5)		Eluiti filtrati il 10/10/2017 (rapporto S/L = 1/10)		Eluiti filtrati il 01/12/2017 (rapporto S/L = 1/10)	
	pH	conduttività (µS/cm)	pH	conduttività (µS/cm)	pH	conduttività (µS/cm)
Centuri punto 1	7,98	4.470	8,08	3.568	7,89	4.195
Tolone medio (punti 1-2-3)	8,29	3520	8,40	2396	8,30	2575
Cagliari medio (punti 1-2-3)	8,08	4201	8,00	3006	7,80	2902
Navicelli punto 1	7,84	3169	8,39	2859	7,87	7405
Genova 1	7,97	3606	8,14	2498	8,11	3323
Livorno medio (punti 1-2-3)	8,13	3776	8,07	2060	8,03	2181
Substrato ISO	6,37	85	- -	- -	- -	- -

Tabella 27 - pH/conduttività dei sedimenti centrifugati e degli eluiti filtrati

Soltanto i due eluiti del sedimento di Navicelli (punto 1) presentano una differenza significativa nella conduttività (2859 $\mu\text{S}/\text{cm}$ per il primo eluito e 7 405 $\mu\text{S}/\text{cm}$ per il secondo). Tale differenza potrebbe essere dovuta all'eterogeneità del sedimento o alla sua evoluzione biologica e fisico-chimica, avvenuta nonostante le precauzioni adottate per limitarla.

Si noti che i presenti dati sul pH e sulla conduttività sono compresi negli intervalli compatibili con la sopravvivenza degli organismi utilizzati per i biosaggi. Non sarebbero sufficienti di per sé per giustificare un'eventuale tossicità dei sedimenti.

b. Test d'inibizione della luminescenza del batterio *Vibrio fischeri*

Questo test consente di valutare la tossicità acuta di un eluito di sedimento in seguito al filtraggio a 0,45 μm . Effettuato nelle condizioni stabilite dalla norma NF EN ISO 11348-2 (NF T 90-320), il test viene eseguito con batteri luminescenti liofilizzati presenti in commercio. Si svolge in una camera climatizzata a una temperatura di +15°C. Al momento del saggio con le concentrazioni massime i batteri vengono messi in contatto con l'eluito, diluito al 10 %, per 30 minuti (sono stati realizzati parallelamente due replicati). La luminescenza delle sospensioni batteriche è misurata prima e dopo il contatto con l'eluito diluito, con l'ausilio di un fotomoltiplicatore. Le diluizioni vengono realizzate con l'ambiente di riferimento (acqua distillata salata a 20 g NaCl/L) che serve anche per i gruppi di controllo senza eluito. Al termine del saggio si determina la percentuale d'inibizione della luminescenza dei batteri, provocata da 30 minuti di contatto con l'eluito diluito al 10 %, rispetto a quella verificatasi nel gruppo di controllo.

Con questo saggio, secondo i valori di riferimento per i saggi di tossicità acuta, un sedimento è considerato pericoloso se la CE50 è uguale o inferiore al 10%, ovvero, nel caso del saggio con le concentrazioni massime, se l'inibizione della luminescenza osservata per l'eluito diluito al 10 % è uguale o maggiore del 50 %.

I risultati del saggio a concentrazioni massime per gli eluiti sono presentati nella seguente tabella. I saggi sono stati realizzati l'11 ottobre 2017.

Sedimenti	Inibizione della luminescenza al [10%]	
	replicato 1	replicato 2
Centuri punto 1	0 %	0 %
Tolone medio (punti 1-2-3)	0 %	0 %
Cagliari medio (punti 1-2-3)	0 %	0 %
Navicelli punto 1	0 %	0 %
Genova 1	0 %	0 %
Livorno medio (punti 1-2-3)	0 %	0 %

Tabella 28 - Risultati del saggio *V. fischeri* con concentrazioni massime per gli eluiti di sedimenti

I risultati mostrano che per il batterio *V. fischeri*, il contatto con gli eluiti dei sedimenti non genera alcuna tossicità acuta. Infatti, per nessun sedimento si osserva l'inibizione della luminescenza alla concentrazione massima del [10%].

Nessuno dei sedimenti testati potrà dunque essere qualificato come pericoloso con il saggio di tossicità acuta con *V. fischeri*.

c. Test d'inibizione della riproduzione del rotifero *Brachionus calyciflorus*

Il saggio permette di valutare la tossicità cronica di un eluito nei confronti di un organismo acquatico animale partenogenetico. Effettuato nel rispetto della norma NF ISO 20666, è eseguito con organismi presenti in commercio (Rotokit®) esposti individualmente all'eluito diluito all'1 % (concentrazione massima) per la durata di 48 ore. Il saggio è realizzato in micropiastre (con pozzetti da 1 ml). Comprende 8 replicati per eluito e un gruppo di controllo senza eluito. All'inizio del saggio, un solo organismo con meno di due ore di vita viene introdotto in ogni pozzetto della micropiastre. L'incubazione viene eseguita a 25°C ± 1°C, al buio. Il saggio è statico. Gli organismi sono nutriti all'inizio del saggio con una sospensione di alghe, contenente da 2 a 3x10⁷ cellule/ml. A 48 ore dall'incubazione, gli organismi presenti in ogni pozzetto vengono contati. L'inibizione della riproduzione degli organismi è calcolata per ciascun eluito (media degli 8 replicati) e messa a confronto con quella riscontrata nel gruppo di controllo senza eluito.

Con questo saggio di tossicità cronica, il sedimento sarà considerato pericoloso se la CE20 del suo eluito è pari a o minore dell'1 %, ovvero, nel caso del saggio con concentrazioni massime, se l'eluito diluito all'1 % provoca un'inibizione della riproduzione di *B. calyciflorus* pari a o maggiore del 20% rispetto al gruppo di controllo.

Una prima serie di saggi è stata avviata l'11 ottobre (con gli eluiti del 10). Per confermare le tossicità constatate, il 6 dicembre 2017 è stata eseguita una seconda serie di saggi (con gli eluiti del 1 dicembre). I risultati del test d'inibizione della crescita della popolazione di *Brachionus calyciflorus* in 48 ore sono presentati nella seguente tabella.

Sedimenti	Inibizione della riproduzione all'[1%]	
	eluito del 10/10/2017	eluito del 01/12/2017
Centuri punto 1	33,3 %	3,1 %
Tolone medio (punti 1-2-3)	15,7 %	3,1 %
Cagliari medio (punti 1-2-3)	33,3 %	28,1 %
Navicelli punto 1	27,5 %	31,3 %
Genova 1	43,1 %	21,9 %
Livorno medio (punti 1-2-3)	25,6 %	31,3 %

Tabella 29 - Risultati del saggio con *B. calyciflorus* per gli eluiti di sedimenti

Il primo lotto di risultati mostra che per il rotifero *B. calyciflorus*, il contatto con gli eluiti dei sedimenti diluiti all'1 % provoca sistematicamente un'inibizione della riproduzione rispetto al gruppo di controllo (dal 16 % al 43 % secondo il sedimento). Soltanto il sedimento "Tolone medio" non sarà classificato come sedimento pericoloso rispetto alla caratteristica HP14 (valore di riferimento: inibizione inferiore al 20 %). Tutti gli altri sedimenti (Livorno medio, Navicelli punto 1, Centuri punto 1, Cagliari medio e Genova punto 1) potrebbero essere qualificati come pericolosi.

Il secondo lotto di risultati, ottenuti con un secondo eluito, conferma questa tendenza, fatta eccezione per il sedimento "Centuri punto 1" nel quale non si riscontra più alcuna tossicità.

Secondo i risultati di queste due serie di saggi, la classificazione dei sedimenti in ordine crescente di tossicità, con il saggio cronico con *B. calyciflorus* è la seguente:

Tolone med. / Centuri pt. 1 / Livorno med. e Navicelli pt. 1 / Cagliari med. / Genova pt. 1

d. Test d'inibizione della riproduzione del crostaceo *Ceriodaphnia dubia*

Il test permette di valutare la tossicità cronica di un eluito nei confronti di un organismo acquatico animale partenogenetico. Effettuato nel rispetto della norma NF ISO 20665, è eseguito con organismi (prodotti in laboratorio) esposti individualmente all'eluito diluito all'1 % (concentrazione massima) per la durata di 7 giorni. Il test è realizzato in provette da 25 ml. Comprende 10 replicati per eluito e un gruppo di controllo senza eluito. All'inizio del saggio, un solo organismo di meno di 24 ore di vita (e proveniente da una covata di 8 esemplari) è introdotto in ogni provetta. L'incubazione è effettuata a una temperatura di $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, sotto illuminazione artificiale, con un ciclo di 8 ore di buio e 16 di luce. Il test è semi-statico. Gli organismi sono nutriti all'inizio del saggio con una sospensione di alghe contenenti da 8 a $9 \times 10^{+7}$ cellule/ml e 1 ml/l di una sospensione a 5 g/l di mangime per pesci finemente tritata. A partire dal terzo giorno d'incubazione, gli organismi raggiungono l'età riproduttiva. L'ambiente (diluizione e apporto nutritivo) viene allora rinnovato quotidianamente. A questo punto, i nuovi nati sono rimossi e contati uno per uno.

L'inibizione della riproduzione degli organismi è calcolata per ciascun eluito (media dei 10 replicati) in confronto al gruppo di controllo senza eluito.

Con questo saggio di tossicità cronica, il sedimento sarà considerato pericoloso se la CE20 del suo eluito è pari a o minore dell'1 %, ovvero, nel caso del saggio a concentrazione massima, se l'eluito diluito all'1 % provoca un'inibizione della riproduzione di *C. dubia* pari a o maggiore del 20% rispetto al gruppo di controllo.

I risultati del test d'inibizione della crescita di una popolazione di *Ceriodaphnia dubia* in 7 giorni sono presentati nella seguente tabella. Questi saggi sono stati avviati il 1 dicembre 2017 (eluiti del 1 dicembre).

Sedimenti	Inibizione della riproduzione all'[1%]
	eluito del 01/12/2017
Centuri punto 1	13,3 %
Tolone medio (punti 1-2-3)	1,4 %
Cagliari medio (punti 1-2-3)	16,8 %
Navicelli punto 1	28,3 %
Genova 1	0 %
Livorno medio (punti 1-2-3)	45,1 %

Tabella 30 - Risultati del saggio con *C. dubia* per gli eluiti di sedimenti

Questi risultati mostrano che per il crostaceo *C. dubia*, il contatto con gli eluiti dei sedimenti "Tolone medio" e "Genova medio" diluiti all'1% non ha alcun effetto inibitore della riproduzione. Questi sedimenti non sarebbero classificati come pericolosi per la caratteristica HP14 (valore di riferimento: inibizione inferiore al 20%).

Il contatto con gli eluiti diluiti all'1% dei sedimenti "Navicelli medio" e "Livorno medio" provoca, invece, un'inibizione della riproduzione rispetto al gruppo di controllo (rispettivamente del 28 % e del 45 %). Questi due sedimenti sarebbero classificati come pericolosi per la caratteristica HP14 (inibizione superiore al valore di riferimento del 20 %).

Gli eluiti diluiti all'1% dei due sedimenti "Centuri punto 1" e "Cagliari medio" provocano un'inibizione della riproduzione di *C. dubia* rispettivamente del 13 % e del 17 %. Queste inibizioni sono significative, ma, essendo al di sotto del valore di riferimento, non potranno condurre a qualificare questi due sedimenti come pericolosi per la caratteristica HP14.

La classificazione dei sedimenti in ordine crescente di tossicità, con il saggio di tossicità cronica con *C. dubia* è la seguente:

Genova pt. 1 / Tolone med. / Centuri pt. 1 / Cagliari med. / Navicelli pt. 1 / Livorno med.

e. Test d'inibizione della germinazione e della crescita fogliare di vegetali - saggio in vaso

Il test d'inibizione della germinazione e della crescita fogliare di semenze vegetali permette di valutare la tossicità acuta nei confronti di vegetali terrestri. Il saggio è eseguito in vaso, nelle condizioni dettate dalla norma ISO 11269-2. Il supporto di coltura del gruppo di controllo e di diluizione è il substrato di riferimento ISO¹ umidificato con acqua di rete dechlorata per aerazione dolce. La semenza è esposta ai sedimenti diluiti al 10% nel substrato ISO. Si realizzano quattro replicati di 10 semi per lotto. I semi sono disposti sulla superficie del substrato di coltura. Lungo tutta la durata del saggio, l'umidità nei vasi è mantenuta costante mediante vaporizzazione. Non è stata effettuata alcuna concimazione, né nel gruppo di controllo, né nei sedimenti. La specie vegetale testata è l'avena (*Avena sativa*), specie raccomandata dal protocollo sedimenti. Dopo una settimana di esposizione, si contano i semi che hanno germinato in ciascuno dei replicati.

Il saggio è successivamente portato avanti per 3 settimane. Alla fine del saggio, le parti fogliari delle piante vengono raccolte (selezionate al collare) e messe ad essiccare in forno a 80°C. La massa secca delle piante coltivate a contatto con i sedimenti è confrontata con la massa secca del gruppo di controllo.

Con questo saggio di tossicità acuta, secondo i valori di riferimento descritti in precedenza, il sedimento sarà considerato pericoloso se la CE50 è uguale o inferiore al 10%, ovvero, nel caso del saggio con le concentrazioni massime, se l'inibizione della germinazione o della crescita fogliare osservata per il sedimento diluito al 10 % nel substrato di riferimento è uguale o maggiore del 50 %. Il pH e la conduttività dei miscugli di sedimenti al 10 % nel substrato di riferimento sono stati misurati.

I risultati del test d'inibizione della germinazione e della crescita fogliare di *Avena sativa* sono presentati nella tabella qui sotto.

Sedimenti	caratteristiche della diluizione del 10 %		Inibizione al [10%]	
	pH	conduttività	germinazione	crescita fogliare
Centuri punto 1	7,96	478 µS/cm	0 %	0 % ^(f)
Tolone medio (punti 1-2-3)	7,98	648 µS/cm	0 %	0 % ^(f)
Cagliari medio (punti 1-2-3)	7,82	578 µS/cm	2,8 %	0 % ^(f)
Navicelli punto 1	7,77	619 µS/cm	0 %	0 % ^(f)
Genova 1	7,72	566 µS/cm	0 %	0 % ^(f)
Livorno medio (punti 1-2-3)	7,65	670 µS/cm	2,8 %	0 % ^(f)

Tabella 31 - Risultati del test di inibizione della germinazione e della crescita fogliare di *A. sativa*

^(f): effetto fertilizzante - la crescita delle piante (espressa in massa fogliare secca) è superiore a quella del gruppo di controllo.

I risultati mostrano che per l'avena (*A. sativa*) in condizioni di saggio, il contatto con i sedimenti diluiti alla concentrazione massima del 10 % non genera tossicità acuta, né per la germinazione (nessuna inibizione significativa osservata), né per la crescita fogliare (crescita significativamente superiore per i lotti esposti ai sedimenti diluiti al 10 % rispetto ai lotti esposti al substrato di riferimento e di diluizione).

Nessuno dei sedimenti testati potrebbe dunque essere classificato come pericoloso con il saggio di tossicità acuta di inibizione della germinazione e della crescita fogliare del vegetale *A. sativa*.

➤ Conclusioni sull'ecotossicità dei sedimenti marini e incidenza sullo status dei sedimenti

I risultati della batteria di saggi eseguiti ai fini della valutazione dell'ecotossicità dei sedimenti dello studio per la caratteristica di pericolo sono presentati nella seguente tabella. Per ciascun sedimento, lo status di "sedimento pericoloso" o "sedimento non pericoloso" è attribuito seguendo i valori di riferimento della procedura (non regolamentare) attualmente in vigore in Francia, così come viene descritta nella guida INERIS 2016.

Sedimento	Inibizione della luminescenza di <i>V. fischeri</i> al 10%	Inibizione della riproduzione di <i>B. calyciflorus</i> all'1%	Inibizione della riproduzione di <i>C. dubia</i> all'1%	Inibizione della germinazione di <i>A. sativa</i> al 10%	Inibizione della crescita di <i>A. sativa</i> al 10%	Conclusioni* HP14
Centuri punto 1	0 %	33,3 - 3,1%	13,3 %	0 %	0 % ^(f)	pericoloso
Tolone medio	0 %	15,7 - 3,1%	1,4 %	0 %	0 % ^(f)	non pericoloso
Cagliari medio	0 %	33,3 - 28,1%	16,8 %	2,8 %	0 % ^(f)	pericoloso
Navicelli punto 1	0 %	27,5 - 31,3%	28,3 %	0 %	0 % ^(f)	pericoloso
Genova 1	0 %	43,1 - 21,9%	0 %	0 %	0 % ^(f)	pericoloso
Livorno medio	0 %	25,6 - 31,3%	45,1 %	2,8 %	0 % ^(f)	pericoloso

Tabella 32 - Sintesi dei risultati della batteria di saggi HP14 alle concentrazioni massime realizzati sui sedimenti e conclusioni (valori di riferimento INERIS 2016)

^(f): effetto fertilizzante - la crescita delle piante (espressa in massa fogliare secca) è superiore a quella del gruppo di controllo.

*** ULTERIORI ANALISI SUI SEDIMENTI FRESCHI (EFFETTUATA DOPO LA REDAZIONE DEL PRESENTE DOCUMENTO) ALLA FINE HA RIBALTATO I RISULTATI INIZIALI CON LA TOTALITÀ DEI SEDIMENTI CLASSIFICATI COME NON PERICOLOSI SECONDO IL HP 14 TEST.**

Questa caratterizzazione ecotossicologica consente di concludere che:

- ✓ nessuno dei sedimenti potrebbe essere considerato pericoloso per la caratteristica di pericolo HP14, con i saggi di tossicità acuta (inibizione della luminescenza di *V. fischeri* e inibizione della germinazione e della crescita di *A. sativa*);
- ✓ gli eluiti diluiti all'1 % presentano quasi tutti una tossicità cronica significativa nei confronti di *B. calyciflorus*. I livelli d'inibizione raggiunti per Tolone medio non sono tuttavia sufficienti per classificare questo sedimento come pericoloso. Si nota, inoltre, una differenza significativa tra le inibizioni osservate nei i due eluiti del sedimento Centuri punto 1.
- ✓ Fatta eccezione per quelli di Genova 1 e di Tolone medio, gli eluiti diluiti all'1 % presentano una tossicità cronica significativa nei confronti di *C. dubia*. I livelli d'inibizione raggiunti per Centuri punto 1 e per Cagliari medio non sono tuttavia sufficienti per classificare questi sedimenti come pericolosi.

Alla fine di questi saggi, pare che soltanto il sedimento «Tolone» non presenti i valori di un rifiuto pericoloso, rispetto alla caratteristica di pericolo HP14 «ecotossico». Nell'ambito della gestione dei sedimenti pericolosi, gli altri sedimenti devono essere sottoposti a trattamento o eliminati.

➤ **Analisi incrociata dei risultati della batteria HP14 con i risultati ottenuti dall'ISPRA.**

I risultati forniti dall'ISPRA (documento Excel del settembre 2017) sono ripresi di seguito.

CAMPIONE/ Echantillon	tossicità ecotossicologica		
	Inibizione della crescita dell'alga <i>Phaeodactylum tricorutum</i>	test sviluppo embrionale del Riccio di mare <i>Paracentrotus lividus</i>	MTX
1. CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	Assente/Trascurabile	Alta *	Assente/Trascurabile
2. CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
3. CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
4. TOULON POINT 1 (06/06/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
5. TOULON POINT 2 (06/06/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
6. TOULON POINT 3 (06/06/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
7. CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	Assente/Trascurabile	Alta	Assente/Trascurabile
8. CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Assente/Trascurabile
9. CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Assente/Trascurabile
10. NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Moderata
11. NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Assente/Trascurabile
12. NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Moderata
13. GENOVA 1 (26/06/2017)	Assente/Trascurabile	Moderata	Assente/Trascurabile
14. LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	Assente/Trascurabile	Moderata	Assente/Trascurabile
15. LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	Assente/Trascurabile	Alta	Assente/Trascurabile
16. LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	Assente/Trascurabile	Alta	Assente/Trascurabile

Tabella 33 - Sintesi dei risultati dei biosaggi realizzati sui sedimenti dall'ISPRA (fogli Excel® del settembre 2017)

I risultati presentati qui di seguito sono stati ottenuti con organismi marini. Si tratta di due saggi di tossicità cronica di inibizione della crescita di un'alga unicellulare, *P. tricornutum*, e dello sviluppo embrionale del riccio *P. lividus*, e di un saggio di tossicità acuta di inibizione della luminescenza del batterio *V. fischeri* (detto "saggio Microtox®"). Il saggio con *V. fischeri* è comune ai due batteri.

La trasposizione di una classificazione con due colori (verde = non tossico / blu notte = molto tossico) in una classificazione con quattro colori (non tossico / moderatamente tossico / tossico / altamente tossico) è una procedura delicata che può suscitare critiche. Questa trasposizione, nonostante tutto, è stata stabilita al solo scopo di incrociare le informazioni ottenute con i dati rilevati dall'ISPRA. L'interpretazione dei valori di riferimento specifici per la valutazione del pericolo dei rifiuti (caratteristica di pericolo HP14) proposta qui di seguito non è convenzionale.

Per questo studio, le inibizioni significative osservate per i saggi di tossicità cronica (*B. calyciflorus* et *C. dubia*) e vicine ai valori di riferimento relativi alla classificazione del rifiuto come pericoloso / non pericoloso, ovvero le inibizioni del 13,3%, 15,7% e 16,8% (<20%) e 21,9% (≥20%), sono state classificate come "moderatamente tossiche", quindi vicine alla soglia consentita. Allo stesso modo, le inibizioni superiori al 40 % (ossia 2 volte tanto il valore di riferimento per i saggi di tossicità cronica) sono stati qualificati come "altamente tossiche".

Si ricorda che questi livelli d'inibizione sono stati ottenuti esponendo gli organismi agli eluiti (o i sedimenti per i vegetali) diluiti al 10 % per i saggi di tossicità cronica e all'1 % per i saggi di tossicità acuta.

Il codice dei colori proposto è presentato nella seguente tabella:

livello di tossicità	soglia
Tossicità trascurabile o non rilevabile	Tossicità acuta: < 50% tossicità cronica: < 15%
Tossicità moderata	Tossicità acuta: senza oggetto tossicità cronica: [≥ 15% - 25%]
Tossicità elevata	Tossicità acuta: senza oggetto tossicità cronica: [≥ 25% - 40%]
Tossicità molto elevata	Tossicità acuta: senza oggetto tossicità cronica: ≥ 40%

Tabella 34 - Codice colori proposto per la trasposizione dei risultati della batteria di saggi HP14 in quattro livelli di tossicità

Utilizzando il presente codice colori, la classificazione dei sedimenti ottenuti con la batteria di saggi HP14 è la seguente:

Sedimento	Inibizione della luminescenza di <i>V. fisheri</i> al 10%	Inibizione della riproduzione di <i>B. calyciflorus</i> all'1%	Inibizione della riproduzione di <i>C. dubia</i> all'1%	Inibizione della germinazione di <i>A. sativa</i> al 10%	Inibizione della crescita di <i>A. sativa</i> al 10%	Conclusione
Centuri punto 1	0 %	33,3% 3,1%	13,3 %	0 %	0 % ^(f)	Tossicità variabile
Tolone medio	0 %	15,7% 3,1%	1,4 %	0 %	0 % ^(f)	non tossico
Cagliari medio	0 %	33,3 - 28,1%	16,8 %	2,8 %	0 % ^(f)	tossico
Navicelli punto 1	0 %	27,5 - 31,3%	28,3 %	0 %	0 % ^(f)	tossico
Genova 1	0 %	43,1% 21,9%	0 %	0 %	0 % ^(f)	altamente tossico
Livorno medio	0 %	25,6 - 31,3%	45,1 %	2,8 %	0 % ^(f)	altamente tossico

Tabella 35 - Sintesi dei risultati della batteria di saggi HP14 alle concentrazioni massime realizzati sui sedimenti e conclusioni sulla tossicità suddivisa in quattro livelli

Presentati insieme alla suddivisione in quattro livelli di tossicità, i risultati ottenuti attraverso la procedura "HP14 a concentrazioni massime" sono coerenti con quelli ottenuti dall'ISPRA. Infatti:

- ✓ per i nostri due laboratori, il saggio di tossicità acuta con *V. fisheri* non è abbastanza sensibile per rilevare la tossicità.
- ✓ Il sedimento "Centuri - punto 1" si rivela tossico con i saggi cronici. Si riscontra per questo sedimento una variabilità dei risultati.
- ✓ Il sedimento "Tolone medio" (campione ottenuto mescolando i sedimenti provenienti da 3 punti diversi) si rivela non tossico.

- ✓ Il sedimento "Cagliari medio" (miscuglio dei sedimenti dei 3 punti di prelievo) e "Navicelli - punto 1" presentano una tossicità cronica significativa.
- ✓ I sedimenti "Genova 1" e "Livorno medio" (miscuglio dei sedimenti dei 3 punti di prelievo) presentano una tossicità molto elevata.

La classificazione dei sedimenti, in ordine crescente di tossicità, è la seguente:

- secondo i risultati ottenuti dall'ISPRA con organismi marini:
Tolone < Centuri < Genova < Livorno < Cagliari < Navicelli
- con i risultati ottenuti con il protocollo HP14:
Tolone < Centuri < Cagliari < Navicelli < Genova < Livorno

In entrambe le serie di saggi, i sedimenti che presentano una tossicità scarsa o inesistente sono quelli di Tolone e Centuri.

➤ **Ulteriori commenti relativi ai risultati della caratterizzazione dei sedimenti**

I sedimenti interessati dal programma presentano caratteristiche particolari rispetto a quelle recensite nel contesto dei programmi nazionali (francesi) di controllo della qualità dei sedimenti. La composizione dei sedimenti di SEDITERRA è stata confrontata con quella dei sedimenti recensiti da:

- INERIS - Qualità chimica dei sedimenti marini in Francia: sintesi dei dati disponibili - dicembre 2010. L'INERIS ha elaborato un database di sedimenti marini, partendo dalla rete di sorveglianza dei porti marittimi (REPOM - Réseau de surveillance de Ports Maritimes) coordinata da IFERMER, e da due progetti di caratterizzazione e trattamento dei sedimenti (PROSED e SEDIMARD). Il database si compone di 27538 dati per 818 campioni, ottenuti tra il 1996 e il 2008.
- BRGM: Analisi del protocollo ecotossicologico per la valutazione del carattere pericoloso dei sedimenti destinati alla gestione terrestre - gennaio 2013. Il BRGM ha condotto un programma nazionale di applicazione del protocollo per la caratterizzazione ecotossicologica dei sedimenti (*HP14 Sédiments*) che mira alla valutazione del carattere pericoloso dei sedimenti destinati alla gestione terrestre, basandosi sulla caratterizzazione di 47 sedimenti marini e 27 sedimenti continentali scelti sulla base dei dati fisico-chimici disponibili prima dello studio (39 campioni con uno o più parametri > S1 e 24 campioni con due o più parametri > S1).

Particolarità dei sedimenti di Centuri

Rispetto ai contenuti di metalli, il sedimento di **Centuri** (alta Corsica) presenta una concentrazione di cromo e nichel piuttosto elevata in confronto ai valori rilevati a livello nazionale.

La seguente tabella consente di mettere a confronto i contenuti di cromo e nichel del sedimento di Centuri con i valori medi e massimi registrati nel database dell'INERIS da una parte e con quelli rilevati nei 74 campioni del programma di applicazione del BRGM dall'altra.

Elemento	Centuri (mg/kg MS)	INERIS Valore medio (mg/kg MS)	INERIS Valore massimo (mg/kg MS)	BRGM Valore medio (mg/kg MS)	BRGM Valore massimo (mg/kg MS)
Cromo	159 296 155	51 (812 dati)	636 (812 dati)	43 (74 dati)	101 (74 dati)
Nichel	125 255 118	20 (803 dati)	214 (803 dati)	21 (74 dati)	67 (74 dati)

Tabella 36 - Contenuti di cromo e nichel del sedimento di Centuri confrontati con i valori medi e massimi dei programmi nazionali di controllo della qualità dei sedimenti

La particolare abbondanza di cromo e nichel nella composizione dei sedimenti dell'Alta Corsica è stata identificata nell'ambito del controllo della rete REPOM, come testimoniano i seguenti grafici (i valori medi dei contenuti di cromo e nichel dei sedimenti dell'Alta Corsica si basano sull'analisi statistica di 10 dati):

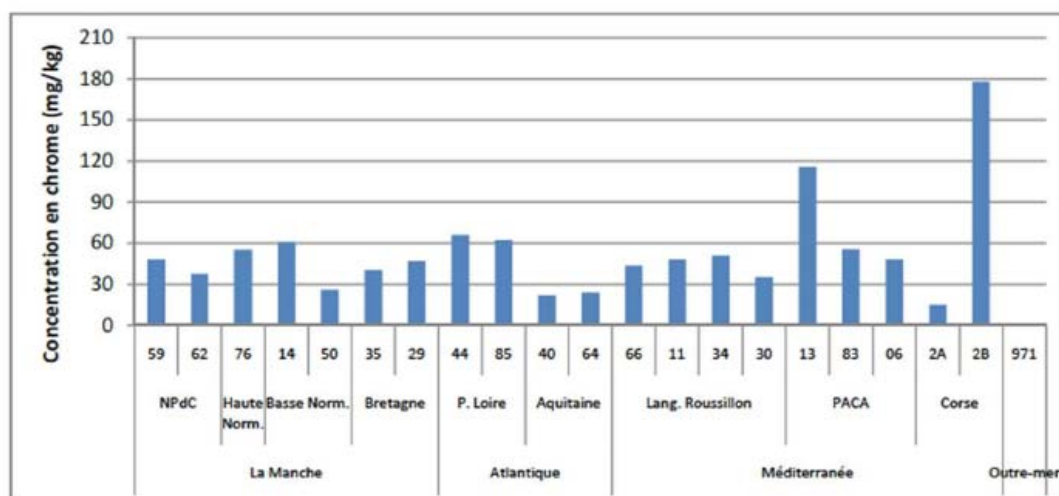


Figura 11 - Ripartizione per dipartimento dei valori medi del contenuto di cromo nei sedimenti rilevati nell'ambito della rete di sorveglianza REPOM

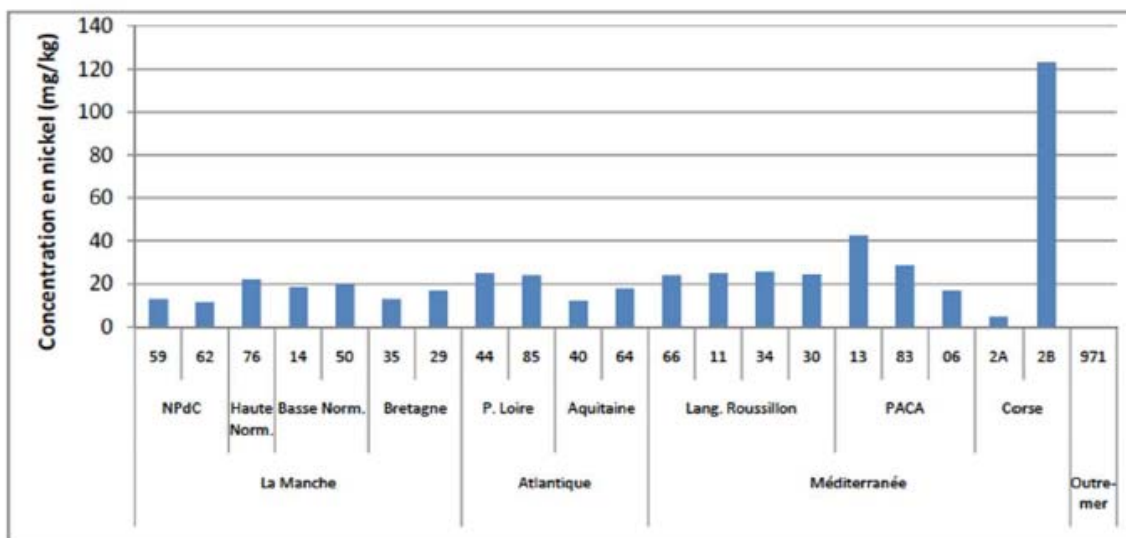


Figura 12 - Ripartizione per dipartimento dei valori medi del contenuto di nichel nei sedimenti rilevati nell'ambito della rete di sorveglianza REPOM

N.B. : La carta geologica della Corsica mostra che nel porto di Centuri si trova un affioramento di serpentinite (roccia madre metamorfica). Questo minerale è per natura ricco di Ni, Cr e Co, il che potrebbe spiegare le elevate concentrazioni riscontrate nei sedimenti. Inoltre, a sud di Centuri è situata la miniera di Canari, dove tra il 1948 e il 1965 è stato sfruttato un giacimento di serpentinite ricca di fibre d'amianto. Durante questi anni, 11 milioni di tonnellate di residui minerali sono stati rigettati direttamente in mare (Bernier et al., 1997 ; Andral et al. - 2004a). Nonostante ciò, dal momento che le correnti marine di Cap-Corse sono orientate in direzione nord-sud, la probabilità che questi depositi di rifiuti minerali provenienti da Canari siano stati trasportati fino al porto di Centuri resta molto bassa. È stata infine condotta una ricerca delle fibre di amianto nei sedimenti, per verificare questa eventualità. I risultati ottenuti si sono rivelati negativi: i sedimenti di Centuri sono ricchi di Ni e Cr ma non contengono fibre d'amianto.

Particolarità dei sedimenti di Cagliari

Il sedimento di Cagliari presenta un contenuto di cadmio, piombo e zinco elevati rispetto ai dati nazionali di controllo della qualità dei sedimenti:

Elemento	Cagliari (mg/kg MS)	INERIS Valore medio (mg/kg MS)	INERIS Valore massimo (mg/kg MS)	BRGM Valore medio (mg/kg MS)	BRGM Valore massimo (mg/kg MS)
Cadmio	1,81	0,33 (817 dati)	8,60 (817 dati)	0,6 (74 dati)	36,3 (74 dati)
	2,31				
	2,5				
Piombo	200	41 (816 dati)	1340 (816 dati)	58 (74 dati)	580 (74 dati)
	157				
	140				
Zinco	227	150 (815 dati)	3493 (815 dati)	195 (74 dati)	4140 (74 dati)
	344				
	361				

Tabella 37 - Contenuti di cadmio, piombo e zinco del sedimento di Cagliari confrontati con i valori medi e massimi dei programmi nazionali di controllo della qualità dei sedimenti

Particolarità dei sedimenti di Pisa

Il sedimento di Pisa presenta un contenuto di cadmio, nichel e IPA elevati rispetto ai dati nazionali di controllo della qualità dei sedimenti:

Elemento	Cagliari (mg/kg MS)	INERIS Valore medio (mg/kg MS)	INERIS Valore massimo (mg/kg MS)	BRGM Valore medio (mg/kg MS)	BRGM Valore massimo (mg/kg MS)
Cadmio	1,07	0,33 (817 dati)	8,60 (817 dati)	0,6 (74 dati)	36,3 (74 dati)
	2,42				
	9,96				
Nichel	60,1	20 (803 dati)	214 (803 dati)	21 (74 dati)	67 (74 dati)
	68,4				
	76,2				
IPA	1,1	1,49 (487 dati)	232 (487 dati)	3,6 (74 dati)	91 (74 dati)
	30				
	4,5				

Tabella 38 - Contenuti di cadmio, nichel e IPA del sedimento di Pisa confrontati con i valori medi e massimi dei programmi nazionali di controllo della qualità dei sedimenti

Il bilancio del programma di applicazione del protocollo di caratterizzazione ecotossicologica (HP14) dei sedimenti, condotto dal BRGM ha concluso che soltanto 4 sedimenti marini su 47 campioni (8,5 %) potrebbero essere classificati come pericolosi sulla base delle loro caratteristiche ecotossiche.

Pare che, confrontando i dati della caratterizzazione fisico-chimica dei sedimenti analizzati nell'ambito del progetto SEDITERRA con quelli dei programmi nazionali di controllo della qualità dei sedimenti (compresi i dati del programma d'applicazione del BRGM), la maggior parte dei campioni di SEDITERRA presentino elevati contenuti di metalli (ovvero contaminanti organici). Questo spiega, almeno in parte, i livelli di ecotossicità superiori rilevati per i campioni di SEDITERRA, rispetto a quelli del programma di applicazione del protocollo HP14.

7.1.3) Caratterizzazione della frazione lisciviabile dei sedimenti (Saggio di conformità EN 12457-2)

La norma francese NF EN 12457-2 costituisce il protocollo di riferimento impiegato in Francia per l'applicazione della Decisione 2003/33/CE del Consiglio, del 19 dicembre 2002, relativa alle condizioni di ammissione dei rifiuti negli impianti di stoccaggio.

Questo protocollo che permette inoltre di verificare, al primo approccio, l'adeguatezza ambientale di un materiale alternativo all'utilizzo nelle tecniche stradali.

I risultati della caratterizzazione della frazione lisciviabile dei sedimenti del progetto SEDITERRA, secondo questo protocollo, sono presentati nella tabella 19 a seguire:

Paramètres	pH	Conductivité (µS/cm)	Résidus secs à 105 °C	Indice phénol (IPh)	COT	Cl	F	SO4	Sb	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Corse M	7,8	5880	39300	<0,51	<51	16500	7,64	3790	0,012	<0,20	<0,10	<0,002	<0,10	0,25	<0,001	0,62	<0,10	<0,10	<0,01	<0,20
Toulon M	8,2	3350	21200	<0,50	87	9350	9,52	1980	0,033	<0,20	<0,10	<0,002	<0,10	<0,20	<0,001	1,27	<0,10	<0,10	<0,01	<0,20
Cagliari M	7,9	3070	23400	<0,50	64	5970	8,46	5600	0,079	<0,20	0,44	0,003	<0,10	0,52	<0,001	1,02	<0,10	<0,10	<0,01	<0,20
Pize M	8,1	5170	28800	<0,50	210	14500	9	3560	0,063	<0,20	0,72	<0,002	<0,10	<0,20	<0,001	0,833	<0,10	<0,10	<0,01	<0,20
Gènes	8,1	3520	21400	<0,50	56	9270	7,06	2250	0,014	<0,20	0,15	<0,002	<0,10	0,91	<0,001	0,101	<0,10	<0,10	<0,01	<0,20
Livourne M	7,8	2310	16900	<0,50	<50	4360	5,88	5370	<0,005	<0,20	0,29	<0,002	<0,10	<0,20	<0,001	0,19	<0,10	<0,10	<0,01	<0,20
Seuils ISDI			4000	1	500	800	10	1000	0,06	0,5	20	0,04	0,5	2	0,01	0,5	0,4	0,5	0,1	4
Seuils ISDND			60000	-	-	15000	150	20000	0,7	2	100	1	10	50	0,2	10	10	10	0,5	50

Tabella 39 - Risultati della caratterizzazione della frazione lisciviabile dei sedimenti del progetto SEDITERRA confrontati con i valori limite di ammissione dei rifiuti in ISDI e ISDND

I risultati confrontati ai valori limite di ammissione in ISDI e ISDND mostrano che:

- Nessuno dei sedimenti è ammissibile allo stato attuale in impianti di stoccaggio di rifiuti inerti (ISDI), per via del superamento dei valori limite della frazione solubile (residuo secco) e dei livelli di cloruri e solfati lisciviabili.
- I campioni di Cagliari e Pisa presentano valori al di sopra delle soglie consentite di antimonio e molibdeno.
- I campioni di Centuri e Tolone presentano un contenuto di molibdeno al di sopra delle soglie consentite.
- Tutti i campioni sono conformi alle soglie europee per l'ammissione dei rifiuti in impianti di stoccaggio di rifiuti non pericolosi. I contenuti di cloruri del sedimento di Centuri, oltre il livello consentito, non sono penalizzanti poiché la frazione solubile non supera il valore limite.

I sei sedimenti si collocano dunque nella categoria dei rifiuti potenzialmente ammissibili in impianti di stoccaggio di rifiuti non pericolosi ma non ammissibili direttamente in impianti di stoccaggio di rifiuti inerti.

Tali sedimenti sono conformi al livello 1 di caratterizzazione ambientale dei materiali alternativi utilizzati nelle tecniche stradali, previa verifica della loro variabilità. La loro adeguatezza ambientale per il riutilizzo nelle tecniche stradali è condizionata dal rispetto del livello 2 di caratterizzazione ambientale, basato sulla prova di percolazione in colonna di cui alla norma EN 14405.

7.1.4) Caratterizzazione del comportamento alla percolazione - Prova di conformità alla norma CEN/TS 14405

La norma francese NF CEN/TS 14405 costituisce il protocollo di riferimento adottato in Francia per la caratterizzazione ambientale del livello 2 dei materiali alternativi utilizzati nelle tecniche stradali (guida SETRA, 2011).

La prova di percolazione in colonna TS 14405 è stata effettuata su ciascuno dei quattro sedimenti selezionati durante il Comitato Tecnico del 20 settembre 2017 svoltosi a La Seyne sur Mer. I risultati delle analisi sono riassunti nella tabella qui sotto:

Paramètres	Percolation NF CEN/TS 14405 (mg/kg MS)														
	Cl	F	SO4	Sb	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Centuri M	13124	16,5	5259	0,012	0,041	0,162	0,0019	0,0065	0,039	0,001	0,81	0,054	0,0119	0,005	0,145
Toulon M	33839	6,24	9313	0,028	0,024	0,114	0,0036	0,0041	0,045	0,0012	1,45	0,023	0,0054	0,016	0,155
Cagliari M	7754	16,6	17230	0,148	0,033	0,209	0,0147	0,0026	0,068	0,001	2,38	0,052	0,0042	0,004	0,452
LivourneM	4250	5,83	6563	0,005	0,008	0,119	0,0012	0,0033	0,03	0,013	0,16	0,014	0,0033	0,006	0,025
Seuils Remblais	5000	30	5000	0,2	0,5	28	0,16	2	50	0,04	2,8	0,8	0,5	0,4	50
Seuils Sous-couche	10000	60	10000	0,4	0,8	56	0,32	4	50	0,08	5,6	1,6	0,8	0,5	50

Tabella 40 - Risultati della caratterizzazione del comportamento alla percolazione dei sedimenti del progetto SEDITERRA confrontati con i valori limite di accettabilità ambientale dell'utilizzo dei materiali alternativi nelle tecniche stradali

I risultati confrontati ai valori limite di accettabilità nelle tecniche stradali mostrano che:

- Nessuno dei quattro sedimenti selezionati è riutilizzabile, nel suo stato attuale, in terrapieno semplicemente ricoperto da uno strato di 30 cm di materiali naturali (tra cui terriccio), per via delle loro emissioni di cloruri e solfati nell'acqua, superiori ai valori limite.
- Soltanto il sedimento di Livorno presenterebbe delle caratteristiche di comportamento alla percolazione conformi alle condizioni richieste dal livello 2 di caratterizzazione ambientale della guida SETRA per il riutilizzo in strato di fondo di carreggiata o di corsia d'emergenza rivestiti di uno strato superficiale considerato scarsamente permeabile.

La guida SETRA, inoltre, lascia la possibilità di giustificare l'accettabilità dell'uso dei sedimenti nelle tecniche stradali sulla base di uno studio specifico che necessita l'uso del lisimetro o di piattaforme di prova (prova di livello 3).

7.2) CARATTERIZZAZIONE COMPLEMENTARE DELL'INFLUENZA DEL PH IN CONDIZIONI STAZIONARIE SUL COMPORTAMENTO ALLA LISCIVIAZIONE SECONDO LA NORMA EN 14 429

La norma francese NF EN 14 429 ha due principali obiettivi:

- la determinazione della capacità di neutralizzazione acido-basica del materiale, che indica la sua resistenza ad eventuali aggressioni esterne acide o basiche;
- La determinazione delle curve di disponibilità degli agenti inquinanti in funzione del pH e le quantità di agenti reattivi aggiunti per raggiungere i diversi pH.

7.2.1) Principio dell'analisi

Diversi campioni sono stati messi in contatto con alcuni liscivianti contenenti diverse quantità di reagente (acido o basico), per 48 ore con un rapporto liquido/solido (L/S) di 10 ml/g. L'obiettivo era quello di coprire una gamma di pH che vanno da 4 a 12 (8 punti almeno, inclusi questi due valori) dopo 48 ore dal contatto. L'aggiunta di un lisciviante al campione si effettua in tre tappe: dopo 30 minuti, dopo 1 ora e dopo 2 ore.

Le quantità di acido o di base necessarie per coprire la superficie di pH sono dedotte, da una parte, dai risultati delle analisi preliminari e, dall'altra, da alcune analisi ripetute per regolare il divario tra due punti di pH, che non deve superare le 1,5 unità di pH. Le condizioni stazionarie sono verificate alla fine del periodo di estrazione (48 ore) attraverso la variazione del pH.

Su ciascuno degli eluiti prodotti da questa prova, vengono analizzati i seguenti elementi: As, Ba, Cd, Cr(t), Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se e Zn.

7.2.2) Risultati e commenti

I risultati sono raccolti in allegato al presente resoconto sottoforma di tabelle e grafici, una tabella per ciascun saggio e due grafici per ciascun elemento e per i 4 saggi.

Nel primo a sinistra sono presentate, su scala logaritmica, le concentrazioni in base al pH. Nel secondo sono esposte le concentrazioni espresse in base alle quantità aggiunte di acido o di base. Il grafico presenta due assi di coordinate in cui sono presentate contemporaneamente le curve del pH di neutralizzazione e le curve di concentrazione. Questa doppia rappresentazione permette di avere allo stesso tempo la concentrazione, il pH e la quantità di reagente necessaria per raggiungere quel pH.

➤ Esempio di lettura del grafico

Le curve realizzate con linee continue rappresentano le concentrazioni. Per un punto qualsiasi si può leggere il valore della concentrazione sull'asse verticale delle ordinate a sinistra e la quantità di reagente sull'asse delle ascisse in basso. Il pH di questo punto è quello del punto corrispondente sulla curva pH.

Esempio:

Per leggere il pH del punto (A) della curva nel cerchio superiore, si cerca il punto di intersezione tra la verticale che passa per questo punto (A) e la curva del pH corrispondente, espressa con una «linea tratteggiata» (secondo cerchio in basso). Il pH si legge sull'asse delle coordinate di destra. Ovvero in questo caso: 5.

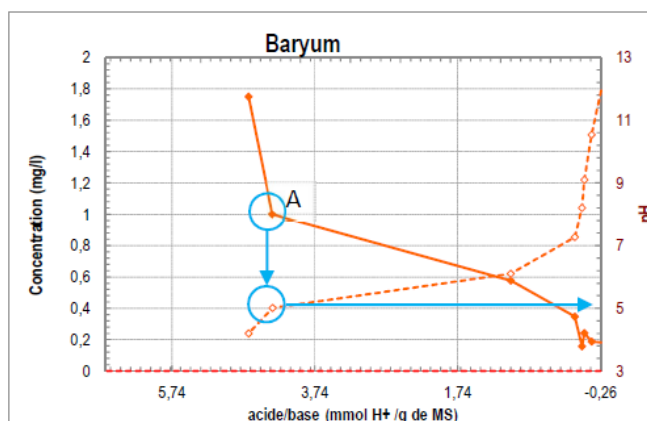


Figura 13 - Esempio di illustrazione dei risultati della determinazione dell'influenza del pH

➤ Capacità di neutralizzazione degli acidi: capacità di neutralizzazione degli acidi dei quattro sedimenti

La legenda qui fornita è una legenda standard valida per tutti i grafici. In questo sono presenti soltanto le curve del pH, rappresentate da una linea tratteggiata.

I pH naturali dei materiali corrispondono ai pH risultanti dal contatto dei campioni con la sola acqua demineralizzata e si collocano sulla verticale al punto 0 delle ascisse.

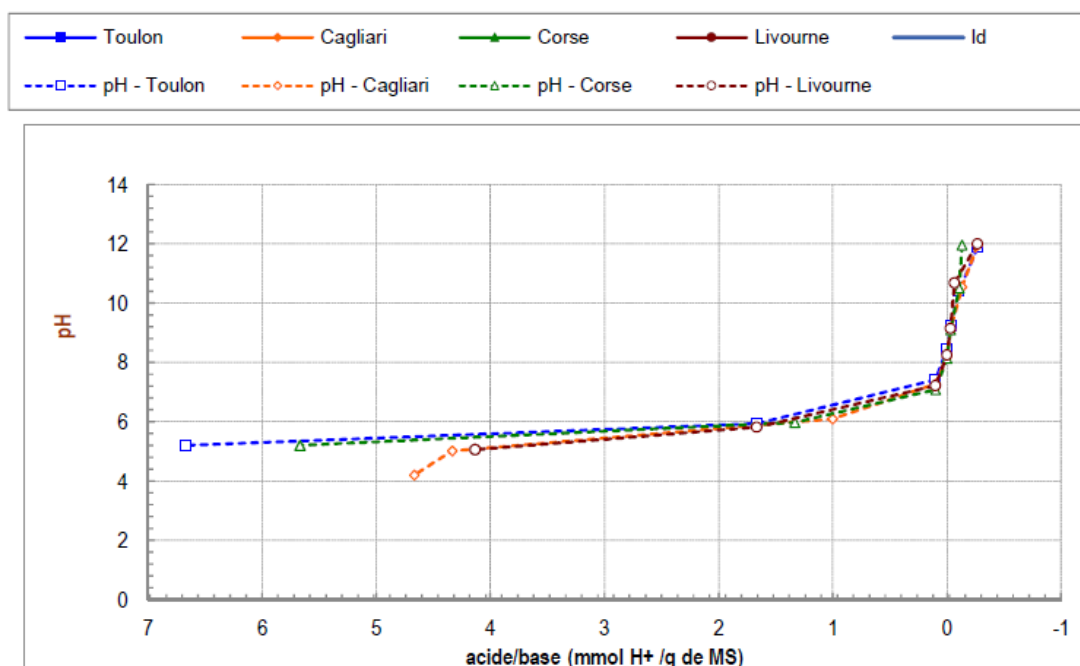


Figura 14 - Curva di capacità di neutralizzazione degli acidi e delle basi dei quattro sedimenti

In questa figura si constata un'inversione della scala delle ascisse. Questa è fatta per far corrispondere il senso di lettura alle figure rappresentate in funzione del pH, come si può vedere nelle pagine seguenti.

Quanto all'estensione della scala, questa corrisponde alla capacità di neutralizzazione degli acidi e delle basi dei sedimenti rappresentati. Si può constatare che le curve sono quasi sovrapposte. Si nota anche che per i quattro sedimenti sono sufficienti meno di 0,3 mmol/g di soda per passare dal pH naturale (intorno agli 8,25 - 8,5) a un pH superiore a 12. Per quanto riguarda gli acidi, invece, si nota una grande disparità di risultati. Per raggiungere un pH 4 sono necessari 4,67 mmol di acido/g per il sedimento di Cagliari, mentre per gli altri sedimenti, ricchi di conchiglie, ne occorre molto di più, a tal punto che è stato necessario interrompere gli studi riguardanti il pH 4 dopo aver aggiunto 16 mmol/g.

➤ **Disponibilità in base al pH**

I diversi elementi analizzati possono essere classificati in tre grandi categorie secondo il loro comportamento in funzione del pH, come mostrano le seguenti rappresentazioni:

- gli elementi che dipendono dal pH e che hanno un comportamento anfotero (arsenico, cromo, rame, nichel, selenio e zinco);
- gli elementi che dipendono dal pH e che hanno una maggiore solubilità in condizioni acide (bario);
- gli elementi che dipendono dal pH e che hanno una maggiore solubilità in condizioni basiche (molibdeno).

➤ **Elementi che presentano un carattere anfotero**

Presentiamo di seguito due esempi di elementi che dipendono dal pH. Il nichel che, confrontato con un pH acido, è poco sensibile al pH basico. Si noterà che le curve in funzione del pH sono quasi uguali nel grafico di sinistra. La concentrazione di nichel diventa misurabile da entrambe le parti dell'intervallo (8 - 10,5), eccetto per il sedimento corso che presenta dei valori misurabili sull'insieme della gamma di pH testati. Per quanto riguarda gli acidi, la concentrazione cresce rapidamente con la diminuzione del pH mentre per quanto riguarda le basi, la crescita è debole. Il comportamento dello zinco è simile a quello del nichel.

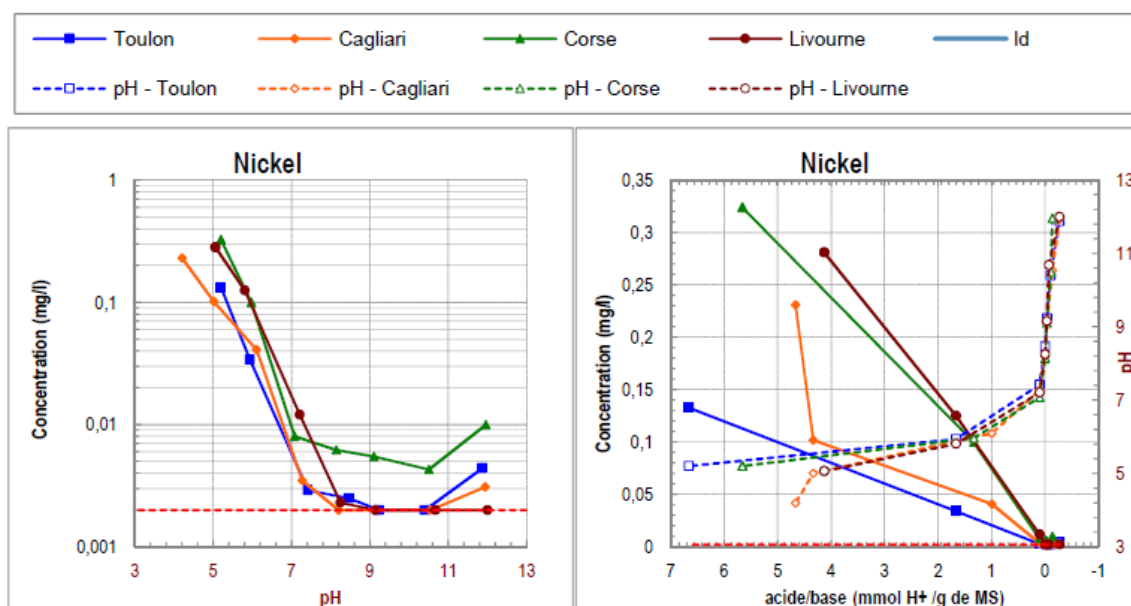


Figura 15 - Risultati della determinazione dell'influenza del pH sul comportamento alla lisciviazione del nichel nei quattro sedimenti

Come secondo esempio presentiamo il rame, il cui comportamento è uguale a quello dell'arsenico, del cromo e del selenio.

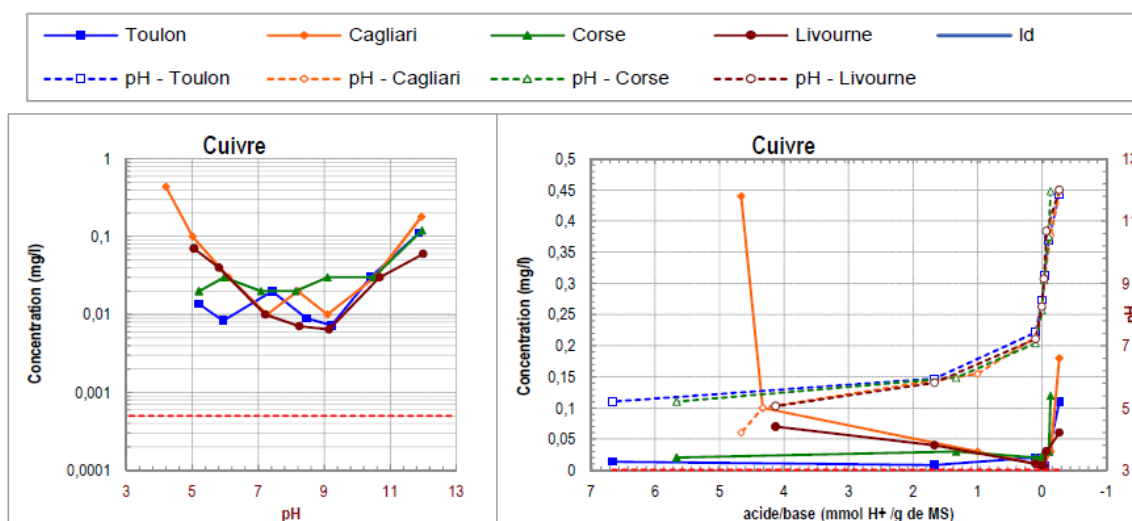


Figura 16 - Risultati della determinazione dell'influenza del pH sul comportamento alla lisciviazione del rame nei quattro sedimenti

In questo caso si distingue nettamente il carattere anfotero, per il fatto che la parte acida e quella basica aumentano chiaramente per i due sedimenti di Cagliari e Livorno. Ricordiamo che solo il campione di Cagliari è stato regolato al pH 4.

➤ **Elementi solubili in ambiente acido**

Solo il bario si comporta in questo modo. Cresce in maniera inversamente proporzionale al valore del pH. Prendendo in considerazione i sedimenti uno per uno, questa crescita non è evidente, ma la tendenza globale è chiara, in particolare i contenuti a pH 12 presentano una diminuzione rispetto ai punti di pH inferiore.

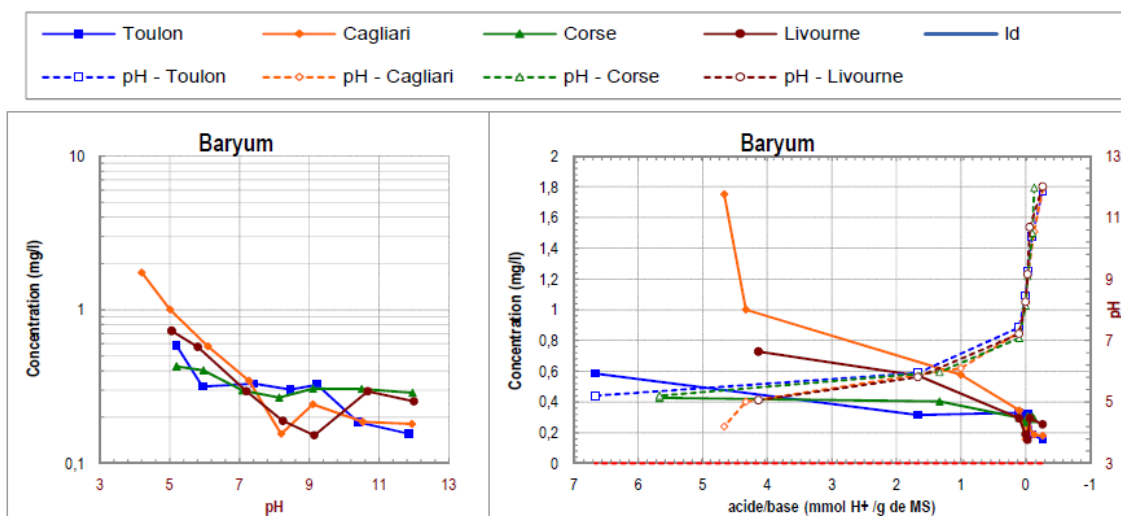


Figura 17 - Risultati della determinazione dell'influenza del pH sul comportamento alla lisciviazione del bario nei quattro sedimenti

➤ **E elementi solubili in ambiente basico**

In questo caso abbiamo il molibdeno, la cui concentrazione cresce proporzionalmente in base al pH. Contrariamente all'esempio precedente (bario), in questo caso, nel grafico di sinistra le curve sono regolari e l'aumento della concentrazione è ben visibile. Nel grafico di destra l'aumento è quasi esponenziale anche se i valori restano a un livello di concentrazione molto debole.

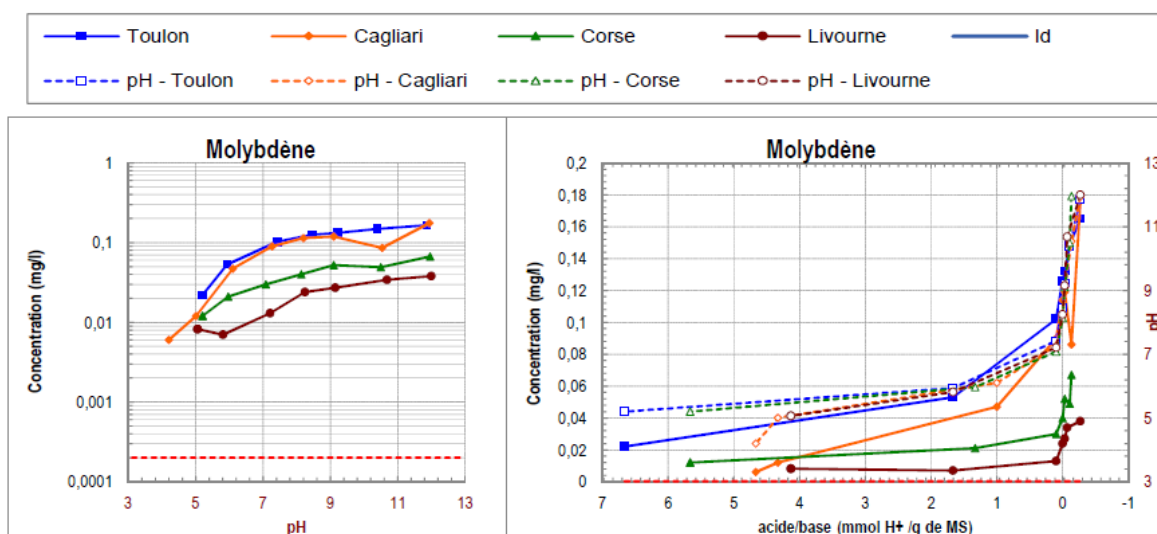


Figura 18 - Risultati della determinazione dell'influenza del pH sul comportamento alla lisciviazione del molibdeno nei quattro sedimenti

➤ **Commenti generali**

Dall'insieme di queste prove di caratterizzazione del comportamento alla lisciviazione sotto l'influenza del pH, emerge che tutti e quattro i campioni testati presentano una scarsa capacità di neutralizzazione delle basi contro una forte capacità di neutralizzazione degli acidi.

Questa maggior sensibilità dei sedimenti a un ambiente basico deve condurre a vigilare particolarmente sulla solubilizzazione potenzialmente aumentata di elementi contenuti nei sedimenti quando sono inseriti in un simile contesto fisico-chimico, come può essere nel caso di formulazioni di materiali a base di leganti idraulici o pozzolanici.

Gli elementi contenuti in questi sedimenti che sembrano essere i più sensibili a un contesto basico sono l'arsenico, il cromo, il rame, il nichel, il selenio, lo zinco e il molibdeno.

Ciononostante, i livelli di concentrazione osservati restano molto deboli poiché i valori più elevati (per i cromo e il molibdeno) raggiungono soltanto lo 0,1 mg/l.

Le differenze dei livelli di concentrazione tra i quattro sedimenti sono poco rappresentative a livello globale.

VIII. PRODOTTO ITALIANO INTEGRALE

SOMMARIO :

8.1)	INTRODUZIONE	170
8.2)	FASE DI CAMPIONAMENTO DEI SEDIMENTI	170
8.3	FASE DI CARATTERIZZAZIONE ANALITICA	171
8.3.1)	Metodiche analitiche	172
8.3.2)	Risultati analitici	186
8.4)	RISULTATI ANALISI ECOTOSSICOLOGICHE	202
8.5)	FASE DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	204
8.5.1)	Obiettivi	204
8.5.2)	Struttura stradale di riferimento in Francia e in Italia	204
8.5.3)	Norme tecniche di riferimento – confronto tra norma francese e norma italiana	206
8.5.4)	Risultati delle analisi	224
8.5.5)	Geotecnica – conclusioni	241

8.1) INTRODUZIONE

Il presente documento (Livrabile T2.1.1) costituisce il rapporto di sintesi delle attività di caratterizzazione ambientale e geotecnica preliminare dei sedimenti prelevati in ciascun porto interessato dal progetto Sediterra condotte al fine di individuare i quantitativi di sedimento da avviare alle successive attività pilota di trattamento e recupero.

La fase di campionamento (paragrafo 6.2), la fase di caratterizzazione analitica dei sedimenti (paragrafo 6.3) e la fase di caratterizzazione ecotossicologiche (paragrafo 6.4) sono state effettuate contestualmente dagli operatori di ISPRA ed INSA in maniera condivisa ed incrociata.

Il presente documento riporta le metodiche analitiche ed i risultati analitici ottenuti dai partner italiani, mentre in APPENDICE viene fornita la tabella riepilogativa dei risultati ottenuti dagli Istituti italiani e francesi.

Nel paragrafo 6.5 – fase di caratterizzazione geotecnica, si presenta in primo luogo un confronto tra i criteri di classificazione la normativa francese NF P11-300 e quella italiana CNR UNI 10006.

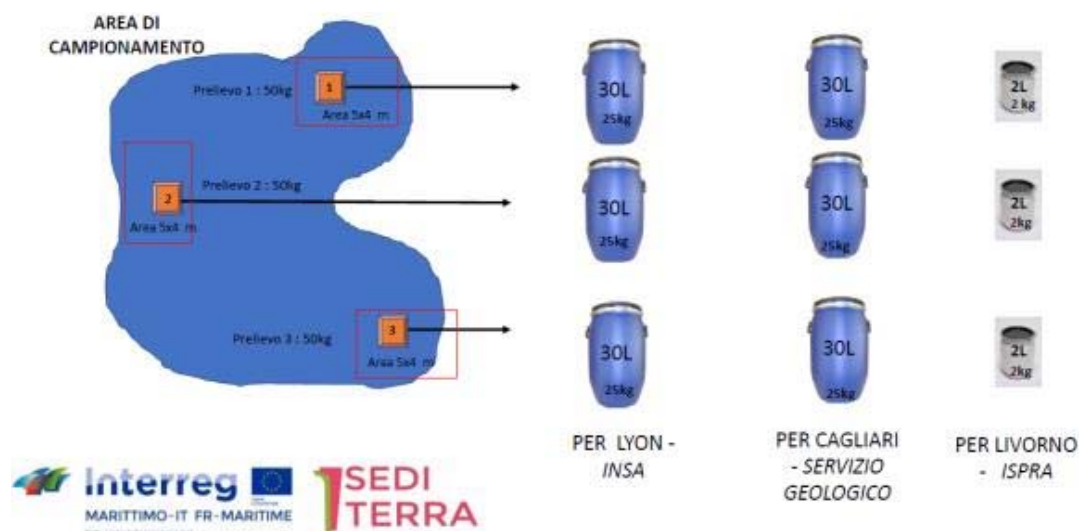
Le prove sono state eseguite presso il Laboratorio geotecnico della Città Metropolitana di Cagliari, partner della Regione Sardegna.

Di ciascun campione si forniscono i parametri geotecnici significativi, la classificazione del sedimento secondo la norma francese e italiana e il giudizio di utilizzabilità in opere stradali secondo quanto indicato da tali norme.

Sono fornite tabelle riepilogative delle analisi ed i rapporti di prova.

8.2) FASE DI CAMPIONAMENTO DEI SEDIMENTI

I 6 siti portuali presi in considerazione dal progetto Sediterra sono : Livorno, Cagliari, Pisa (Navicelli), Tolone e Centuri. In ciascuno dei 6 siti portuali sono stati individuati 3 differenti punti di campionamento (ad eccezione del porto di Genova dove è stato prelevato un unico campione) da ciascuno dei quali sono state prelevate aliquote di materiale opportunamente omogeneizzato e da destinarsi ai laboratori di ISPRA, INSA E Servizio Geologico di Cagliari, secondo lo schema sotto riportato :



Schema indicativo del campionamento dei sedimenti dai siti individuati dal progetto SEDITERRA

I quantitativi sono stati scelti in funzione delle attività analitiche previste e spediti con documentazione transfrontaliera ai sensi del Règlement (CE) n°1013/2006 du Parlement européen et du Conseil du 14 juin 2006.

Le campagne di campionamento si sono svolte nel seguente ordine cronologico :

PORTO DI CENTURI : 29-30/05/2017

PORTO DI TOULON : 06/06/2017

VASCA DI COLMATA DEL PORTO DI CAGLIARI : 07/06/2017

CANALE DEI NAVICELLI - PISA : 08/06/2017

PORTO DI GENOVA : 26/06/2017

VASCA DI COLMATA DEL PORTO DI LIVORNO : 29/06/2017

8.3) FASE DI CARATTERIZZAZIONE ANALITICA

Nei laboratori ISPRA, su ciascun campione raccolto sono state condotte analisi chimico-fisiche e eco tossicologiche. In particolare le analisi previste sui n. 16 campioni di sedimento sono state le seguenti :

- Nei laboratori di Livorno sono state determinate le concentrazioni dei metalli pesanti (Hg, Cd, Pb, As, Cr tot, Cu, Ni, Zn, Al, V, Nn, Fe) e sostanza organica ; sono stati eseguiti analisi granulometrica e saggi ecotossicologici con il riccio di mare *Paracentrotus lividus* e con l'alga *Pheodactylum tricornutum*
- Nei laboratori di Roma è stato eseguito il saggio biologico con il batterio luminescente *Vibrio fischeri* (Microtox®) su fase solida
- Nei laboratori di Chioggia sono state determinate le concentrazioni di TBT e composti organostannici
- Nei laboratori di Ancona sono state determinate le concentrazioni di IPA, PCB e idrocarburi

8.3.1) Metodiche analitiche

Le metodiche seguite sono generalmente quelle riportate nel volume ICRAM – Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio (Servizio Difesa Mare) “Metodologie analitiche di riferimento nell’ambito del “Programma di monitoraggio per il controllo dell’ambiente marino costiero (triennio 2001-2003)”. In particolare sono state eseguite secondo quanto sotto riportato.

Caratteristiche granulometriche :

Per la determinazione delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti marini si tratta ogni campione (circa 70 g) con una soluzione di perossido di idrogeno ed acqua distillata (1 : 8) per 48 h a temperatura ambiente, per facilitare la separazione dei granuli.

In seguito, si separa il sedimento su maglia da 63 µm in umido con acqua distillata ; le due frazioni così ottenute vengono essiccate in stufa a 60 °C e successivamente pesate.

Si procede a vagliare la frazione > 63 µm (sabbia e ghiaia) con pile di setacci da 2000, 1000, 500, 250, 125 e 63 µm della serie ASTM ; si pesa il sedimento corrispondente a ciascun intervallo e al termine delle operazioni si calcola in quale percentuale le varie frazioni sono presenti all’interno del campione.

Metalli e Sostanza Organica :

Il campione (circa 0.3 g s.s.) è stato mineralizzato in bombe in teflon, con l’impiego di un forno a microonde opportunamente programmato (Milestone 1200), mediante l’aggiunta di 3 ml di HNO₃ (65%) e di 1 ml di HCl (30%) ultrapuri. Alla soluzione ottenuta è stata aggiunta una quantità di acqua ultrapura tale da raggiungere il volume finale di 25 ml.

La determinazione analitica è stata effettuata mediante l'impiego di Spettrofotometria ad Emissione Ottica (ICP-OES Agilent720) per tutti i metalli a eccezione del mercurio. Per quest'ultimo le analisi sono state condotte mediante l'utilizzo di Spettroscopia ad Assorbimento Atomico (metodo dei Vapori Freddi, Cetac M-7600). L'accuratezza della metodica è stata valutata impiegando il materiale standard di riferimento LGC 6137 (Promochem), che è stato processato con le stesse modalità dei campioni. La calibrazione è validata mediante la partecipazione al circuito europeo di intercalibrazione QUASIMEME e WEPAL. Il limite di rilevabilità della metodica e il limite di quantificazione per ogni metallo analizzato è riportato in proxima Tabella :

Limiti di rilevabilità e di quantificazione

	Al	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
Rilevabilità (mg/l)	0,078	0,0005	0,00004	0,0061	0,0035	0,0001	0,0071	0,0036	0,027	0,167
Quantificazione (mg/kg)	6,50	0,044	0,0029	0,512	0,295	0,0004	0,591	0,299	2,249	13,93

Per la determinazione della sostanza organica si pesano circa 3 g di campione e si lasciano in muffola a 365° per 12 ore. Si effettuano 2 pesate, una prima dell'esposizione in muffola ed una subito dopo e si determina la sostanza organica per sottrazione.

Idrocarburi Policiclici Aromatici :

La determinazione degli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) è stata effettuata utilizzando un'aliquota, omogenea del campione, pari a 3 grammi. Al momento della preparazione dei campioni, i sedimenti sono stati addizionati di 5 ml di una soluzione di KOH 0.5 M in metanolo, per l'idrolisi dei lipidi e l'estrazione solido-liquido. I campioni sono stati agitati vigorosamente ed in seguito mantenuti in movimento per una notte intera a 4°C. Il completamento dell'idrolisi della componente lipidica e l'estrazione solido-liquido è stata eseguita mediante microonde a 200W e 55°C per 15 min (Microwave Digestion and Extraction System Mars-5, CEM). I campioni sono stati centrifugati a 1000×g per 5 min al fine di eliminare il residuo solido e i sovrantanti recuperati in nuovi tubi. Il volume dei campioni è stato ridotto a 0.5 ml mediante una centrifuga evaporante (Speedvack, Juan), a 45°C per 60-120 min.

Infine ai campioni è stato applicato un processo di purificazione e concentrazione attraverso una cromatografia a bassa pressione con resine SPE (estrazione in fase solida) del tipo Backerbond SPE C18 (500mg, 6mL) condizionate con 10 ml di fase mobile (tampono KHCO₃ 10mM in H₂O ultrapura e metanolo al 10%) e recuperati in fine con 1 ml di acetonitrile puro per HPLC.

Il sistema cromatografico utilizzato è costituito da una pompa HPLC per gradiente binario e un detector in fluorescenza (Perkin Elmer Serie 200 Pump and Fluorescence Detector). La separazione cromatografica è stata eseguita mediante equilibri di ripartizione utilizzando una colonna analitica Supelcosil LC-PAH (LC18 modificata e specifica per l'analisi di idrocarburi policiclici aromatici) da 10 cm di lunghezza, 4.6 mm di diametro interno e particelle da 3µm di diametro. L'analisi è stata condotta mediante gradiente dinamico utilizzando acqua ultrapura e acetonitrile come fasi mobili. Il gradiente utilizzato è il seguente : acqua 40% e acetonitrile 60% per 2 min ; acetonitrile dal 60% al 100% con gradiente lineare per 10 min ; acetonitrile 100% per 5 min ; acetonitrile dal 100% al 60% con gradiente lineare per 2 min ; acqua 40% e acetonitrile 60% per 6 min (ricondizionamento). La durata complessiva dell'analisi è di 25 minuti.

La misurazione dei segnali è stata eseguita in fluorescenza modulando nel tempo le coppie di lunghezza d'onda applicate in eccitazione ed emissione secondo il seguente programma : 0min, Ec=280nm, Em=330nm ; 6 min, Ec=250nm, Em=370nm ; 8 min, Ec=280nm, Em=450nm ; 9 min, Ec=265nm, Em=380nm ; 13 min, Ec=290nm, Em=410nm ; 25 min, Ec=280nm, Em=330nm.

Il volume di campione iniettato è pari a 20µl ed è garantito costante per tutte le analisi utilizzando un loop a volume noto, montato su una valvola di iniezione. La determinazione qualitativa e quantitativa degli analiti è stata eseguita attraverso il confronto dei cromatogrammi e dei segnali, con quelli ottenuti iniettando soluzioni standard a concentrazioni note e scalari, preparate utilizzando una miscela di idrocarburi aromatici puri (EPA 610). L'accuratezza della procedura analitica e l'efficienza dell'estrazione e preparazione dei campioni è stata controllata attraverso la stima del recupero degli analiti ricercati in appropriate matrici certificate standard (SRM-NIST 2977 ; SRM-NIST 1944). Gli analiti determinati mediante il metodo appena descritto possono essere classificati in IPA a basso peso molecolare (naftalene, 1-metil naftalene, 2-metil naftalene, acenaftene, fluorene, fenantrene ed antracene) e IPA ad alto peso molecolare (fluorantrene, pirene, benzo[a]antracene, crisene, 7,12-dimetil benzo[a]antracene, benzo[b]fluorantrene, benzo[k]fluorantrene, benzo[a]pirene, dibenzo[a,h]antracene, benzo[g,h,i]perilene, indeno(1,2,3-cd)pirene).

Analisi degli idrocarburi alifatici (C10-C40) :

La determinazione degli idrocarburi alifatici semi-volatili o non volatili (>C10-C40) è stata effettuata mediante tecniche gas-cromatografiche, conformi a metodi descritti in letteratura (Piva et al., 2011).

I campioni sono stati scongelati ed aliquote pari a circa 3 g (peso umido) sono state addizionate con una soluzione di n-esano : acetone (2:1) in un rapporto di 1:3, peso campione / volume di solvente (m/v). Dopo una vigorosa agitazione, i campioni sono stati estratti utilizzando un sistema di estrazione controllata a microonde, alla temperatura di 110°C per 15 minuti, alla potenza di 400 Watt (Microwave Digestion and Extraction System Mars-5, CEM). In seguito, le soluzioni di estrazione sono state recuperate in tubi di pyrex ed i campioni centrifugati blandamente (1000× g per 5 minuti), al fine di rimuovere residui solidi del campione. Le soluzioni sono state purificate con tecniche di estrazione in fase solida (SPE), utilizzando resine di estrazione del tipo Strata-X (Phenomenex, Strata-X 33u Polymeric Reversed Phase) da 500 mg e 6 mL, precedentemente condizionate mediante 15 mL di acetone e 15 mL di esano, oltre a resine del tipo Strata-FL (Phenomenex, FL-PR) da 1000 mg e 6 mL, precedentemente condizionate con 15 mL di esano. Tale purificazione è stata effettuata utilizzando il sistema automatico Gilson Aspec GX271. I campioni, eluiti con l'ausilio di soluzioni di acetone ed esano, sono stati raccolti in appositi tubi in pyrex e quindi posizionati all'interno di un evaporatore centrifugo (SpeedVack Juan RC 1009), dove sono stati concentrati fino a secchezza, alla temperatura ambiente. Infine, i campioni sono stati solubilizzati in 0,5 mL di n-pentano e posti all'interno di apposite vials in pyrex da 1,5 mL, provviste di chiusura superiore con membrana in silicone per foratura da siringhe analitiche per gascromatografia.

L'analisi è stata condotta in gascromatografia con detector FID (Perkin Elmer Clarus 500). La colonna cromatografica utilizzata è del tipo Elite-5 (Perkin Elmer). Il metodo analitico ha previsto le seguenti specifiche : rampa di temperatura del forno da 40°C a 320°C, flusso di carrier (idrogeno) pari a 1 ml/min, con rapporto di splittaggio iniziale pari a 1:20 ; temperatura dell'iniettore variabile da 40°C a 280°C ; temperatura del detector FID pari a 320°C costante, rapporto di fiamma pari a 10:1, aria:idrogeno. Al termine delle curve di riscaldamento di iniettore e forno, le temperature sono state riportate ai valori iniziali ; la durata complessiva della separazione gas-cromatografica è di circa 25 min.

La determinazione quantitativa degli idrocarburi totali è stata effettuata calibrando il sistema mediante uno standard puro costituito da un mix di specie chimiche di idrocarburi con pari numero di carbonio da C10 a C40, lineari ed insaturi, conforme alle specifiche EN ISO 9377-3.

Per la determinazione degli idrocarburi volatili (C5-C10) aliquote omogenee di campione pari a circa 5 grammi sono state scongelate a temperatura ambiente e rapidamente introdotte all'interno di apposite vials per campionamento di spazio di testa e chiuse ermeticamente per impedire la perdita di composti volatili; i campioni così preparati sono stati riscaldati alla temperatura di 70°C in apposito bagno termostato, per almeno 20 mn, quindi un volume pari a 100µL è stato campionato mediante apposita siringa per iniezione di gas ed immediatamente trasferito al sistema cromatografico descritto in precedenza, con il seguente metodo analitico: rampa di temperatura del forno da 40 a 260°C, flusso di carrier (idrogeno) pari a 1 ml/min (splitless); temperatura dell'iniettore pari 160°C costante; temperatura del detector FID pari a 280°C costante, rapporto di fiamma pari a 10:1, aria:idrogeno.

La durata complessiva dell'analisi è di circa 10 minuti. Le concentrazioni degli idrocarburi volatili ed alifatici sono espresse in $\mu\text{g/g}$ di campione (peso secco) ; il peso secco dei campioni è determinato essiccando delle aliquote degli stessi alla temperatura di circa 60°C per almeno 8 ore e determinando, per ciascun sedimento, il contenuto d'acqua associato.

Composti organostannici :

La determinazione dei composti organostannici (TBT – tributilstagno, DBT – dibutilstagno e MBT – monobutilstagno) nei campioni di sedimento è stata effettuata basandosi sulle metodiche adottate da Binato et al. (1998) e Morabito et al. (1995, 2001).

La procedura analitica consiste in una serie di fasi sequenziali : estrazione, derivatizzazione, purificazione e, infine, determinazione analitica mediante analisi gascromatografica accoppiata a un rivelatore a spettrometria di massa a trappola ionica (GC-MS/MS).

Al campione liofilizzato e omogeneizzato è stato aggiunto come standard interno TTBT (tetrabutilstagno). Il campione è stato estratto in bagno a ultrasuoni con una soluzione di tropolone 0,05% p/v in metanolo, previa acidificazione con acido cloridrico. Il surnatante è stato separato mediante centrifugazione e quindi sottoposto a estrazione con diclorometano, previa aggiunta di soluzione salina in acqua Milli-Q (10%), e filtrato attraverso sodio solfato anidro per eliminare le tracce di umidità. L'estratto è stato concentrato a circa 2 ml e quindi ripreso in n-esano.

L'estratto è stato derivatizzato con reattivo di Grignard. Dopo eliminazione del reattivo in eccesso con la soluzione di cloruro di ammonio, la fase organica è stata concentrata e purificata su colonnine riempite di sodio solfato anidro e di gel di silice (preventivamente deattivato con acqua Milli-Q al 10%). L'eluato (n-esano) è stato concentrato a volume noto e iniettato al GC-MS/MS.

Tutti i solventi usati sono di grado per analisi di pesticidi residui.

La determinazione analitica è stata effettuata mediante gascromatografo accoppiato ad uno spettrometro di massa (GC-MS/MS):

- Gascromatografo : modello TRACE 1300 (Thermo Scientific)
- Rilevatore : spettrometro di massa a trappola ionica modello ITQ 700 (Thermo Scientific)

Per la quantificazione sono state utilizzate curve di calibrazione preparate con soluzioni standard di TBT, di DBT e di MBT, con TTBT come standard interno. Ai fini del controllo di qualità dei dati analitici, insieme a ogni serie di campioni vengono analizzati regolarmente campioni di controllo, inclusi bianchi di procedura, repliche e materiali di riferimento certificati (BCR-646, EC-DG JRC Institute for Reference Materials and Measurements e CRM PACS-2 National Research Council Canada) e partecipando al circuito di intercalibrazione internazionale QUASIMEME Laboratory Performance Studies.

I limiti di quantificazione, espressi come massa dell'analita, rispettivamente come catione e come stagno, per grammo di campione secco sono i seguenti : 4 ng TBT g⁻¹ s.s. (pari a 2 ng Sn g⁻¹ s.s.) ; 8 ng DBT g⁻¹ s.s. (pari a 4 ng Sn g⁻¹ s.s.); 6 ng MBT g⁻¹ s.s. (pari a 4 ng Sn g⁻¹ s.s.). Per ciascun composto analizzato, le concentrazioni determinate sono espresse sia come massa di catione per grammo di peso secco, sia come stagno (Sn) per grammo di peso secco.

Analisi dei PCB :

Aliquote omogenee pari a circa 3 g (peso umido) sono state addizionate con una soluzione di n-esano : acetone (2:1) ; in seguito ad una vigorosa agitazione, i campioni sono stati estratti utilizzando un sistema di estrazione controllata a microonde, alla temperatura di 110°C per 15 minuti alla potenza di 400Watt (Microwave Digestion and Extraction System Mars-5, CEM).

In seguito le soluzioni di estrazione vengono recuperate in tubi di pyrex ed i campioni centrifugati blandamente (1000× g per 5 minuti) al fine di rimuovere residui solidi del campione. Le soluzioni vengono purificate con tecniche di estrazione in fase solida (SPE) utilizzando resine di estrazione del tipo Strata-X (Phenomenex, Strata-X 33u Polymeric Reversed Phase) da 500mg e 6mL, precedentemente condizionate mediante 15mL di acetone e 15mL di esano, oltre a resine del tipo Strata-FL (Phenomenex, FL-PR) da 1000mg e 6mL, precedentemente condizionate con 15mL di esano. I campioni, opportunamente eluiti con l'ausilio di soluzioni di acetone ed esano, vengono raccolti in appositi tubi in pyrex e quindi posizionati all'interno di un evaporatore centrifugo (SpeedVack Juan RC 1009), dove vengono concentrati fino a secchezza, alla temperatura ambiente. In fine i campioni vengono solubilizzati in 0.5mL di n-esano e posti all'interno di apposite vials in pyrex da 1.5mL, provviste di chiusura superiore con membrana in silicone per foratura da siringhe analitiche per gascromatografia.

Le determinazioni analitiche vengono condotte mediante un gascromatografo Varian Chrompack CP-3800 (Varian Inc.), dotato di auto campionatore CP-8400 ed un detector costituito da uno spettrometro di massa Varian Saturn 2000 con trappola ionica. Le condizioni strumentali sono riassunte in seguito : il gas carrier è costituito da elio ultrapuro compresso di grado 5.6, erogato attraverso sistema di filtri e trappole per ossigeno e umidità ed il flusso in colonna è costante e pari a 1ml/min ; al momento dell'iniezione è previsto uno step di flusso pulsato alla pressione di 35psi in testa alla colonna per 0.8min. La temperatura dell'iniettore è mantenuta costante a 280°C ; lo splittaggio prevede un rapporto pari a 1:25 per 5 min ed in seguito viene mantenuto costante a 1:10 ; questo viene interrotto per 0.8min al momento dell'iniezione. Il volume di iniezione è pari a 1µL attraverso micro-siringa da 10µL, dosato attraverso auto campionatore tarato CP-8400.

La colonna gascromatografica è del tipo Varian FactorFour (Varian Capillary Column, CP8944, VF-5ms, 30M × 0.25mmID, DF=0.25) all'interno del forno GC impostato alla temperatura iniziale di 70°C, mantenuta per 1.5min ; in seguito è prevista una prima rampa di temperatura del forno GC di 10°C/min fino a 200°C, una seconda di 5°C/min fino a 270°C ed un'ultima di 10°C/min fino al raggiungimento di 300°C, temperatura mantenuta per 8.5min. Al termine tutte le zone riscaldate vengono riportate ai valori iniziali e la durata delle separazioni cromatografiche è pari a circa 40min.

Le specifiche del detector di massa sono le seguenti : la temperatura della linea di trasferimento allo spettrometro di massa (Transfer line) è di 180°C, quella della Manifold è pari a 50°C e quella della trappola ionica è di 150°C. Il vuoto all'interno della trappola ionica viene garantito da una pompa esterna del tipo Varian DS 102. La detezione del segnale mediante spettrometro di massa viene effettuata impostando i seguenti parametri strumentali : ritardo di accensione del filamento pari a 5 min; scansione degli ioni da 60 a 440 m/z fino a 40min con modalità di ionizzazione automatica dei frammenti (0.76 secondi per scansione, corrente di emissione di 10µA). Gli analiti determinati sono i seguenti : idrocarburi bifenili policlorurati, tra cui le isoforme PCB4, PCB8, PCB11, PCB16, PCB17, PCB18, PCB19, PCB28, PCB38, PCB44, PCB46, PCB52, PCB66, PCB77, PCB81, PCB101, PCB105, PCB118, PCB126, PCB128, PCB138, PCB153, PCB156, PCB169, PCB170, PCB172, PCB180, PCB182, PCB187, PCB192, PCB195, PCB206, PCB209.

Al fine di garantire l'accuratezze e la precisione delle determinazioni, durante ogni sessione analitica vengono processate soluzioni di bianco, preparate con le stesse procedure descritte per i campioni, ma utilizzando solamente i solventi puri precedentemente indicati, oltre ad apposite soluzioni (minimo 10) a diverse concentrazioni di standard analitici puri (Supelco Pesticide EPA8081 Standard Mix; Supelco Aroclor 1221, 1242, 1254 Standard Mix; Supelco Hexachlorobenzene standard; Supelco DM471 Phenols Mixture; Polychlorinated Biphenyl Congeners NIST SRM1493) e le determinazioni corrette mediante l'utilizzo di uno standard interno (tetra cloro m-xylene TCMX).

La stima del recupero degli analiti ricercati viene effettuata analizzando appropriate matrici certificate di riferimento (SRM-NIST 2977 ; SRM-NIST 1944).Gli analiti presenti nei campioni vengono determinati confrontando il tempo di ritenzione e gli spettri caratteristici con quelli precedentemente ottenuti per le soluzioni standard. Inoltre, gli spettri di massa caratteristici vengono confrontati con quelli di un database certificato di riferimento (NIST/EPA/NIH Mass Spectra Search Program Version 2.0f).

Saggi ecotossicologici :

Saggio biologico con *Vibrio fischeri* : *Vibrio fischeri* è un batterio marino Gram-negativo ed eterotrofo, appartenente alla famiglia delle Vibrionaceae. E' cosmopolita, ma con maggior diffusione nelle fasce temperate e subtropicali.

Il sistema Microtox® è un test biologico di tossicità acuta basato sull'utilizzo della bioluminescenza naturale di questa specie. Poiché in presenza di contaminanti l'emissione di luce da parte di *V. fischeri* diminuisce, la misura dell'eventuale inibizione della bioluminescenza a seguito dell'esposizione del batterio ad una sostanza nota o ad un campione naturale di acqua o sedimento, consente di valutare il grado di tossicità della sostanza o della matrice testata.

Il sistema di misura risulta piuttosto versatile in quanto è applicabile a matrici naturali, in particolare marine, acquose (acqua interstiziale, elutriato, ecc.) e solide (fanghi, sedimenti), nonché a soluzioni acquose di sostanze tossiche pure sia organiche che inorganiche.

Preparazione delle matrici ambientali : I saggi biologici sono stati applicati all'elutriato e direttamente alla fase solida. Gli elutriati sono stati preparati miscelando aliquote di sedimento ed acqua di mare artificiale ISO in rapporto 4:1 di peso secco, lasciando le miscele in agitazione per un'ora e centrifugando per 20 minuti a 3500 rpm.

Il sovrantante, filtrato a 0.45 µm al fine di eliminare eventuali particelle di sedimento in sospensione in grado di determinare interferenze ottiche, è stato successivamente utilizzato per il saggio a 30 min.

La fase solida è stata preparata per semplice centrifugazione refrigerata (3500 rpm a 4°C per 30'), eliminando successivamente l'acqua interstiziale come sovrantante.

Protocolli di riferimento e procedura adottata :

L'emissione della bioluminescenza è stata misurata all'interno del luminometro termostato M500, dotato di pozzetti termostatati a 15 °C per i controlli e i campioni e a 4°C per il reagente.

I metodi utilizzati sono riconducibili al protocollo standard ISO 11348. In particolare l'organizzazione specifica dei saggi biologici in termini di scansione delle diluizioni e numero di controlli è stata la seguente :

- Per i campioni di elutriato è stata applicato il protocollo Comparison al 90% (Azur Environmental, 1995a) organizzato con 5 repliche del controllo e del campione al 90% di concentrazione, effettuando le letture dopo esposizione di 5 e 15 minuti

- Per campioni di sedimento centrifugato è stato applicato il protocollo Solid Phase Test (SPT) con la procedura Large Sample Method (Azur Environmental, 1995b) organizzato con 9-12 diluizioni e 3 controlli a seconda della granulometria del campione. Il test prevede una prima esposizione di 20 minuti durante i quali i batteri si trovano a diretto contatto con il sedimento ed una seconda fase di ulteriori 10 minuti in cui la risospensione batterica viene incubata nel luminometro

La relazione dose-risposta, ovvero concentrazione del campione-inibizione della bioluminescenza, è stata elaborata mediante un software dedicato (Microtox Omni™ v. 1.16) che, nel caso degli elutriati, ha consentito di individuare la variazione media percentuale di emissione di luce rispetto al controllo, mentre, nel caso della fase solida, la EC50 (concentrazione del campione cui corrisponde una riduzione della bioluminescenza pari al 50%). In quest'ultimo caso la EC50 è stata ulteriormente elaborata, esprimendola come TU (Unità Tossiche = 100/EC50), che consente di ottenere una relazione diretta fra tossicità e riduzione della bioluminescenza, e come Sediment Toxicity Index (S.T.I.), che permette di esprimere la reale tossicità acuta del campione rispetto alla tossicità "naturale" di un campione di riferimento avente le medesime caratteristiche granulometriche (Onorati et al., 1998). Al fine di esprimere il risultato del saggio nella scala S.T.I., poiché il test in fase solida viene effettivamente applicato sulla frazione granulometrica < 1 mm e poiché la componente naturale della tossicità è funzione della frazione pelitica, è stata eseguita anche un'analisi granulometrica mirata ad individuare la proporzione tra le due frazioni citate, indispensabile per la valutazione del reale livello di tossicità acuta. Le modalità utilizzate per l'individuazione di tali frazioni granulometriche si dividono in 3 fasi :

1. Trattamento del campione con una soluzione di H₂O₂ per facilitare la separazione e la disgregazione del sedimento
 2. Setacciatura su getto di acqua distillata mediante setacci ASTM da 63 µm e da 1 mm
 3. Recupero delle frazioni ottenute ed essiccazione in stufa, scartando quella > di 1 mm
- L'elutriato è stato considerato tossico quando il campione ha mostrato una inibizione media della bioluminescenza statisticamente significativa ($p < 0.05$) e maggiore o uguale al 10%.
 - L'elutriato è stato considerato biostimolante quando il campione ha mostrato una bioluminescenza statisticamente superiore al controllo ($p > 0.05$) di almeno il 10%.
 - La matrice solida (centrifugata) è stata giudicata tossica quando il valore di S.T.I è risultato superiore a 1.

L'emissione della bioluminescenza è stata misurata all'interno del luminometro termostato M500, dotato di pozzetti termostati a 15 °C per i controlli e i campioni e a 4°C per il reagente.

I metodi utilizzati sono riconducibili al protocollo standard ISO 11348. In particolare l'organizzazione specifica dei saggi biologici in termini di scansione delle diluizioni e numero di controlli è stata la seguente : per i campioni di elutriato è stata applicato il protocollo Comparison al 90% (Azur Environmental, 1995a) organizzato con 5 repliche del controllo e del campione al 90% di concentrazione, effettuando le letture dopo esposizione di 5 e 15 minuti.

La relazione dose-risposta, ovvero concentrazione del campione-inibizione della bioluminescenza, è stata elaborata mediante un software dedicato (Microtox Omni™ v. 1.16) che, nel caso degli elutriati, ha consentito di individuare la variazione media percentuale di emissione di luce rispetto al controllo.

La scala adottata per la quantificazione della tossicità è riportata in prossima Tabella (ICRAM-APAT, 2007).

Scale di tossicità acuta utilizzate nel saggio biologico mediante *V. fischeri*

Matrice	Tossicità assente/trascurabile	Tossicità presente	Tossicità elevata	Tossicità molto elevata
Elutriato	$EC_{20} \geq 90\%$ $\% \text{ Effetto} \leq 20\%$	$EC_{20} < 90\%$ e $EC_{50} \geq 90\%$ $20 < \% \text{ Effetto} \leq 50\%$	$20\% \leq EC_{50} < 90\%$ $\text{Effetto} > 50\%$	$EC_{50} < 20\%$
Fase solida	S.T.I. ≤ 3	$3 < \text{S.T.I.} \leq 6$	$6 < \text{S.T.I.} \leq 12$	S.T.I. > 12

Saggio biologico con *Paracentrotus lividus* :

L'affidabilità del riccio di mare come bioindicatore è riconosciuta a livello mondiale e già negli anni '80 i test di fecondazione e di sviluppo embrionale sono stati inclusi nella lista ICES (1997) dei test biologici più attendibili per il monitoraggio dell'inquinamento marino. Procedure standard per i test di fecondazione e di sviluppo embrionale sono state messe a punto per le specie della costa orientale (*Arbacia punctulata*, *Strongylocentrotus droebachiensis*) e per quelle della costa occidentale (*Strongylocentrotus purpuratus*, *Strongylocentrotus droebachiensis*, *Dendraster excentricus*) degli Stati Uniti (USEPA, 1994, 1995, 2000 ; ASTM, 1995, 2004) e per il Canada (Environment Canada, 1992).

In Italia, la specie autoctona *Paracentrotus lividus*, ha trovato applicazione in campo ecotossicologico in particolare per quanto riguarda lo studio degli effetti sulla fecondazione e sullo sviluppo embrionale (difetti nello sviluppo e aberrazioni mitotiche) di sostanze pure e di effluenti. In effetti, il saggio biologico con *P. lividus* può essere impiegato sia nella valutazione della qualità di matrici ambientali (acque e sedimenti marini) sia nella stima della tossicità di sostanze o preparati solubili in acqua di mare. In particolare, per quanto riguarda i sedimenti marini esso è compatibile con l'acqua interstiziale e l'elutriato.

Matrici acquose testate : La matrice ambientale soggetta alla valutazione ecotossicologica in questo saggio biologico è l'elutriato. L'elutriato fornisce informazioni su tutte quelle componenti estraibili in acqua. Quest'ultima rappresenta una delle matrici più indicative nello studio degli effetti della movimentazione dei fondali (ASTM, 1991 ; USACE ,1991) come nei dragaggi portuali, nei siti di discarica, ecc.

Preparazione dell'elutriato : L'elutriato è stato preparato in accordo con il protocollo standard US EPA (1991) combinando in peso quattro parti di acqua filtrata prelevata da una zona non contaminata con una parte di sedimento. Il tutto è stato messo ad agitare per 1 h a 400 giri/min. La fase liquida è stata quindi raccolta e centrifugata per 20 min a 3500 giri/min. Subcampioni di surnatante sono stati congelati e utilizzati nei vari test, in modo da impiegare sempre lo stesso campione nel corso dei vari esperimenti. Il congelamento infatti non sembra alterare in modo significativo le caratteristiche dei nutrienti (NO₃ e PO₄) della fase liquida (Clementson & Wayte, 1992) e uno studio condotto da Carr e Chapman (1995) ha permesso di verificare l'assenza di differenze significative tra la tossicità di campioni di matrici acquose appena estratte o congelate. Il congelamento è pertanto un passaggio indispensabile per garantire la confrontabilità fra i dati sperimentali, in quanto permette di stoccare adeguatamente i subcampioni rendendoli disponibili per la ripetizione del saggio in periodi diversi. L'elutriato viene testato sia non diluito (100%) che diluito, con acqua di mare filtrata a 0,45 µm alle concentrazioni finali del 25% e 50%.

Raccolta degli organismi : Per assicurare la maturità sessuale, i ricci di mare adulti vengono raccolti tra Settembre e Maggio (Fenaux, 1968). Esemplari adulti sono stati prelevati da fondali rocciosi del litorale di Livorno in una zona distante da fonti di inquinamento antropico (scarichi urbani e industriali). I ricci vengono raccolti ad una profondità tra 1 e 3 m e posti in un contenitore di plastica e ricoperti con abbondante carta bibula umida per minimizzare lo stress da trasporto ed evitare così possibili emissioni di gameti. In laboratorio gli esemplari vengono posti in una camera termostata, in acquari di vetro contenenti acqua di mare raccolta nello stesso sito di campionamento degli organismi e dotati di un sistema di aerazione e di filtraggio (20 individui per 100 l di acqua). Giornalmente vengono controllati temperatura (16±1°C), salinità (34‰ - 38‰), pH (7,8-8,2), ammoniaca e nitrati. I ricci sono stabulati negli acquari, prima dell'esecuzione del test, per almeno una settimana.

Modalità di esecuzione del test di spermiossicità : La metodologia segue il protocollo messo a punto da Dinnel et al. (1987), in accordo con le procedure standard descritte in US EPA (1991, 1994, 1995) e riprese dalla ASTM (1991, 1995) e dalla EPS (1991, 1992). La scelta di alcuni parametri utilizzati si basa su dati riportati in letteratura (Giambartolomei, 1990 ; Galarin et al., 1992 ; Arizzi Novelli et al., 2001 ; Ennas et al., 2002; Lera, Tesi 2002; Lera e Pellegrini, 2006 a ; Lera et al, 2006 b). Il saggio consiste nell'esporre un numero definito di gameti maschili per 1 h ad una sostanza tossica o ad una matrice acquosa complessa di cui si vuole valutare la tossicità. Lo scopo è di valutare l'efficacia della fecondazione rispetto a un controllo negativo.

Successivamente vengono aggiunte le uova e dopo 20 minuti il test viene bloccato con l'aggiunta di poche gocce di soluzione di Lugol al 5% (Carlo Erba, Milan). Il rapporto sperma:uova adottato è di 15000:1 con 1000 uova in 10 ml di soluzione test. Al termine delle prove vengono conteggiate le uova fecondate e calcolate le percentuali di fecondazione corrispondenti alle diverse diluizioni della matrice acquosa complessa testata. Tutte le fasi del test descritte in seguito sono da considerarsi effettuate in parallelo, sia con acqua di mare ricostituita sia con acqua di mare naturale filtrata, in modo da valutare eventuali differenze nella risposta del saggio.

Modalità di esecuzione del test di embriossicità : La fase vera e propria del test consiste nell'ottenere gli zigoti attraverso l'unione della sospensione spermatica (concentrazione desiderata) con la sospensione di uova in un rapporto spermatozoi:uova di 10:1. Lasciare il beaker a $18\pm 1^{\circ}\text{C}$ e aspettare almeno 20 min affinché possa avvenire la fecondazione delle uova. Il saggio di embriossicità viene eseguito esponendo 1 mL di soluzione di uova fecondate a 10 mL della soluzione test in cella termostatica al buio a $18^{\circ}\text{C}\pm 1$ per 72h. Normalmente gli zigoti si sviluppano e raggiungono lo stadio larvale in 48h, ma il tempo di esposizione scelto per il test, garantisce che tutti gli zigoti raggiungano lo stadio di larva (pluteo) nel controllo negativo. Il test viene fissato con poche gocce di soluzione di Lugol al 5% (Carlo Erba, Milan). La stima della percentuale di plutei normali avviene contando 100 larve. Per ottenere una stima più accurata degli effetti embriossici, si distinguono le anomalie dello sviluppo distinguendo tra plutei malformati, cioè larve sviluppate ma che presentano malformazioni scheletriche e/o all'apparato digerente, e fasi pre-larvali di blastula, gastrula, prisma e pluteo precoce, che si sono bloccate prima del raggiungimento del completo sviluppo.

Elaborazione dei risultati : L'effetto della sostanza testata, di cui si vuole valutare la tossicità, viene rilevato dalla percentuale di uova non fecondate rispetto a un controllo di acqua di mare. Come abbiamo detto in precedenza, il test viene considerato accettabile se il tasso di fecondazione del controllo oscilla tra il 70%-90%. Applicando la formula di Abbott (Finney, 1971), la percentuale di uova non fecondate in ogni camera test viene confrontata e normalizzata rispetto al controllo.

$$\text{Abbott} = (X-Y)/(100-Y) \cdot 100$$

X=% di uova non fecondate nel campione da testare Y=% di uova non fecondate nel controllo

I valori così ottenuti vengono impiegati in due elaborazioni differenti : per quanto riguarda i campioni, la loro eventuale tossicità viene valutata mediante il calcolo dell' EC20 e dell' EC50 ottenuti con lo specifico programma Tox Calc 5.0 mediante il metodo della Probit Analysis. I valori ottenuti vengono confrontati con la scala di tossicità riportata in prossimo Tabella ed il campione può essere valutato contaminato o non contaminato (ICRAM-APAT, 2007).

Scala di tossicità del saggio con *P. lividus*

EC20/EC50	Tossicità
EC20 ≥ 90%	Assente/ Trascurabile
EC20 < 90% e EC50 > 100%	Media
40% ≤ EC50 ≤ 100%	Alta
EC50 < 40%	Molto alta

Per il rame, invece, i valori di EC50 vengono ottenuti utilizzando due metodi statistici differenti : il Trimmed Spearman-Karber (Hemilton et al.,1978) e la Probit Analysis (Finney, 1971). Il valore dell'EC50 indica la concentrazione della sostanza di prova (Cu(NO3)2 x 3H2O (1000 mg/l) che causa una riduzione della fecondazione del 50% rispetto a un controllo negativo.

Per il rame, invece, i valori di EC50 vengono ottenuti utilizzando due metodi statistici differenti : il Trimmed Spearman-Karber (Hemilton et al.,1978) e la Probit Analysis (Finney, 1971). Il valore dell'EC50 indica la concentrazione della sostanza di prova (Cu(NO3)2 x 3H2O (1000 mg/l) che causa una riduzione della fecondazione del 50% rispetto a un controllo negativo.

Saggio biologico con *Phaeodactylum tricornutum* :

Phaeodactylum tricornutum è un'alga monocellulare appartenente al gruppo delle Diatomee. La specie è eurialina e cosmopolita. Il principio del test consiste nell' esporre una coltura algale pura in fase di crescita esponenziale a concentrazioni note di campione, in condizioni fisico-chimiche standardizzate e con un definito e omogeneo apporto di nutrienti. Al termine del periodo d' incubazione viene confrontata la crescita algale nel campione con quella del controllo.

I saggi biologici sono stati eseguiti seguendo i protocolli UNI EN ISO (2006), con alcune modifiche specifiche. Un'aliquota di sospensione algale in fase di crescita esponenziale è stata conteggiata tramite Coulter Counter e diluita in acqua marina di controllo, fino a ottenere la densità di cellule desiderata. Successivamente i campioni ed il controllo sono stati distribuiti in triplice replica nelle in piastre monouso sterili a 24 pozzetti e poste a incubare per 72h in camera termostatica a $20 \pm 2^\circ\text{C}$, con regime di illuminazione continua del tipo cool white e con una intensità compresa tra 7.000 e 8.000 lux. Al termine del prefissato periodo è stata determinata la densità algale di ogni pozzetto.

In base alla percentuale di inibizione della crescita algale si valuta il livello di tossicità, così come riportato nella tabella che segue. Se l'inibizione ha un valore negativo ($\leq -50\%$) si parla di biostimolazione della crescita algale che può essere dovuta a fenomeni ormetici oppure ad una elevata presenza di nutrienti. La significatività della differenza tra campione e controllo è stata calcolata tramite applicazione del test-t di Student, preceduto dal test F per l'omogeneità della varianza (Fowler e Cohen, 1993).

- il campione è stato considerato tossico quando la differenza tra campione e controllo è risultata statisticamente significativa ($p < 0,05$) e maggiore o uguale al 20%
- il campione è stato considerato biostimolante quando l'incremento della crescita dell'elutriato al 100% rispetto al controllo è risultato statisticamente significativo ($p < 0,05$) e maggiore o uguale a -50%

L'analisi dei campioni del maggio 2006 è stata condotta prevedendo 6 replicati per il controllo negativo e 3 replicati per ciascun campione ambientale testato ; in seguito, la metodologia del saggio con *P. Tricornutum* svolto presso il laboratorio di ecotossicologia della STS Livorno è stata riesaminata portando a 6 il numero di replicati anche per i campioni ambientali testati. Di conseguenza il test sui campioni dell'ottobre 2016 è stato condotto allestendo 6 replicati sia per il controllo negativo che per ciascun campione ambientale, mantenendo 3 replicati per ogni concentrazione del tossico di riferimento testata.

Per esprimere il giudizio di tossicità è stata utilizzata la scala di valutazione riportata in prossima Tabella basata sulla percentuale di Inibizione registrata testando l'elutriato all'80% (ICRAM-APAT, 2007).

Scala di tossicità utilizzata nel saggio biologico con *Phaeodactylum tricornutum*

Valutazione di Tossicità	Valore di Inibizione
Biostimolazione	$I \leq -50\%$
Inibizione Assente/Trascurabile	$-50\% < I < 20\%$
Inibizione moderata	$20\% \leq I \leq 50\%$
Inibizione Alta	$50\% \leq I \leq 80\%$
Inibizione Molto Alta	$80\% < I \leq 100\%$

8.3.2) Risultati analitici

Nel presente paragrafo si riportano i risultati analitici ottenuti per ogni parametro chimico-fisico ed ecotossicologico indagato.

➤ Risultati analisi granulometriche

Le analisi granulometriche eseguite sui campioni hanno evidenziato quanto segue :

- Nel Porto di CENTURI i 3 campioni prelevati hanno evidenziato una prevalenza della frazione sabbiosa (superando nella totalità dei campioni l'80%) ed una composizione residua suddivisa tra la frazione pelitica e quella ghiaiosa
- Nel sito di TOLONE i 3 campioni hanno evidenziato una prevalenza della frazione pelitica (60%) rispetto alla frazione sabbiosa. La frazione ghiaiosa è evidente (15%) solo nel campione POINT 1
- Nel sito di CAGLIARI i 3 campioni hanno evidenziato una prevalenza assoluta della frazione sabbiosa (80%), una residua frazione pelitica (15%) e una trascurabile percentuale di frazione ghiaiosa
- Due campioni prelevati lungo il canale dei NAVICELLI (PUNTO 1 e PUNTO 2) presentano una prevalenza della frazione pelitica (rispettivamente 60-68 %) e una residua frazione sabbiosa (rispettivamente 24-30%), mentre il terzo campione prelevato (PUNTO 3) presenta la composizione granulometrica opposta (60% sabbiosa e 27% pelitica)
- Il campione prelevato nel porto di GENOVA ha evidenziato prevalenza della frazione sabbiosa (76%) ed una restante frazione pelitica (24%). Del tutto assente la componente ghiaiosa
- Nel sito portuale di LIVORNO i campioni prelevati hanno evidenziato una composizione granulometrica differente nei 3 campioni :

I campioni prelevati dai PUNTI 1 e 3 della vasca di colmata presentano una composizione granulometrica per metà formata da sabbia (50-53%) e l'altra metà divisa tra peliti (38%) e ghiaie (8-10%) ; il campione prelevato dal PUNTO 2 presenta anch'esso una prevalenza della frazione sabbiosa (40%), ma una più evidente frazione ghiaiosa (51%) a discapito della pelitica (6 %)

Tabella di sintesi relativa alle analisi granulometriche

SINTESI Analisi granulometriche(%)			
CAMPIONE	GHIAIE/Graviers (%)	SABBIE/Sable (%)	PELITI/pélites (%)
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	0,00	92,65	7,35
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	8,14	86,82	5,04
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	8,48	89,78	1,74
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	15,59	24,33	60,08
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	1,09	38,32	60,60
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	1,79	34,82	63,39
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	5,17	72,41	22,41
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	5,64	81,77	12,59
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	1,24	86,04	12,72
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	15,59	24,33	60,08
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	0,54	30,83	68,63
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	13,49	59,52	26,99
GENOVA 1 (26/06/2017);	0,00	76,48	23,52
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	10,62	50,92	38,46
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	51,67	41,67	6,67
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	8,13	53,11	38,76

➤ **Risultati analisi chimiche : concentrazione dei metalli e sostanza organica**

Si riportano nella tabella sottostante i risultati delle concentrazioni dei metalli e della frazione di sostanza organica rilevati nei campioni di sedimento prelevati [mg/kg peso secco, µg/kg peso secco per Hg, % per sostanza organica S.O.].

CAMPIONE	METALLI														S.O.
	Al	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg*	Mn	Mo	Ni	Pb	V	Zn	[%]
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	5079	5,1	7,7	0,2	137	38,9	9502	16,1	177	3,9	101	27,1	24,6	104	4,28
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	8078	5,8	11,5	0,3	245	56,0	17028	16,1	316	4,5	200	36,7	33,7	160	3,60
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	5262	6,3	8,6	0,1	92,8	12,3	8189	11,1	162	2,1	70,0	16,0	24,7	56,2	1,50
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	7154	10,7	41,2	0,2	11,8	14,7	7562	251	109	2,9	9,80	56,8	16,9	74,1	2,78
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	7048	9,3	43,0	0,2	11,9	15,8	7755	293	114	2,9	10,0	57,7	16,5	76,2	2,96
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	7515	9,5	48,0	0,2	12,9	17,4	8499	301	122	2,9	10,8	59,1	18,0	79,0	2,87
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	9488	12,9	819	1,6	16,6	44,2	9117	391	131	3,9	10,5	164	23,9	236	3,52
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	6155	15,7	453	1,9	11,4	55,3	7290	450	122	2,7	7,90	151	17,7	344	2,17
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	5272	15,3	249	1,9	9,90	46,7	7227	220	120	2,9	10,8	124	16,8	330	2,34
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	20061	8,4	270	17,9	179	97,0	25951	293	498	13	62,3	142	48,2	675	6,27
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	28300	9,7	119	2,3	96,5	59,1	35458	162	565	2,7	80,2	70,5	58,8	176	5,63
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	12410	3,8	37,5	0,7	43,3	27,6	16042	152	188	1,6	35,0	29,5	26,8	83,6	2,40
GENOVA 1 (26/06/2017);	7880	9,7	44,2	0,3	50,6	37,2	14092	353	616	1,0	36,7	52,5	16,8	103	1,37
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	10987	11,3	52,5	0,2	43,6	17,6	14014	40,4	613	1,1	34,8	25,2	29,4	57,3	1,46
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	6136	17,6	27,6	0,1	24,8	16,8	13026	30,7	294	4,3	24,2	22,5	17,7	60,3	2,03
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	8331	10,0	41,9	0,2	13,0	15,6	7894	243	108	2,8	10,9	59,1	18,8	83,1	2,10

- Nel sito di CENTURI, i 3 campioni hanno evidenziato mediamente una contaminazione prevalentemente rappresentata dalla concentrazione dei seguenti elementi :
Pb > L1 (campione nr.2)
Hg \approx L1 (campione nr.3)
- Nel sito di TOLONE, i 3 campioni hanno evidenziato mediamente una contaminazione prevalentemente rappresentata dalla concentrazione dei seguenti elementi :
Cr > L2 (campione nr.2)
Zn > L2 (campione nr.2)
Cu > L2 (campione nr.2)
Ni > L2 (campione nr.1,2)
Pb > L1 (campione nr.2)
- Nel sito di CAGLIARI i 3 campioni hanno evidenziato mediamente una contaminazione prevalentemente rappresentata dalla concentrazione dei seguenti elementi :
Zn > L2 (campione nr.1,2,3)
Cd > L2 (campione nr.1,2,3)
Pb > L2 (campione nr.1,2,3)
Cu > L2 (campione nr.2) Cu > L1 (campione nr.1,2,3)
As > L1 (campione nr.1,2,3)
Hg > L1 (campione nr.1,2)
Ba elevato (campione nr.1,2)
- Nel sito di NAVICELLI i 3 campioni hanno evidenziato mediamente una contaminazione prevalentemente rappresentata dalla concentrazione dei seguenti elementi :
Cr > L2 (campione nr.1) Cr > L1 (campione nr.2)
Ni > L2 (campione nr.2) Ni > L1 (campione nr.1,3)
Zn > L2 (campione nr.1,2)
Cu > L2 (campione nr.1,2)
Cd > L2 (campione nr.1,2) Cd > L1 (campione nr.3)
Pb > L1 (campione nr.1,2)
Al elevato (campione nr.1,2)
Mn elevato (campione nr.1,2)
Fe elevato (campione nr.1,2)
V elevato (campione nr.1,2)
Mo elevato (campione nr.1)

- Nel sito di GENOVA il campione ha evidenziato mediamente una contaminazione prevalentemente rappresentata dalla concentrazione dei seguenti elementi :
 Ni>L1
 Zn>L1
 Pb>L1
 Hg>L1
 Mn elevato

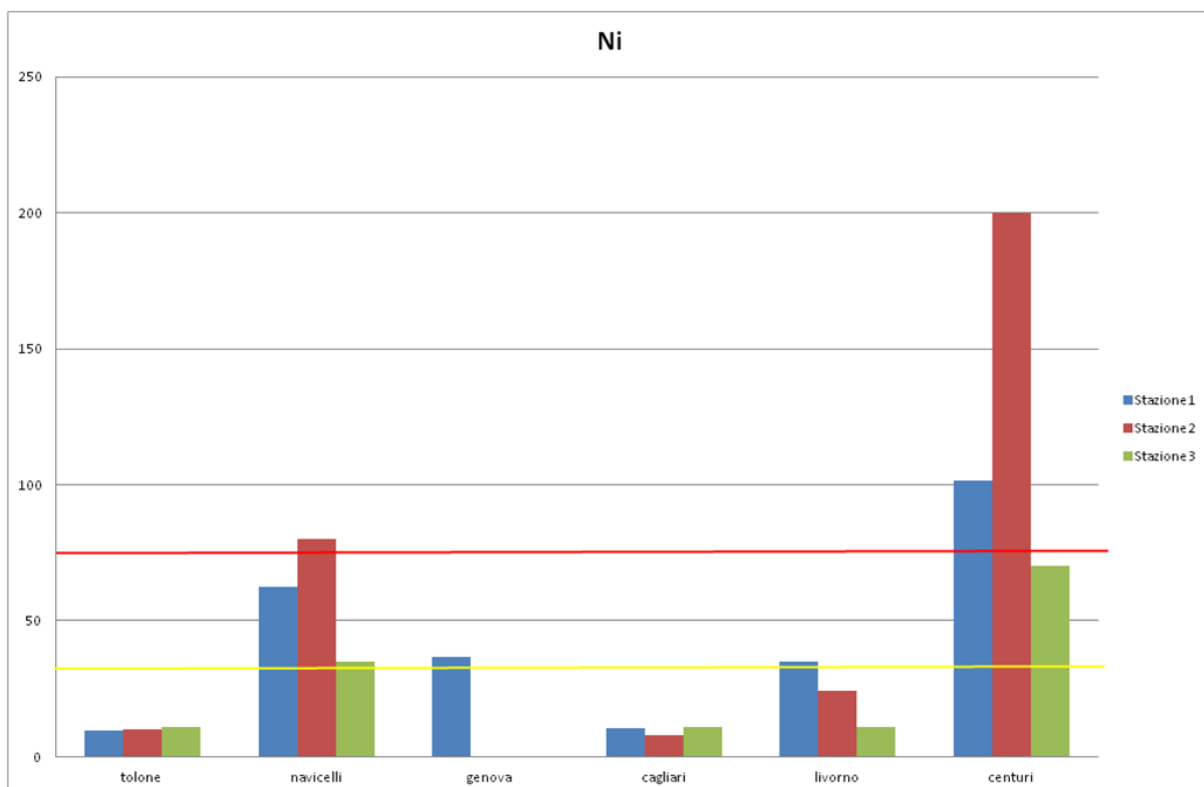
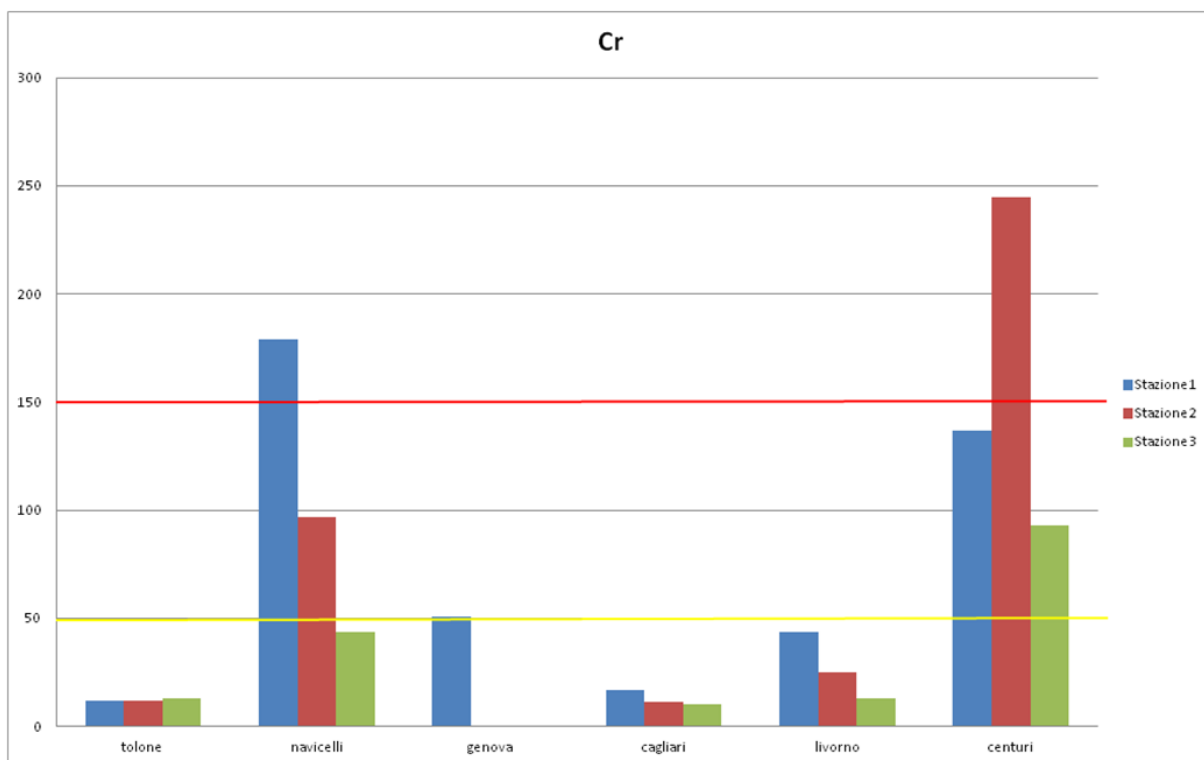
- Nel sito di LIVORNO i 3 campioni hanno evidenziato mediamente una contaminazione prevalentemente rappresentata dalla concentrazione dei seguenti elementi :
 Ni>L1 (campione nr.1)
 As>L1 (campione nr.2)
 Pb>L1(campione nr.3)
 Mn elevato (campione nr.1)

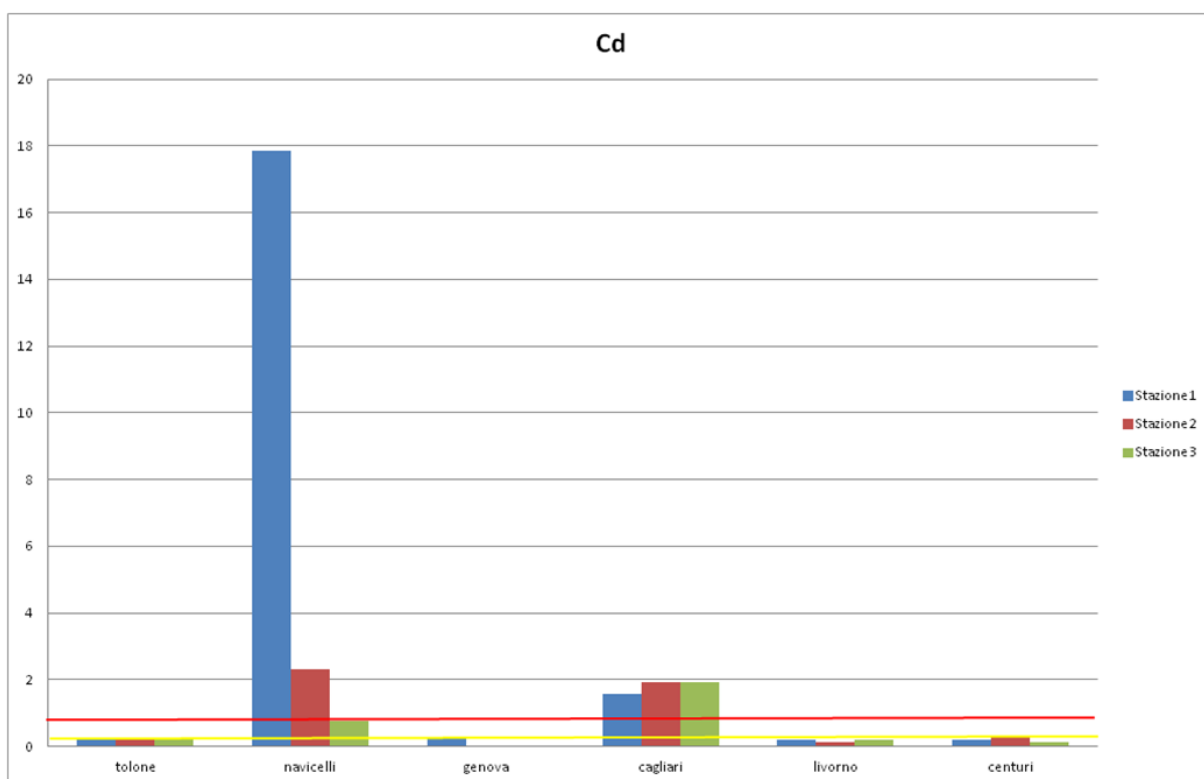
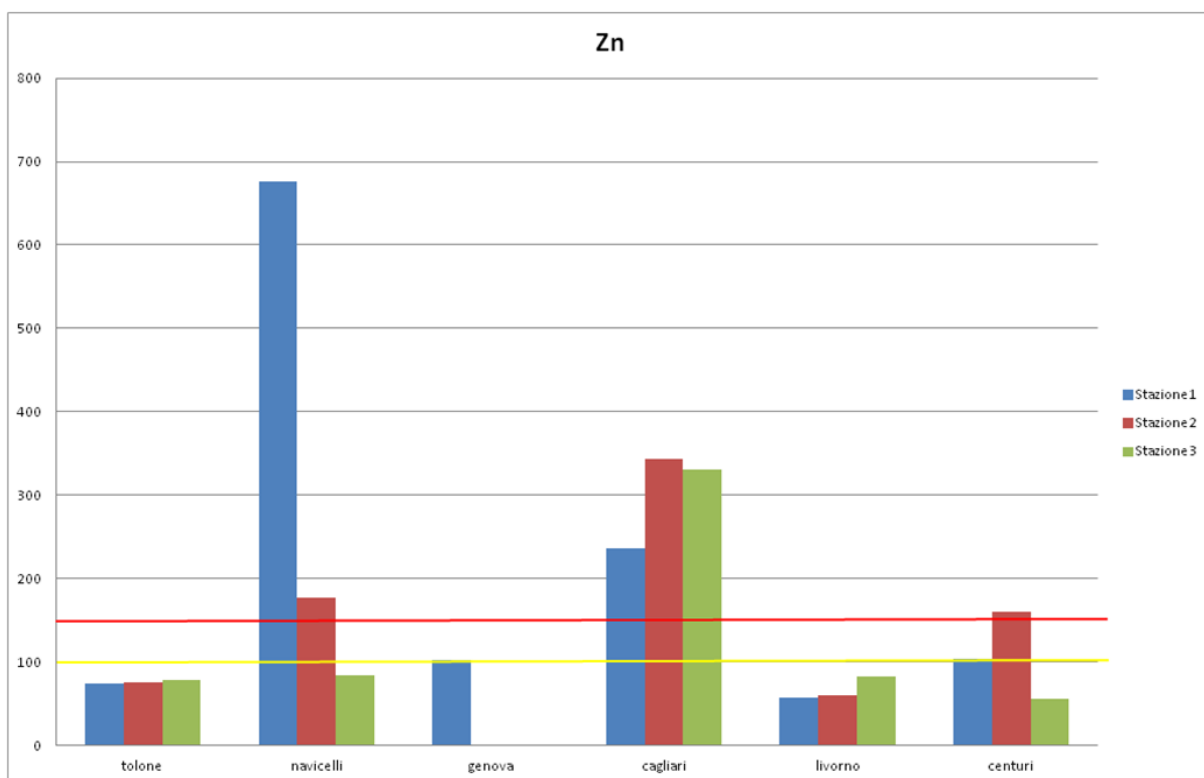
Per la rappresentazione della concentrazioni dei metalli riportate di seguito, si evidenziano nei relativi grafici illustrativi i limiti normativi vigenti (D.M. 173/2016), così come recepito anche dall'IMO (International Maritime Organization) e riportati nella tabella sottostante :

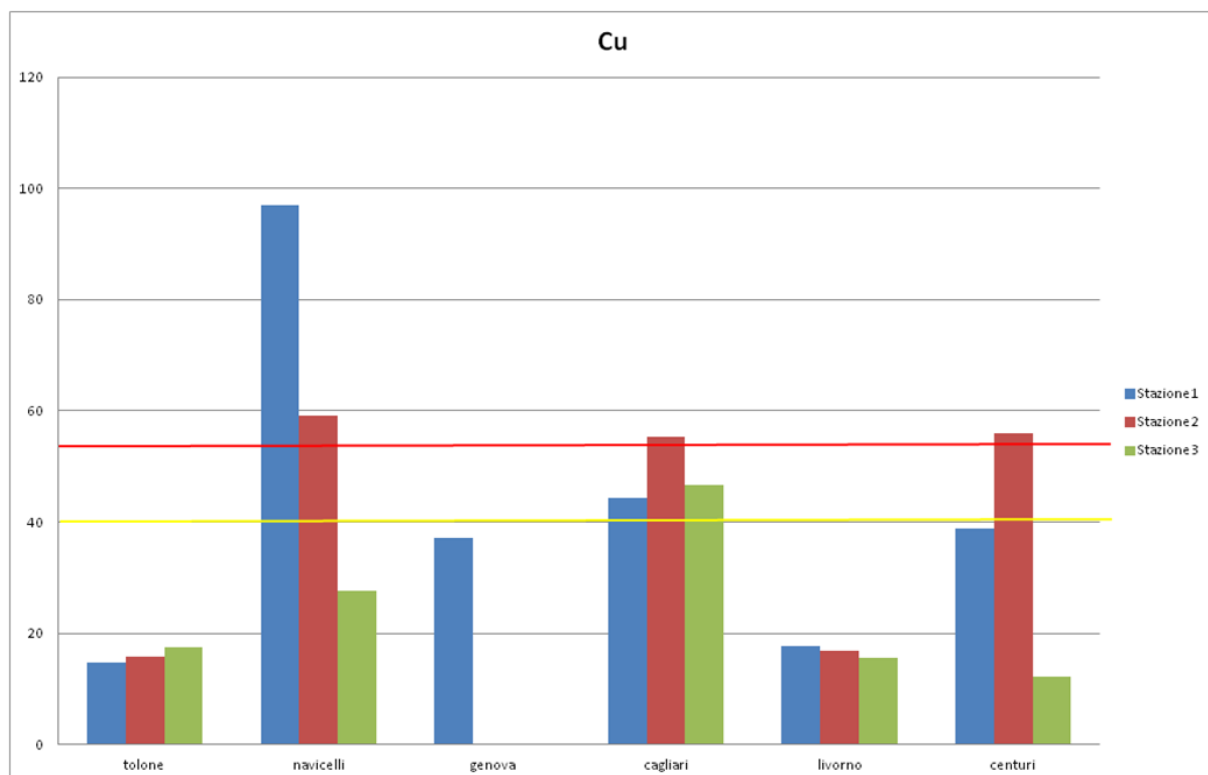
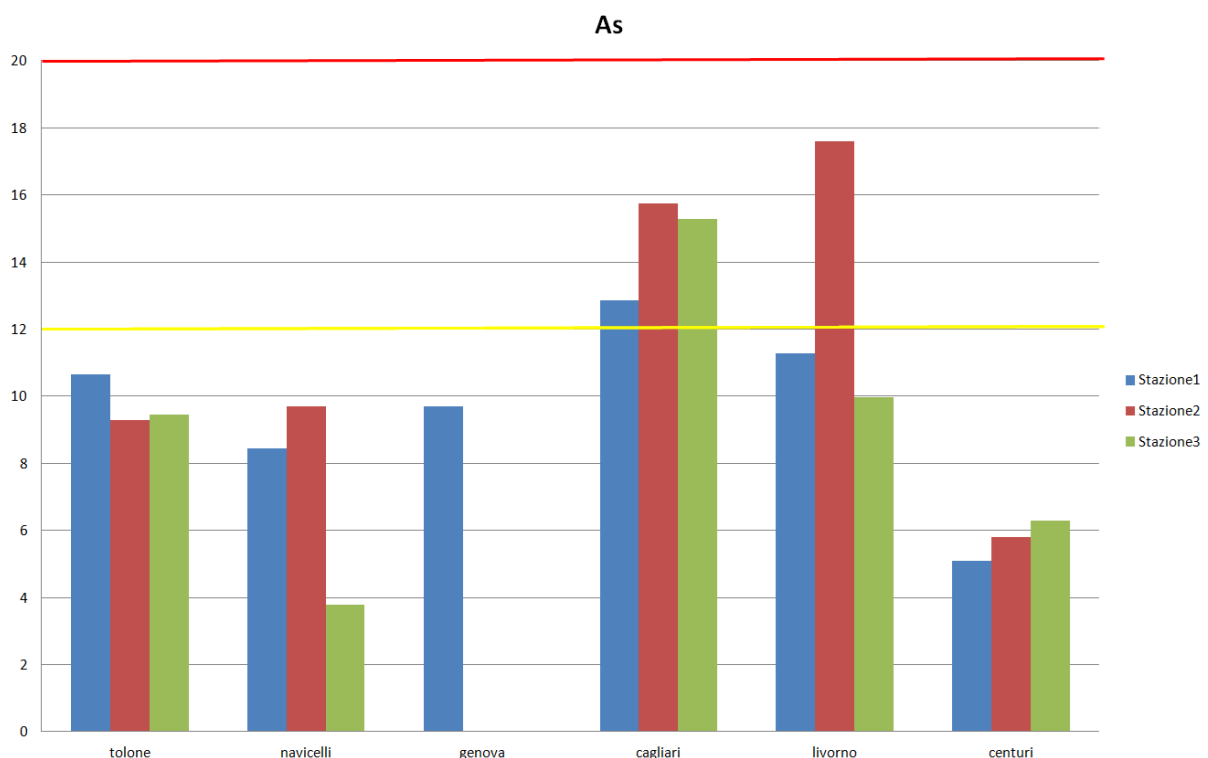
	L1	L2
Trace elements	[mg kg⁻¹] dry weight	
Arsenic	12	20
Cadmium	0.3	0.8
Chromium	50	150
Chromium VI	2	2
Copper	40	52
Mercury	0.3	0.8
Nickel	30	75
Lead	30	70
Zinc	100	150
Organic contaminants	[µg kg⁻¹] dry weight	
Organotin compounds	5 (TBT)	72 (MBT, DBT, TBT)
Σ PCB*	8	60
Σ 2,4'-4,4' DDD	0.8	7.8
Σ 2,4'-4,4' DDE	1.8	3.7
Σ 2,4'-4,4' DDT	1.0	4.8
Chlordane	2.3	4.8
Aldrin	0.2	10
Dieldrin	0.7	4.3
Endrin	2.7	10
a-HCH	0.2	10
b-HCH	0.2	10
γ-HCH (Lindane)	0.2	1.0
Heptachlor epoxide	0.6	2.7
HCB	0.4	50
Petroleum Hydrocarbon C>12	Not available	50000
ΣPAHs16	900	4000
Anthracene	24	245
Benzo[a]anthracene	75	500
Benzo[a]pyrene	30	100
Benzo[b]fluoranthene	40	500
Benzo[k]fluoranthene	20	500
Benzo[g,h,i]perylene	55	100
Crysene	108	846
Indenopyrene	70	100
Phenanthrene	87	544
Fluorene	21	144
Fluoranthene	110	1494
Naphtalene	35	391
Pyrene	153	1398
T.E. PCDD,PCDF and Dioxin Like PCBs	2 x 10 ⁻³	1 x 10 ⁻²

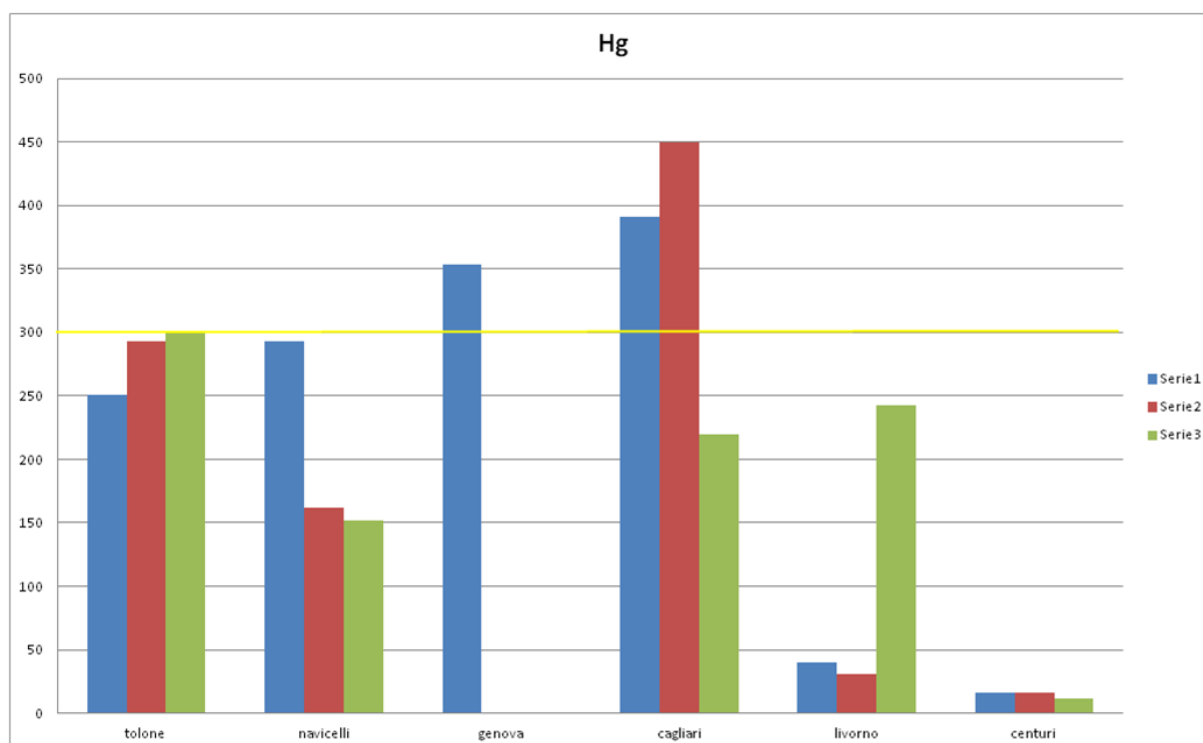
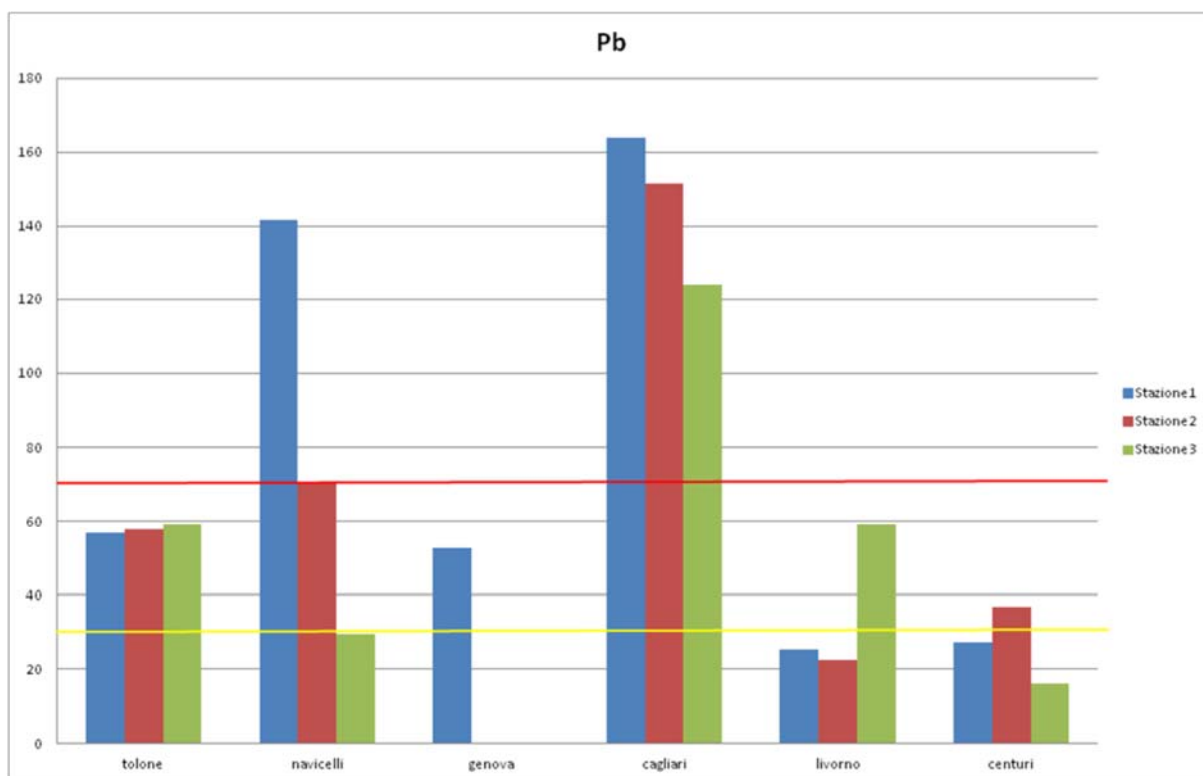
**Limiti normativi
 D.M. 173/2016 –
 L1 / L2**

* Sum of CB: 28, 52, 77, 81, 101, 118, 126, 128, 138, 153, 156, 169, 180.









➤ **Risultati analisi chimiche : concentrazione dei TBT e composti organostannici**

Si riportano nella tabella sottostante i valori riscontrati per le concentrazioni dei TBT e dei composti organostannici espressi in ng Sn.g⁻¹ (p.s.) :

CAMPIONE	ng TBT g ⁻¹ d.w.	TBT ng Sn g ⁻¹ d.w.	ng DBT g ⁻¹ d.w.	DBT ng Sn g ⁻¹ d.w.	ng MBT g ⁻¹ d.w.	MBT ng Sn g ⁻¹ d.w.
TOULON 1	<4	<2	<8	<4	<6	<4
TOULON 2	<4	<2	<8	<4	<6	<4
TOULON 3	<4	<2	<8	<4	<6	<4
CENTURI 1	355	145	35	18	15	10
CENTURI 2	91	37	27	14	21	14
CENTURI 3	<4	<2	<8	<4	<6	<4
GENOVA 1	70	29	37	19	14	9
NAVICELLI 1	1180	483	220	112	58	39
NAVICELLI 2	56	23	47	24	15	10
NAVICELLI 3	48	20	29	15	13	9
LIVORNO 1	10	4	<8	<4	18	12
LIVORNO 2	8	3	<8	<4	9	6
LIVORNO 3	8	3	<8	<4	8	5
CAGLIARI 1	68	28	21	11	14	9
CAGLIARI 2	21	9	<8	<4	<6	<4
CAGLIARI 3	6	3	<8	<4	<6	<4

Concentrazione dei TBT espressi in ng Sn g-1 (p.s.)

➤ **Risultati analisi chimiche : concentrazione degli Idrocarburi**

Si riportano nelle tabelle seguenti le concentrazioni degli Idrocarburi Policiclici Aromatici espressi come singoli congeneri, come sommatorie e come idrocarburi leggeri e pesanti.

CAMPIONE/ Echantillon	Naftale ne	Acena ftilene	1- metilnaft alene	2- metilna ftalene	Acenaft ene	Fluore ne	Fenantr ene	Antrace ne	Fluoran tene	Pirene
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1.23	< 0.5	< 0.05	16.08	4.90
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	3.59	< 0.5	0.37	8.69	1.55
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	< 0.05	2.63	0.59
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	11.14	14.49	< 0.5	36.20	265.68	146.49
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	19.13	< 0.5	52.91	88.25	298.57
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	24.04	< 0.5	75.02	923.73	379.92
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	7.41	< 0.5	1.56	31.04	18.61
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	8.60	< 0.5	2.37	41.64	41.07
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	6.25	< 0.5	4.93	42.67	28.85
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	23.59	317.80	189.77
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	36.75	313.00	159.63
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	0.76	5.95	3.03
GENOVA 1 (26/06/2017)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	2.89	24.91	13.97
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	17.32	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	1.96	12.45	10.90
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	13.61	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	< 0.05	< 0.05	0.90
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	29.28	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	0.09	4.12	0.83

Concentrazione degli idrocarburi espressi in ng/g (p.s.)

CAMPIONE/ Echantillon	Benzo (a) antracene	Crisene	7,12- dimeti lbenzo (a)ant racene	Benzo(b)fluorantene	Benzo(k)fluorantene	Benzo(a)pirene	Dibenzo(a,h)antracene	Benzo(g,h,i)perilene	Indeno(1,2,3-cd)pirene
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	< 0.01	< 0.01	< 0.05	3.16	0.30	0.56	3.05	1.57	0.25
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	< 0.01	1.87	< 0.05	1.32	0.62	0.67	1.91	2.27	< 0.01
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	< 0.01	2.60	< 0.05	0.46	0.30	0.34	1.18	0.72	0.09
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	113.08	110.69	< 0.05	144.22	132.80	108.11	30.73	90.22	75.01
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	231.43	175.42	< 0.05	213.86	211.77	173.11	49.75	143.77	117.71
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	343.37	283.02	< 0.05	285.80	290.53	232.90	58.71	177.97	143.56
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	13.08	18.82	< 0.05	13.97	12.68	8.31	3.96	7.83	7.00
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	39.25	29.84	< 0.05	30.25	32.58	22.85	7.67	18.86	15.33
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	28.27	23.52	< 0.05	26.17	27.23	20.25	6.98	17.24	14.44
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	34.61	187.76	69.22	38.03	21.58	10.64	3.25	5.77	4.66
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	60.88	50.73	52.32	30.50	26.47	21.63	6.01	14.20	6.16
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	3.04	2.04	7.33	3.21	1.87	1.32	1.75	2.35	0.61
GENOVA 1 (26/06/2017)	9.96	9.80	17.46	14.83	15.04	11.28	4.17	10.47	9.80
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	12.45	13.76	< 0.05	17.03	14.62	10.62	4.45	11.02	10.68
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	0.83	2.02	< 0.05	1.74	1.34	0.80	1.16	1.30	0.35
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	0.65	1.56	< 0.05	3.74	2.12	1.42	1.22	3.12	2.01

Concentrazione degli idrocarburi espressi in ng/g (p.s.)

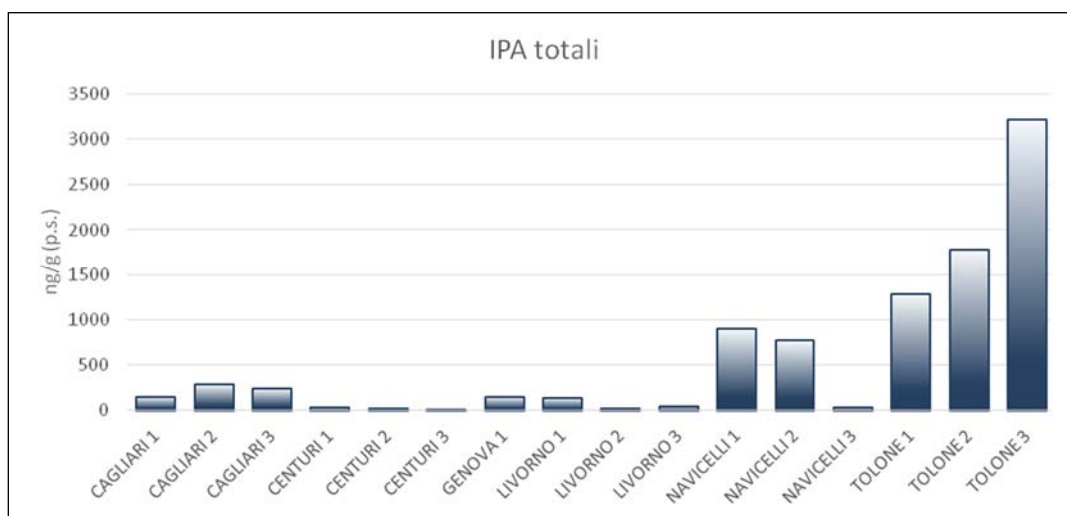
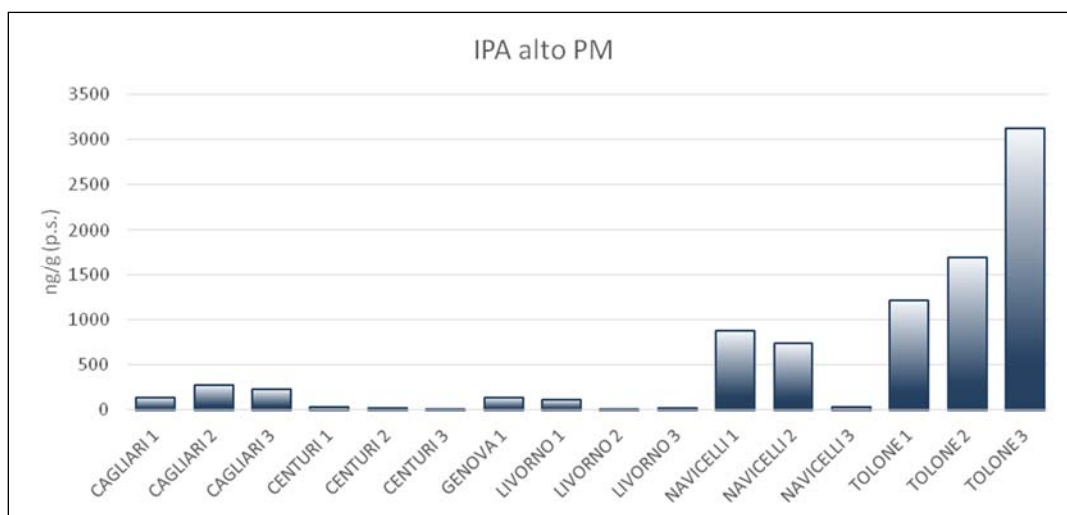
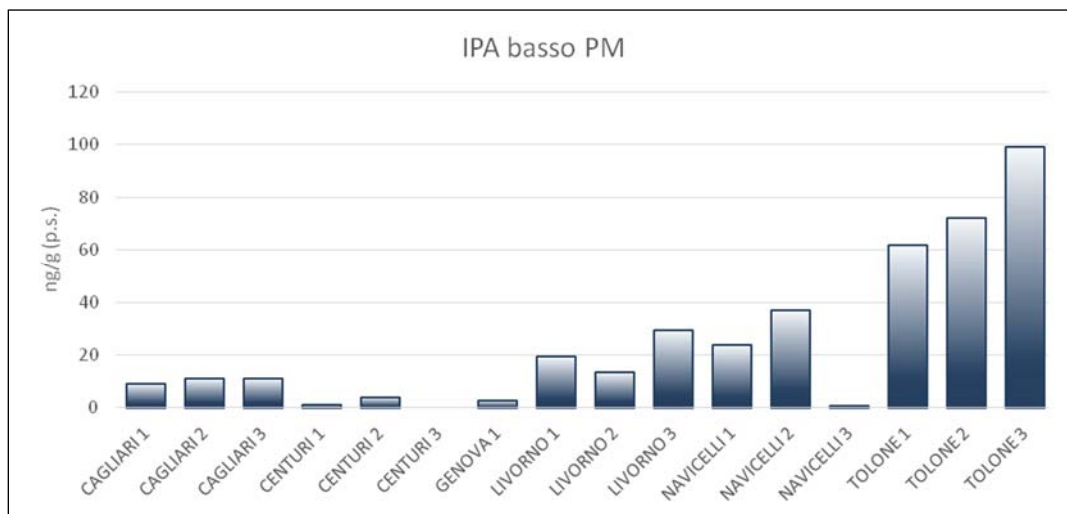
CAMPIONE/ Echantillon	IPA basso PM	IPA alto PM	IPA totali
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	1.23	29.87	31.10
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	3.96	18.89	22.86
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	< 0.1	8.90	8.90
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	61.83	1217.03	1278.86
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	72.04	1703.64	1775.68
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	99.06	3119.50	3218.56
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	8.97	135.31	144.28
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	10.97	279.34	290.31
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	11.18	235.62	246.79
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	23.59	883.10	906.69
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	36.75	741.51	778.26
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	0.76	32.51	33.27
GENOVA 1 (26/06/2017)	2.89	141.69	144.58
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	19.27	117.98	137.26
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	13.61	10.45	24.06
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	29.37	20.79	50.16

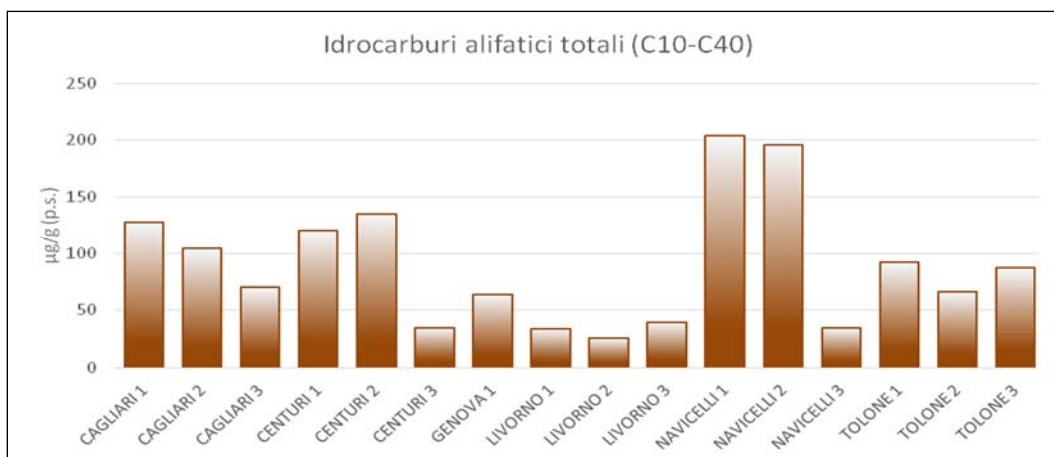
Concentrazione degli IPA espressi in ng/g (p.s.)

CAMPIONE/ Echantillon	Idrocarburi totali (C10- C40)	>C10- C12	>C12- C14	>C14- C16	>C16- C18	>C18- C20	>C20- C22	>C22- C24	>C24- C26	>C26- C28	>C28- C30	>C30- C32	>C32- C34	>C34- C36	>C36- C38	>C38- C40
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	120.77	0.37	0.73	6.04	19.18	20.68	14.08	9.96	3.01	1.63	0.73	6.41	6.92	7.69	23.34	< 0.01
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	134.98	0.85	1.16	10.88	10.35	9.47	12.17	5.06	3.47	1.24	2.83	15.29	17.49	14.96	< 0.01	29.78
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	34.77	< 0.01	0.27	3.08	2.97	3.47	4.36	0.89	0.82	0.57	0.38	2.99	1.41	1.82	11.45	0.29
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	92.19	1.03	1.57	6.69	8.31	7.64	11.16	3.78	3.82	1.71	5.66	9.36	11.09	3.45	16.92	< 0.01
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	65.95	0.03	0.39	4.33	5.68	6.31	11.33	3.09	4.85	1.78	5.58	1.78	5.83	2.23	12.75	< 0.01
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	86.92	1.05	1.03	5.65	7.07	7.08	10.13	2.72	4.73	1.91	8.69	6.78	11.67	2.99	15.28	0.16
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	127.99	0.43	1.48	8.20	9.13	4.12	5.47	2.48	2.38	2.91	8.87	18.44	34.27	12.24	16.73	0.85
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	104.51	0.57	1.28	6.16	5.82	4.84	6.38	1.38	3.44	5.79	8.93	18.48	14.21	10.75	< 0.01	16.46
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	70.49	0.16	0.66	4.00	6.14	6.14	6.23	2.19	2.14	1.96	4.64	9.07	6.26	4.08	16.11	0.69
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	204.20	1.13	3.46	16.25	38.84	54.96	38.90	5.77	3.11	2.20	3.38	6.10	5.46	5.04	18.86	0.73
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	195.48	0.72	2.11	10.58	16.48	20.40	17.64	6.94	4.13	5.09	12.62	19.21	32.78	20.49	25.15	1.15
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	34.46	0.01	0.35	2.95	4.07	3.87	4.25	0.74	1.12	0.46	0.55	0.86	0.90	2.11	12.22	< 0.01
GENOVA 1 (26/06/2017)	63.81	0.38	1.18	7.05	5.19	5.34	6.92	1.04	1.98	0.96	1.74	8.25	4.89	16.03	2.86	< 0.01
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	33.75	0.80	0.54	3.23	4.84	3.65	3.31	1.26	0.83	0.74	0.65	0.87	0.90	1.64	10.49	< 0.01
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	25.66	< 0.01	0.21	2.44	2.68	2.77	2.49	0.73	0.67	0.28	0.25	0.63	0.49	10.15	1.88	< 0.01
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	39.17	0.17	0.33	2.65	3.82	3.54	4.09	1.83	2.00	0.79	0.77	0.82	2.01	2.40	13.94	< 0.01

Concentrazione degli idrocarburi espressi in µg/g (p.s.)

Si riportano sotto a scopo illustrativo i grafici relativi alle analisi degli idrocarburi :





➤ **Risultati analisi chimiche : concentrazione dei PCB**

In tabella seguente, si riportano le concentrazioni rilevate per i policlorobifenili espressi in ng/g (p.s.) :

CAMPIONE/ Echantillon	PCB 28	PCB 52	PCB 101	PCB 118	PCB 138	PCB 153	PCB 180
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
GENOVA 1 (26/06/2017);	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

Concentrazione dei PCB espressi in ng/g (p.s.)

8.4) RISULTATI ANALISI ECOTOSSICOLOGICHE

In tabella vengono riportati i giudizi di tossicità (secondo quanto riportato nel paragrafo materiali e metodi) relativi alle analisi ecotossicologiche condotte :

CAMPIONE/ Echantillon	ANALISI ECOTOSSICOLOGICA		
	Inibizione della crescita dell'alga <i>Phaeodactylum tricorutum</i>	test sviluppo embrionale del Riccio di mare <i>Paracentrotus lividus</i>	MTX <i>Vibrio fischeri</i>
CENTURI POINT 1 (30/05/2017)	Assente/Trascurabile	Alta *	Assente/Trascurabile
CENTURI POINT 2 (30/05/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
CENTURI POINT 3 (30/05/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
TOULON POINT 1 (06/06/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
TOULON POINT 2 (06/06/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
TOULON POINT 3 (06/06/2017)	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile	Assente/Trascurabile
CAGLIARI PUNTO 1 (07/06/2017)	Assente/Trascurabile	Alta	Assente/Trascurabile
CAGLIARI PUNTO 2 (07/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Assente/Trascurabile
CAGLIARI PUNTO 3 (07/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Assente/Trascurabile
NAVICELLI PUNTO 1 (08/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Moderata
NAVICELLI PUNTO 2 (08/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Assente/Trascurabile
NAVICELLI PUNTO 3 (08/06/2017)	Assente/Trascurabile	Molto Alta	Moderata
GENOVA 1 (26/06/2017);	Assente/Trascurabile	Moderata	Assente/Trascurabile
LIVORNO PUNTO 1 (29/06/2017)	Assente/Trascurabile	Moderata	Assente/Trascurabile
LIVORNO PUNTO 2 (29/06/2017)	Assente/Trascurabile	Alta	Assente/Trascurabile
LIVORNO PUNTO 3 (29/06/2017)	Assente/Trascurabile	Alta	Assente/Trascurabile

Giudizi di tossicità relativi alle analisi ecotossicologiche

CONCLUSIONI :

Vengono riportati in APPENDICE i risultati ottenuti ed elaborati dai laboratori ISPRA ed INSA, confrontati e commentati in sede di riunioni e Comitati Tecnici.

Dal confronto e dalla valutazione incrociata di tali risultati sono stati individuate le aree ed i quantitativi di sedimento da avviare alle successive fasi di trattamento pilota.

Sono stati quindi individuati i seguenti quantitativi di sedimento :

- ✓ 15 tonnellate da prelevare dal sito contrassegnato dalla sigla "CENTURI POINT 1" nel porto di CENTURI
- ✓ 5 tonnellate da prelevare dal sito contrassegnato dalla sigla "LIVORNO POINT 1" nel porto di LIVORNO
- ✓ 13 tonnellate da prelevare dal sito contrassegnato dalla sigla "CAGLIARI POINT 1" nel porto di CAGLIARI
- ✓ 10 tonnellate da prelevare dal sito contrassegnato dalla sigla "TOLONE POINT 1" nel porto di TOLONE
- ✓ 5 tonnellate da prelevare dal sito contrassegnato dalla sigla "NAVICELLI POINT 1" nel Canale dei Navicelli (Pisa)
- ✓ 50 kg da prelevare dal punto di prelievo "GENOVA 1" sito portuale di Genova

8.5) FASE DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

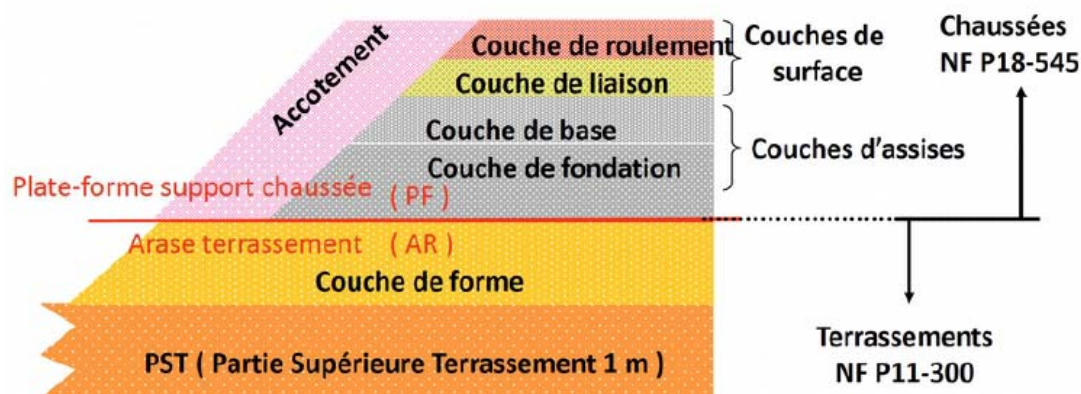
8.5.1) Obiettivi

La caratterizzazione geotecnica è stata finalizzata a valutare l'utilizzabilità dei materiali di dragaggio come materiale da costruzione, in particolare per usi stradali, adottando i criteri previsti dalla normativa francese e da quella italiana.

8.5.2) Struttura stradale di riferimento in Francia e in Italia

Nelle figura che segue è schematizzata la struttura tipica stradale secondo gli schemi francesi. In Francia sono due le norme che regolano l'utilizzo dei materiali geologici :

- la NF P18-545, per i materiali granulari con elevate prestazioni meccaniche, che costituiscono lo strato di fondazione e gli strati legati; Si tratta di materiali non nei dragaggi oggetto di scavo e non saranno oggetto di approfondimento.
- la NF P11-300 per i materiali utilizzati per la costruzione di rilevati e stati intermedi tra il piano di scavo e la fondazione (couches de forme)

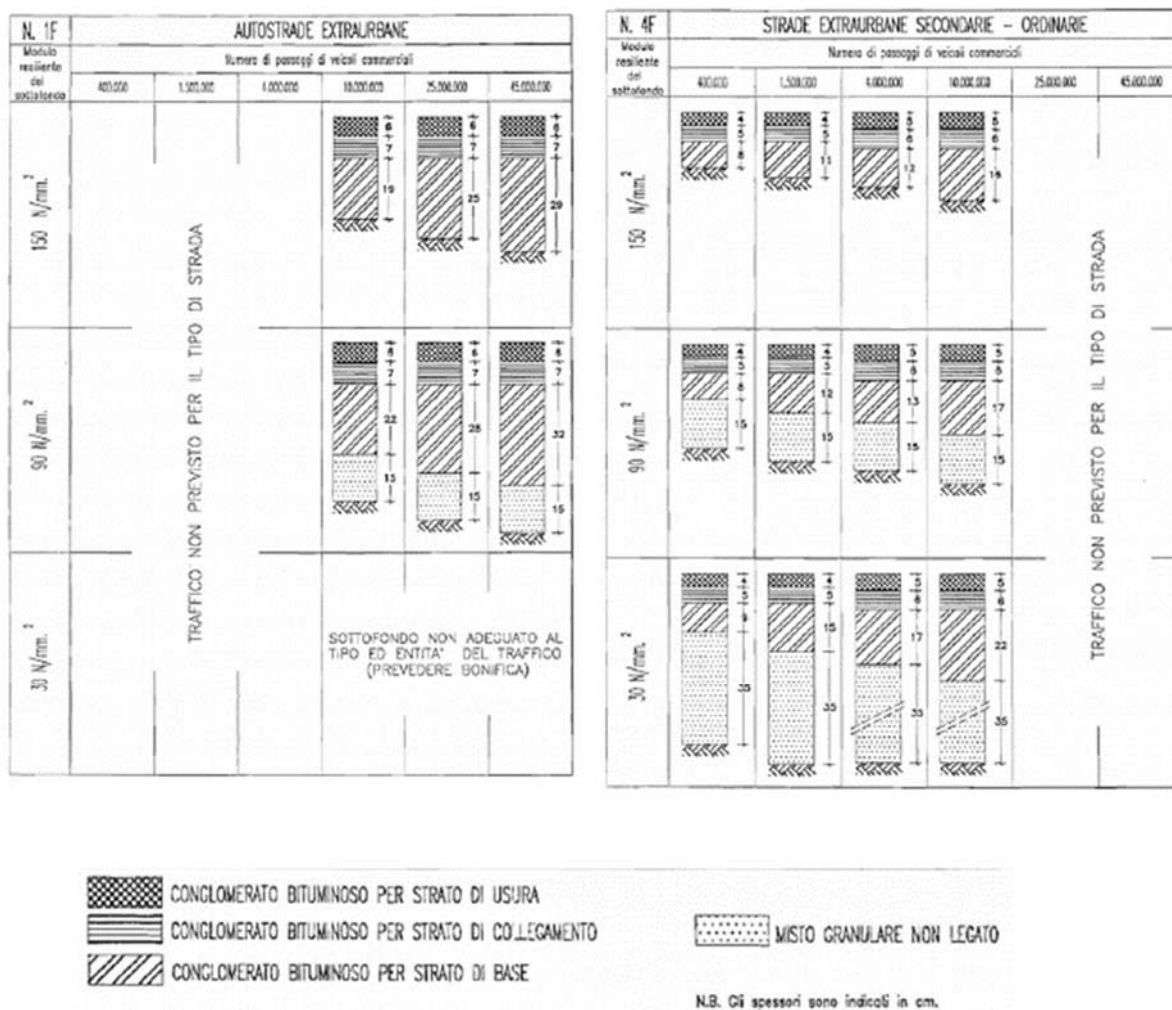


In Italia, lo schema generale di sovrastruttura stradale, non prevede in modo esplicito uno strato (*couche de forme*) tra terreno naturale di fondo scavo (Partie Supérieure Terrassement) e strato di fondazione.

Con terreni di sottofondo di tipo argilloso è spesso previsto uno strato di sabbia, con funzione "anticontaminante", perchè deve evitare che l'argilla si infiltri nel materiale granulare della fondazione. La sua funzione è ormai sostituita dal geotessile.

Nel caso di terreno naturale di sottofondo di cattiva qualità, se ne prevede la "bonifica", ossia la sostituzione del terreno in posto, con una terra di caratteristiche migliori su cui far poggiare la fondazione. È probabilmente questo il caso in cui si può parlare di *couche de forme* anche in Italia.

Per quanto riguarda lo schema costruttivo, nel 1998 il Centro Nazionale delle Ricerche (CNR) ha introdotto con, con il Bollettino Ufficiale n° 178, il "Catalogo delle fondazioni stradali" che fornisce, in funzione delle condizioni geotecniche del sottofondo, rappresentate dal modulo resiliente (M_r) determinato secondo la AASHTO T274-82 e del tipo di traffico, pacchetti tipo di sovrastruttura stradale.



A titolo d'esempio si presentano alcuni pacchetti tipo previsti dal Catalogo in differenti condizioni di sottofondo e traffico. Oltre che con le modalità della AASHTO T274-82, il valore di M_r la norma tecnica ammette l'utilizzo delle seguenti correlazioni tra il modulo di reazione K o l'Indice CBR.

Mr= 150 N/mm ²	CBR= 15%	K= 100 KPa/mm
M= 90 N/mm ²	CBR = 9%	K=60 KPa/mm
Mr= 30 N/mm ²	CBR= 3%	K=20 KPa/mm

Per quanto riguarda le caratteristiche dello strato di fondazione, costituito da inerti non legati, è previsto che il valore dell'indice CBR di un campione costipato sino ad una densità di almeno il 98% di quella AASHO Modificata (Proctor modificata) dopo immersione in acqua per 4 giorni sia uguale o maggiore del 30%.

Le caratteristiche previste dalle norme tecniche, sia francesi che italiane (granulometria, elevata resistenza Los Angeles, e insensibilità all'acqua) non sono presenti nei sedimenti prelevati nei porti interessati dal progetto.

I sedimenti possono invece essere classificati per verificare la loro utilizzabilità per la costruzione di rilevati, terre di sottofondo o couche de forme.

8.5.3) Norme tecniche di riferimento – confronto tra norma francese e norma italiana

Per quanto riguarda la normativa francese ci si è riferiti alla GTR 92 Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des couches de forme, del “*Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC)*” e del “*Service d'études sur les transports (SETRA)*”. La norma è la NF-P 11 300, del settembre 1992, che propone una classificazione delle terre utilizzabili nelle costruzioni stradali.

In Italia si utilizza la norma CNR⁶ UNI⁷ 10006 CNR-UNI 10006 “Costruzione e manutenzione delle strade, Tecniche di impiego delle terre”, del 1963, che adotta i criteri della norma americana **HRB-AASHO M 145 – 49** per la classificazione dei terreni ad uso stradale. L'utilizzo di tale norma è prescritto dal “Capitolato Speciale Tipo elaborato dal Ministero Infrastrutture e Trasporti che è di riferimento per i capitolati stradali dell'Ente Nazionale per le Strade (ANAS) e dalle Società Autostrade⁸ e degli altri Enti proprietari di strade.

6 CNR: Consiglio Nazionale delle Ricerche

7 UNI: Ente Italiano di Normazione

8 L'ente nazionale di normazione (UNI) ha formalmente ritirato la norma sostituendola con versioni successive. Tali versioni sono risultate non adeguate all'uso specifico e, pertanto, il riferimento ufficiale al momento rimane la CNR UNI 10006 del 1963

- **Norma Francese** : La norma francese classifica le terre in gruppi e sottogruppi in funzione di tre categorie di prove :

2. les essais d'identification ou de nature		La granularité l'indice de plasticité la valeur au bleu (méthylène) du sol (VBS) sur la fraction 0/50mm
2. les essais d'état	Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol, mais fonction de l'environnement L'état très humide (th) L'état humide (h) L'état d'humidité moyenne (m) L'état sec (s) L'état très sec (ts)	On peut utiliser l'un ou l'autre des trois paramètres suivants: * La position de la teneur en eau naturelle (wn) de la fraction 0/20 mm du sol par rapport à l'Optimum Proctor Normal (wopn): wn/wopn * la position de la teneur en eau naturelle (wn) par rapport aux limites d'Atterberg wL et wp , qui s'exprime par l'indice de consistance (Ic): Ic= (wL - wn)/(wL- wp) * L'indice portant immédiat (IPI) qui exprime la valeur du poinçonnement CBR mesurée sans surcharges ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor Normal
3. les essais de comportement mécanique		La valeur LOS ANGELES (L_A) La valeur MICRO DEVAL en présence d'eau M_{DE} ou la valeur de friabilité de sables F_s

La NF P 11-300 classifica i suoli in 4 classi : Classe A: sols fins; Classe B: sols sableux ed gavelleux avec fines; Classe C: sols comportant del fines et des gros éléments; Classe D: sols insensibles à l'eau.

La classe A è distinta dalle altre classi attraverso due criteri :

- Essais d'identification ou de nature
 - dimensione massima degli elementi < 50mm
 - frazione passante al setaccio con maglia da 80µm > 35%.
- Essais d'état
 - Valore del blu di metilene (VBS) o indice di plasticita (Ip)

In funzione di valori soglia si distinguono 4 sotto gruppi : da A1 (Ip<12) poco plastici sino ad A4 (Ip>40) a elevata plasticità.

Ulteriori sottoclassi sono definite in funzione dello stato idrico del terreno, nelle condizioni in cui si trova in natura (th; h; m; s; ts), attraverso l' Indice di Portanza Immediata (IPN) ; del tenore naturale d'acqua (w n) confrontato con il contenuto ottimo proctor (w opn); dell'indice di consistenza I_c.

La **Classe B** riguarda la classificazione dei suoli sabbiosi o ghiaiosi, con fini. Per le terre utilizzate per i rilevati la classificazione in sottogruppi è fatta sulla base della natura granulometrica e sullo stato idrico. Le terre utilizzate per les “couches de forme”, (strato intermedio tra terreno naturale e fondazione stradale) hanno la funzione di consentire una agevole circolazione dei mezzi d'opera, facilitare le operazioni di livellamento, di rullatura e di proteggere dagli effetti della pioggia battente e ruscellamento il terreno naturale o l'ultimo stato dal rilevato. Devono quindi essere insensibili all'acqua, resistenti alla circolazione dei mezzi d'opera, con definite dimensioni degli elementi maggiori e, nel caso, insensibili al gelo. In questo caso oltre ai parametri granulometrici (“classification selon nature”) delle condizioni di umidità (“classification selon l'état hydrique”), la norma francese valuta le proprietà delle terre attraverso la “classification selon le comportement”, con riferimento a valori della Friabilità delle sabbie (FS), alla resistenza all'usura con la prova Los Angeles (LA) e alla resistenza all'usura in presenza d'acqua con la prova Micro Deval (MDE).

La Classe C è relativa a suoli costituiti da fini (passante a 80µm>12%), frammisti ad elementi grossolani con D_{max}> 50 mm, Non contiene un riferimento ad uso per rilevato o strati di finitura del sottofondo (couches de forme).

La Classe D è relativa a suoli insensibili all'acqua, con valore del bleu di metilene VBS ≤1 e passante al setaccio di 80µm ≤12. Le sottoclassi sono definite in funzione di intervalli granulometrici, friabilità (FS), resistenza all'usura (LA) e resistenza all'usura in presenza d'acqua (MDE).

Classe **A**

Tableau 1 - **Classification des sols fins**

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm > 35%	A Sols fins	VBS ≤ 2,5 ⁽¹⁾ ou I _p ≤ 12	A₁ Limos peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollvés, arènes peu plastiques...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 3 ou W _n ≥ 1,25 W _{OPN}	A ₁ th	
				3 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 8 ou 1,10 ≤ W _n < 1,25 W _{OPN}	A ₁ h	
				8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,1 W _{OPN}	A ₁ m	
				0,7 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN} W _n < 0,7 W _{OPN}	A ₁ s A ₁ ts	
		12 < I _p ≤ 25 ⁽¹⁾ ou 2,5 < VBS ≤ 6	A₂ Sables fins argileux, limons argiles et mames peu plastiques arènes...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 2 ou I _c ⁽¹⁾ ≤ 0,9 ou W _n ≥ 1,3 W _{OPN}	A ₂ th	
				2 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 5 ou 0,9 ≤ I _c ⁽¹⁾ < 1,05 ou 1,1 W _{OPN} ≤ W _n < 1,3 W _{OPN}	A ₂ h	
				5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < I _c ≤ 1,2 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,1 W _{OPN}	A ₂ m	
				1,2 < I _c ≤ 1,4 ou 0,7 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN} I _c > 1,3 ou W _n < 0,7 W _{OPN}	A ₂ s A ₂ ts	
		25 < I _p ≤ 40 ⁽¹⁾ ou 6 < VBS ≤ 8	A₃ Argiles et argiles marnueuses, limons très plastiques...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 1 ou I _c ⁽¹⁾ ≤ 0,8 ou W _n ≥ 1,4 W _{OPN}	A ₃ th	
				1 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 3 ou 0,8 ≤ I _c ⁽¹⁾ < 1 ou 1,2 W _{OPN} ≤ W _n < 1,4 W _{OPN}	A ₃ h	
				3 < IPI ≤ 10 ou 1 < I _c ≤ 1,15 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,2 W _{OPN}	A ₃ m	
				1,15 < I _c ≤ 1,3 ou 0,7 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN} I _c > 1,3 ou W _n < 0,7 W _{OPN}	A ₃ s A ₃ ts	
		I _p > 40 ⁽¹⁾ ou VBS > 8	A₄ Argiles et argiles marnueuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique		A ₄ th
						A ₄ h
						A ₄ m
						A ₄ s

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe **B**

Tableau 2 - **Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines**

CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS							
CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME							
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	sous classe fonction du comportement
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm < 35%	B Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₁ Sables silteux...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		FS ≤ 60	B ₁₁
						FS > 60	B ₁₂
		tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% VBS > 0,2	B₂ Sables argileux (peu argileux)...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 4 ou W _n ≥ 1,25 W _{OPN}	B₂ th	FS ≤ 60	B ₂₁ th
						FS > 60	B ₂₂ th
				4 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 8 ou 1,10 W _{OPN} ≤ W _n < 1,25 W _{OPN}	B₂ h	FS ≤ 60	B ₂₁ h
						FS > 60	B ₂₂ h
				0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,10 W _{OPN}	B₂ m	FS ≤ 60	B ₂₁ m
						FS > 60	B ₂₂ m
				0,5 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN}	B₂ s	FS ≤ 60	B ₂₁ s
						FS > 60	B ₂₂ s
		W _n < 0,5 W _{OPN}	B₂ ts	FS ≤ 60	B ₂₁ ts		
				FS > 60	B ₂₂ ts		
		tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₃ Graves silteuses...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₃₁
						LA > 45 et MDE > 45	B ₃₂

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe B (suite)

Tableau 2 - Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines

CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS							
CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME							
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	sous classe fonction du comportement
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm ≤ 35%	B	tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS > 0,2	B ₄ Graves argileuses (peu argileuses)...	IP _I ⁽¹⁾ ≤ 7 ou w _h ≥ 1,25 w _{OPN}	B ₄ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ th
				7 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 15 ou 1,10 w _{OPN} ≤ w _h < 1,25 w _{OPN}	B ₄ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ th
				0,9 w _{OPN} ≤ w _h < 1,10 w _{OPN}	B ₄ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ h
				0,6 w _{OPN} ≤ w _h < 0,9 w _{OPN}	B ₄ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ h
				w _h < 0,6 w _{OPN}	B ₄ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ m
		tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS < 1,5 ⁽¹⁾ ou I _p ≤ 12	B ₅ Sables et graves très sileux...	IP _I ⁽¹⁾ ≤ 5 ou w _h ≥ 1,25 w _{OPN}	B ₅ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ th
				5 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 12 ou 1,1 w _{OPN} ≤ w _h < 1,25 w _{OPN}	B ₅ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ th
				12 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 30 ou 0,9 w _{OPN} ≤ w _h < 1,10 w _{OPN}	B ₅ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ h
				0,6 w _{OPN} ≤ w _h < 0,9 w _{OPN}	B ₅ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ h
				w _h < 0,6 w _{OPN}	B ₅ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ m
		tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% VBS > 1,5 ⁽¹⁾ ou I _p > 12	B ₆ Sables et graves argileux à très argileux	IP _I ⁽¹⁾ ≤ 4 ou w _h ≥ 1,3 w _{OPN} ou I _p ≤ 0,8	B ₆ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₆₁ th
				4 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 10 ou 0,8 < I _p ≤ 1 ou 1,1 w _{OPN} ≤ w _h < 1,3 w _{OPN}	B ₆ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₆₂ th
				10 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 25 ou 1 < I _p < 1,2 ou 0,9 w _{OPN} ≤ w _h < 1,1 w _{OPN}	B ₆ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₆₁ h
				0,7 w _{OPN} ≤ w _h < 0,9 w _{OPN} ou 1,2 < I _p ≤ 1,3	B ₆ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₆₂ h
				w _h < 0,7 w _{OPN} ou I _p > 1,3	B ₆ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₆₁ s

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe C

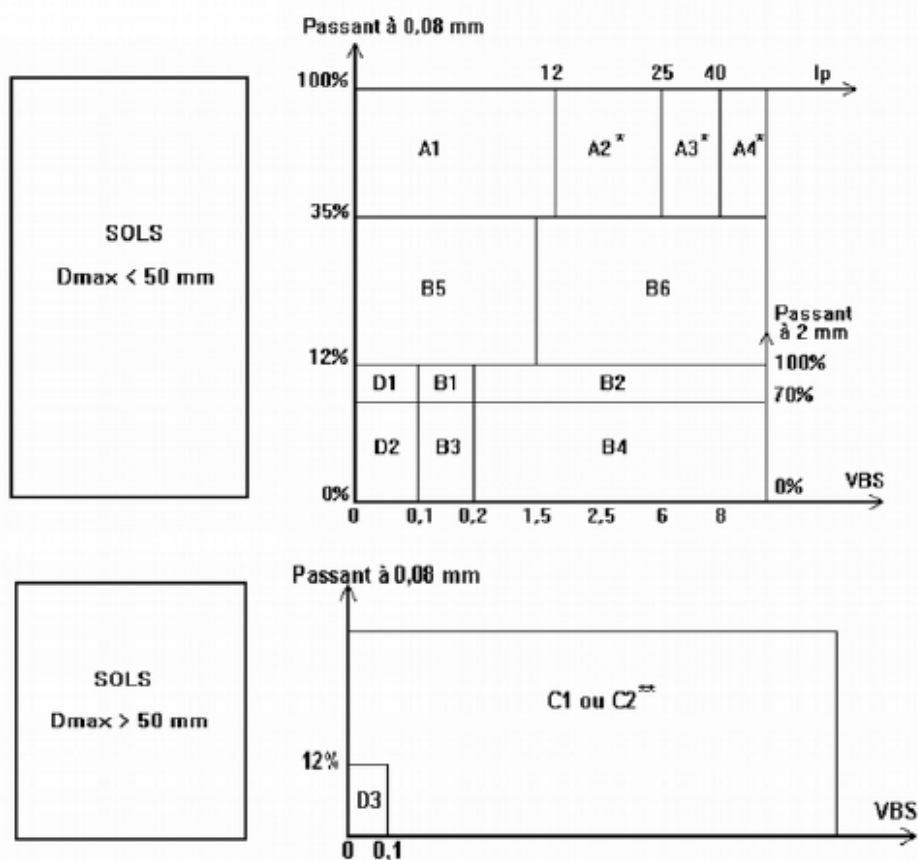
Tableau 3 - Classification des sols comportant des fines et des gros éléments

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique et le comportement																															
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature																																
D _{max} > 50 mm et tamisat à 80 µm > 12% ou si le tamisat à 80 µm ≤ 12% la VBS est > 0,1	C	Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm > 60 à 80% et matériaux roulés. La fraction 0/50 est un sol de classe A	C ₁ A ₁ Argiles à silex, éboulis, moraines, alluvions grossières...	<p>Le sous-classement, en fonction de l'état hydrique et du comportement des sols de cette classe, s'établit en considérant celui de leur fraction 0/50 mm qui peut être un sol de la classe A ou de la classe B</p> <p>* 1^{er} exemple : un sol désigné C₁A₂h est un sol qui est :</p> <ul style="list-style-type: none"> soit entièrement roulé, soit entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction 0/50 représente plus de 60 à 80% de la totalité du matériau. <p>Dans les deux cas, sa fraction 0/50 mm appartient à la classe A₂ avec un état hydrique h.</p> <p>* 2^{ème} exemple : un sol désigné C₁B₄₂m est un sol qui est :</p> <ul style="list-style-type: none"> entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction 0/50 mm représente moins de 60 à 80% de la totalité du matériau. <p>La fraction 0/50 mm est un sol de la classe B₄₂ se trouvant dans un état hydrique m.</p> <p>Les différents sous-classes composant la classe C sont :</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>C₁A₁</td> <td>C₁A₂</td> <td>C₂A₁</td> <td>C₂A₂</td> <td>Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C₁A₃</td> <td>C₁A₄</td> <td>C₂A₃</td> <td>C₂A₄</td> <td></td> </tr> <tr> <td>C₁B₁₁</td> <td>C₁B₂₁</td> <td>C₂B₁₁</td> <td>C₂B₂₁</td> <td rowspan="2">Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique</td> </tr> <tr> <td>C₁B₁₂</td> <td>C₁B₂₂</td> <td>C₂B₁₂</td> <td>C₂B₂₂</td> </tr> <tr> <td>C₁B₃₁</td> <td>C₁B₄₁</td> <td>C₂B₃₁</td> <td>C₂B₄₁</td> <td rowspan="2">Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C₁B₃₂</td> <td>C₁B₄₂</td> <td>C₂B₃₂</td> <td>C₂B₄₂</td> </tr> </table>				C ₁ A ₁	C ₁ A ₂	C ₂ A ₁	C ₂ A ₂	Etat th, h, m, s ou ts	C ₁ A ₃	C ₁ A ₄	C ₂ A ₃	C ₂ A ₄		C ₁ B ₁₁	C ₁ B ₂₁	C ₂ B ₁₁	C ₂ B ₂₁	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique	C ₁ B ₁₂	C ₁ B ₂₂	C ₂ B ₁₂	C ₂ B ₂₂	C ₁ B ₃₁	C ₁ B ₄₁	C ₂ B ₃₁	C ₂ B ₄₁	Etat th, h, m, s ou ts	C ₁ B ₃₂	C ₁ B ₄₂	C ₂ B ₃₂	C ₂ B ₄₂
			C ₁ A ₁					C ₁ A ₂	C ₂ A ₁	C ₂ A ₂	Etat th, h, m, s ou ts																								
			C ₁ A ₃					C ₁ A ₄	C ₂ A ₃	C ₂ A ₄																									
			C ₁ B ₁₁					C ₁ B ₂₁	C ₂ B ₁₁	C ₂ B ₂₁	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique																								
C ₁ B ₁₂	C ₁ B ₂₂	C ₂ B ₁₂	C ₂ B ₂₂																																
C ₁ B ₃₁	C ₁ B ₄₁	C ₂ B ₃₁	C ₂ B ₄₁	Etat th, h, m, s ou ts																															
C ₁ B ₃₂	C ₁ B ₄₂	C ₂ B ₃₂	C ₂ B ₄₂																																
Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm > 60 à 80% et matériaux roulés. La fraction 0/50 est un sol de classe B	C ₁ B ₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...																																		
Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 est un sol de classe A	C ₂ A ₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...																																		
Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 est un sol de classe B	C ₂ B ₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...																																		

Classe D Tableau 4 - Classification des sols insensibles à l'eau

← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS →				← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME →		
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Valeurs seuils retenues	Sous classe	
VBS ≤ 0,1 et tamisat à 80 µm ≤ 12%	D Sols insensibles à l'eau	D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm > 70%	D₁ Sables alluvionnaires propres, sables de dune...	Matériaux insensibles à l'eau; mais leur emploi en couche de forme nécessite la mesure de leur résistance mécanique (Los Angelès - LA - et/ou Micro Deval en présence d'eau - MDE -) ou Friabilité des sables (FS).	FS ≤ 60	D ₁₁
					FS > 60	D ₁₂
		D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm ≤ 70%	D₂ Graves alluvionnaires propres, sables...		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₂₁
					LA > 45 et MDE > 45	D ₂₂
		D _{max} > 50 mm	D₃ Graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires....		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₃₁
					LA > 45 et MDE > 45	D ₃₂

Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature



➤ **Norma Italiana** :

In Italia lo strumento di valutazione ed accettazione dei materiali è il “capitolato speciale d'appalto” (“le cahier des charges”) elaborato nell'ambito di ciascun progetto, che rappresenta la “legge speciale” che regola l'esecuzione del singolo lavoro.

Come prima anticipato, il modello di riferimento per tutti i capitolati è il CAPITOLATO SPECIALE D'APPALTO TIPO PER LAVORI STRADALI del MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI che stabilisce i criteri per verificare l'attitudine, all'impiego in ambito stradale, delle terre provenienti dalle zone di scavo e dalle cave di prestito.

Il capitolato speciale tipo prevede :

a) prove di identificazione della natura e dello stato delle terre

- granulometria e limiti di Atterberg, per la classificazione secondo la norma CNR-UNI 10006/63
- contenuto d'acqua naturale (CNR-UNI 10008/63) e consistenza

b) prove finalizzate a definire le modalità di costipamento

- costipamento AASHO Standard e/o Modificato (CNR 69/78) al variare del contenuto d'acqua, con individuazione della densità massima del secco (gsmax) e dell'umidità ottimale di costipamento (wopt)

c) Prove sulle caratteristiche meccaniche

- analisi granulometriche comparative, prima e dopo la prova di costipamento, limitatamente a materiali per i quali si sospetta la presenza di componenti fragili o instabili
- indice di portanza CBR, secondo modalità di prova che tengano conto della destinazione del materiale, dei rischi di imbibizione da venute d'acqua (gravitazionale e/o di capillarità) e del prevedibile grado di addensamento
- per valutare gli effetti delle variazioni di umidità e del grado d'addensamento sulla portanza degli strati realizzati, può essere previsto richiedere lo studio CBR completo, a diverse energie ed umidità di costipamento, secondo la norma SN 670320b.

Per le rocce evolutive (ossia soggette a modificarsi con l'utilizzo : argilliti, marne, scisti) devono essere determinate, inoltre :

- la resistenza a compressione semplice su cubetti (CNR 4/53) e la relativa massa volumica

- la perdita di peso alla prova Los Angeles (CNR 34/73) determinata preferibilmente per la classe A (dimensioni inferiori a 38,10 mm)

Laddove, nell'utilizzo di rocce evolutive, non fosse possibile o significativo valutare il comportamento attraverso prove di costipamento AASHO e prove CBR di laboratorio, l'attitudine all'impiego può essere determinata attraverso la misura del modulo di deformazione Md (CNR 146/92), nel corso delle prove preliminari in vera grandezza, in campo prove.

Classificazione delle terre

Per quanto riguarda la classificazione HRB AASHO 145-49 /CNR UNI 10006, il suo scopo è quello di valutare le caratteristiche del terreno di sottofondo (substrato naturale e/o terra da utilizzare come "couche de forme"). A differenza del sistema di classificazione francese NF-P 11 300, la CNR UNI 10006 non prevede la suddivisione di sottogruppi in attraverso prove finalizzate a valutare l'état hydrique" e "le comportement".

Classificazione HRB AASHO M 145-49 UNI 10006	Terre ghiaio-sabbiose Frazione passante allo staccio 0,075 UNI 2332 ≤35%							Terre limo-argillose Frazione passante allo staccio 0,075 UNI 2332 > 35%					Torbe e terre organiche palustri
	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7		
Gruppo	A 1-a	A 1-b		A 2-4	A 2-5	A 2-6	A 2-7				A 7-5	A 7-6	
Sottogruppo													
Analisi granulometrica Frazione passante allo Staccio													
2 UNI 2332 %	≤50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,4 UNI 2332 %	≤30	≤50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075 UNI 2332 %	≤15	≤25	≤10	≤35	≤ 35	≤ 35	≤35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35
Caratteristiche della frazione passante allo staccio 0,4 UNI 2332													
Limite liquido	-	-	40	> 40	> 40	≤40	> 40	£ 40	> 40	≤40	> 40	> 40	
Indice di plasticità	≤ 6	N.P.	≤10	≤10 max	≤ 10	> 10	> 10	≤10	≤ 10	> 10	> 10 (IP≤LL- 30)	> 10 (IP>LL- 30)	
Indice di gruppo	0		0	0			≤4	≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤20		
Tipi usuali dei materiali costituenti il gruppo	Ghiaia o breccia, ghiaia o breccia sabbiosa, pomice, scorie vulcaniche		Sabbia fina	Ghiaia o sabbia limosa		Ghiaia o sabbia argillosa		Limi poco compre ssibili	Limi fortem ente compre ssibili	Argille poco compre ssibili	Argille fortem ente compre ssibili	Argille fortem ente compre ssibili	Torbe di recente o remota formazione , detriti organici di origine palustre
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	Da eccellenti a buone					Da mediocri a scadenti							Da scartare come sottofondo
Azione del gelo sulle qualità portanti del terreno di sottofondo	Nessuna o lieve				Media			Media	Molto elevata	Media	Elevata	Media	
Ritiro o rigonfiamento	Nulla			Nulla o lieve				Lieve o medio		Elevata		Molto elevata	
Permeabilità	Elevata			Media o scarsa					Scarsa o molto scarsa				
Identificazione terreno in sito	Facilmente identificabile a vista	Aspri al tatto incoerenti allo stato asciutto	La maggior parte dei granuli sono individuabili ad occhio nudo – aspri al tatto. Una tenacità media o elevata allo stato asciutto indica la presenza di argilla				Reagiscono alla prova di scuotimento (*). Pulverulenti o poco tenaci allo stato asciutto. Non facilmente modellabili allo stato umido		Non reagiscono alla prova di scuotimento (*). Tenaci allo stato asciutto – Facilmente modellabili in bastoncini sottili allo stato umido				Fibrosi, di colore bruno scuro o nero – Facilmente individuabili al vista

(*) prova di cantiere che può servire a distinguere i limi dalle argille. Si esegue scuotendo nel palmo della mano un campione di roccia bagnata e comprimendolo successivamente tra le dita. La roccia sciolta reagisce alla prova se, dopo lo scuotimento apparirà sulla superficie un velo lucido di acqua libera, che scomparirà comprimendo il campione tra le dita

Come é evidente dalla classificazione su riportata, i parametri utilizzati nella classificazione sono esclusivamente la granulometria e i limiti di Atterberg. Non é previsto l'utilizzo della saggio al blu di metilene (VBS).

Non entrano nei criteri di classificazione :

- “essais d'etat”, ossia prove destinate a valutare lo stato di umidità della terra in sito,
- “essais de comportement mécanique”.

Nella HRB AASHO 145-49 /CNR UNI 10006 i terreni sono raggruppati in tre tipologie generali:

- terre ghiaioso – sabbiose , con una frazione limoso argillosa, passante al setaccio da 0,075 mm (75µm) < 35%
- terre limo-argillose, con frazione passante al setaccio da 0,075 mm (75µm) >35%
- Torbe e terre organiche palustri

Suddivise a loro volta in gruppi e sottogruppi :

Ulteriori gruppi e sottogruppi sono definiti in funzione :

- del passante ai setacci da 2 mm, 0,4mm e 0,075mm
- del valore del limite di liquidità (LL)
- del valore dell'Indice di Plasticità (IP)
- dell'indice di gruppo (I_g)

L'indice di gruppo qualifica il comportamento statico di una terra, che avrà portanza tanto migliore quanto più sarà basso l'indice. I_g si calcola con la seguente relazione :

$$I_g = 0,2 a + 0,05 ac + 0,01 bd$$

dove :

a è la percentuale di passante al setaccio 0.075 UNI 2332 diminuita di 35. Se tale percentuale è superiore a 75 o minore di 35 si pone **a** uguale rispettivamente a 75 e a 35

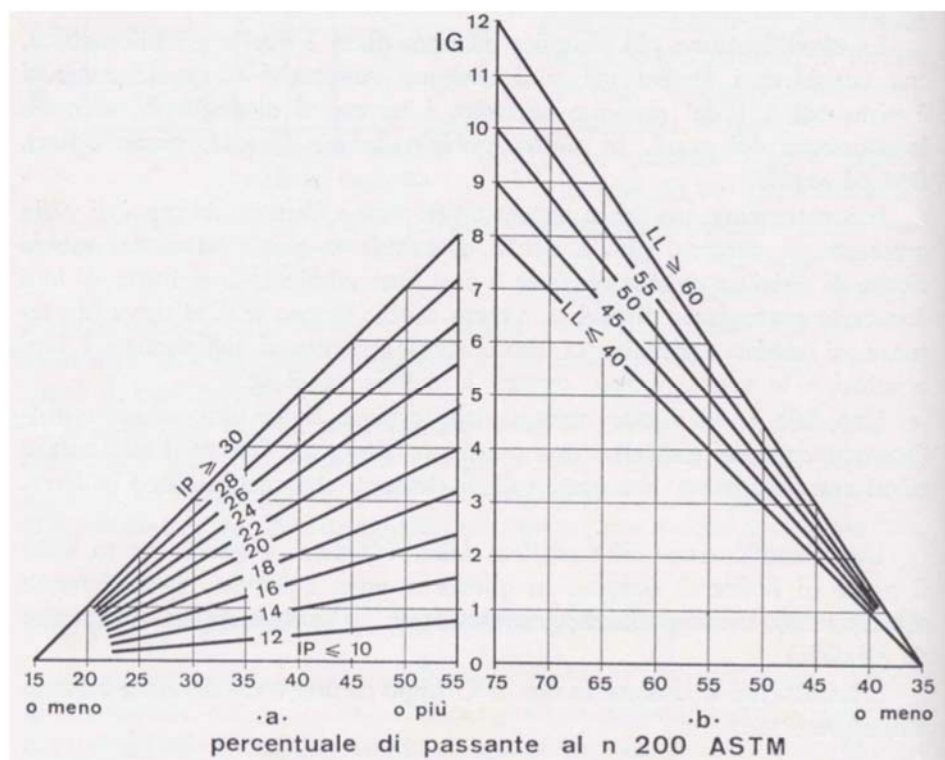
b è la percentuale di passante al setaccio 0.075 UNI 2332 diminuita di 15. Se tale percentuale è superiore a 55 od inferiore a 15 si pone **b** uguale rispettivamente a 55 e a 15

c è il valore del limite liquido *LL* diminuito di 40. Se il valore del limite liquido è superiore a 60 od inferiore a 40 si pone **c** uguale rispettivamente a 60 e a 40

d è il valore dell'indice di plasticità *IP* diminuito di 10. Se il valore dell'indice di plasticità è maggiore di 30 od inferiore di 10 si pone **d** uguale rispettivamente a 30 e a 10.

Sia i valori di **a**, **b**, **c**, e **d**, sia quelli risultanti per l'Indice di Gruppo vanno approssimati all'intero più vicino.

In alternativa al metodo analitico si può utilizzare il grafico seguente.



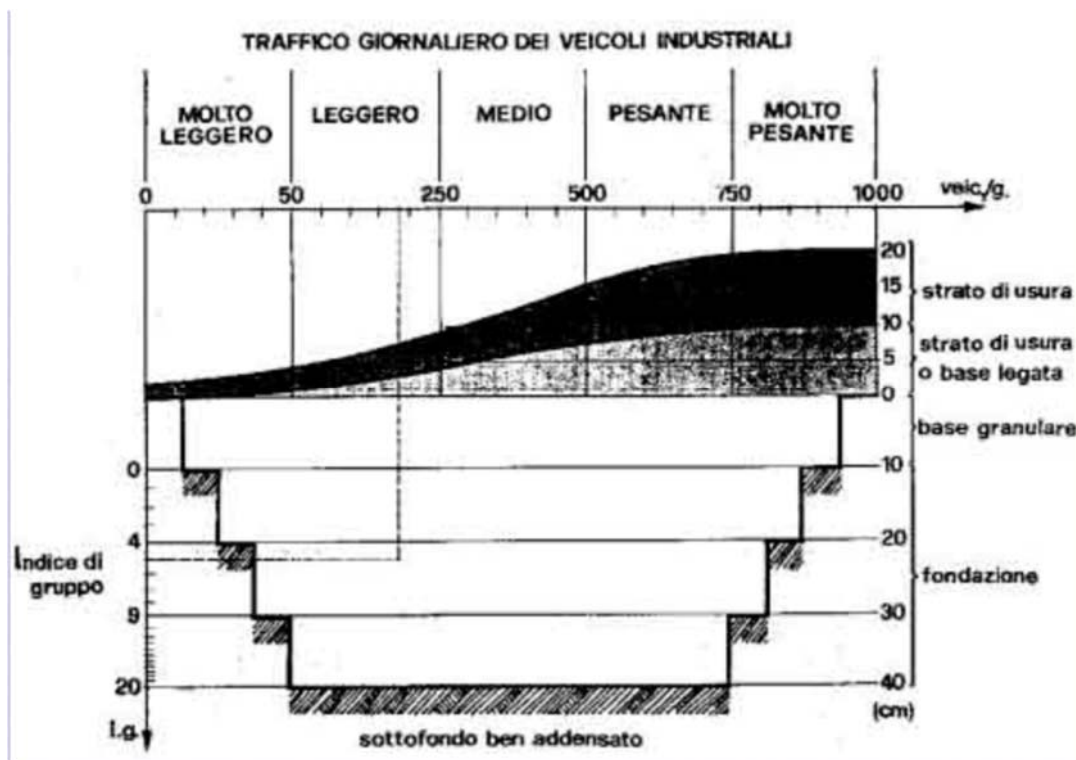
Se risulta **I.G.=0** il terreno si classifica **buono**

1<=I.G.<=10 il terreno risulta **mediocre**

10<I.G.<=20 il terreno risulta **cattivo o pessimo**.

In passato, attraverso l'indice di gruppo e la tipologica di traffico previsto, si determinavano gli spessori la sovrastruttura stradale utilizzando il grafico seguente :

- con un indice di gruppo basso (es. IG= 0) a parità di condizioni di traffico è sufficiente uno spessore modesto di fondazione
- con indice di gruppo elevato (IG= 20) risulta necessario uno spessore di fondazione molto maggiore.



Nella CNR UNI 10006 la classificazione HRB-AASHO è completata con la descrizione delle caratteristiche litologiche ; le qualità portanti in assenza di gelo; gli effetti dell'azione del gelo sulle qualità portanti del terreno di sottofondo; la tendenza al ritiro o al rigonfiamento; le caratteristiche di permeabilità; i criteri di identificazione dei terreni in sito, come riportato nella tavola che segue.

Come già accentato, in Italia la valutazione della accettabilità del comportamento di una terra in funzione del suo stato idrico e delle sue caratteristiche di resistenza non avviene con il confronto con valori soglia previsti da un sistema di classificazione ma è necessario far riferimento a quanto previsto dal Capitolato Speciale Tipo per lavori Stradali (CSA Tipo).

Si ritiene opportuno riportare quanto il CSA Tipo prescrive in relazione all'utilizzo delle terre:

“nella formazione dei rilevati con materie provenienti dagli scavi debbono essere utilizzati (..) in ordine di priorità, i materiali sciolti dei gruppi A1, A2-4, A2-5, A3 e, quindi, A2-6 ed A2-7.

Per le terre appartenenti ai gruppi A4, A5, A6 e A7 si deve valutare se adoperarle con le cautele appresso descritte, se prevederne un trattamento, ovvero se portarli a rifiuto.

I materiali impiegati, qualunque sia il gruppo di appartenenza, devono essere del tutto esenti da sostanze organiche, vegetali e da elementi solubili o comunque instabili nel tempo.

Terre con contenuto di sostanza organica di origine vegetale minore del 5% possono essere utilizzate per strati di rilevato posti a più di 2 metri dal piano di posa della pavimentazione.

Gruppo A1- *Appartengono a questo gruppo i materiali rocciosi non evolutivi e le terre granulari, generalmente di più o meno grossa pezzatura, pressoché insensibili all'azione dell'acqua e del gelo, che sotto il profilo dei movimenti di terra possono dar luogo ad un ampio spettro di comportamenti, in relazione :*

- *al contenuto di fino (frazione minore di 0,075 mm)*
- *all'assortimento granulometrico*
- *alla presenza di elementi di grossa pezzatura*

Nel prevederne l'impiego occorre considerare che le ghiaie e le sabbie alluvionali con poco fino (meno del 5%), permeabili e prive di coesione, dopo costipamento risultano tanto più soggette all'erosione dell'acqua meteorica quanto più l'assortimento granulometrico è mal graduato. E' necessario quindi prevedere la protezione delle scarpate con una copertura vegetale .

I detriti di falda, le rocce alterate, i depositi morenici ed anche le alluvioni eterogenee, con un contenuto di fino compreso tra il 10 ed il 15%, danno luogo a strati molto compatti e difficilmente erodibili; richiedono, tuttavia, un attento controllo dell'umidità di costipamento al fine di attingere valori elevati di portanza.

I materiali con elementi superiori a $D=50\text{mm}$ e, in particolare, quelli provenienti da scavi in roccia (dura e tenace) e richiedono cautele e particolari provvedimenti per quel che riguarda la stesa in strati di spessore regolare ed il costipamento.

I provvedimenti da adottarsi consistono nelle seguenti operazioni :

- *scarto degli elementi di dimensioni maggiori di $D=500\text{ mm}$;*
- *correzione granulometrica (per frantumazione e/o aggiunta di pezzature in difetto).*

(..) Le terre del sottogruppo A1-a, specialmente se di granulometria ben assortita, si riservano ai manufatti in terra che richiedono più elevate proprietà meccaniche e/o agli strati di sottofondo.

Gruppo A3 : *Le sabbie di questo gruppo, specialmente quando presentano una frazione ghiaiosa ($> 2\text{mm}$) modesta, si prestano male al costipamento ed alla circolazione dei mezzi di cantiere, per mancanza di coesione e di portanza. Di norma l'impiego senza particolari accorgimenti è limitato alla realizzazione di bonifiche dei piani di posa dei rilevati e di strati anticapillari ; terre di questo gruppo possono essere impiegate nella formazione del corpo del rilevato se presentano un coefficiente di uniformità (D_{60}/D_{10}) non inferiore a 7.*

Per le sabbie a granulometria uniforme deve prevedersi, invece, o un trattamento con cemento, o una correzione granulometrica, ovvero entrambi i provvedimenti.

Sottogruppi A2-4 e A2-5 – Le ghiaie e le sabbie limose a bassa plasticità di questi due sottogruppi sono convenientemente adoperate per la costruzione dei rilevati, peraltro senza difficoltà di esecuzione : la bassa plasticità ($IP < 10$) e la frazione fine non eccessiva ($< 35\%$) permettono, infatti, di modificare facilmente il loro contenuto d'acqua.

Generalmente presentano bassa permeabilità e modesta risalita capillare : perciò non richiedono particolari provvedimenti per proteggere dal gelo lo strato di sottofondo (o sottofondazione) e la soprastante pavimentazione.

Quando la frazione fine non supera il 12 % e se non sono presenti elementi di grossa pezzatura ($D > 71$ mm) queste terre non presentano particolari problemi di costipamento.

Sottogruppi A2-6 e A2-7 – Le ghiaie e le sabbie argillose di questi sottogruppi sono, di norma, convenientemente utilizzate per la formazione dei rilevati, specialmente quando presentino un indice di gruppo $IG=0$. Il loro comportamento, tuttavia, è molto influenzato dalla quantità e dalla natura della frazione argillosa presente.

Portanza e caratteristiche meccaniche attingono valori intermedi tra quelle delle ghiaie e delle sabbie che costituiscono l'ossatura litica del materiale e quelle delle argille che costituiscono la frazione fine. Poste in opera, esse presentano da media a bassa permeabilità ed altezza di risalita capillare, ciò che determina elevato rischio di formazione di lenti di ghiaccio per azione del gelo.

Per questo motivo, in presenza di falda superficiale e di prolungata durata di condizioni climatiche di bassa temperatura, il loro impiego deve essere evitato nella formazione di strati di sottofondo e limitato agli strati posti al di sotto di 2,00 m dal piano di posa della pavimentazione stradale, previa predisposizione, a quota inferiore, di uno strato anticapillare di spessore non inferiore a 30 cm.

L'energia e l'umidità di costipamento delle terre dei sottogruppi in esame debbono essere costantemente controllate ; quando il contenuto d'acqua risulta prossimo o supera il limite di plasticità della frazione fine si rischia, infatti, di provocare instabilità e cadute di portanza per sovracostipamento del materiale (...).

Gruppi A4, A5, A6 e A7 L'opportunità d'adoperare terre di questi gruppi deve essere valutata secondo le seguenti linee guida :

- disponibilità di terre sostitutive, anche in relazione alle distanze di trasporto ed alle esigenze di carattere ambientale
- provvedimenti da adottare per la protezione da venute d'acqua (gravitazionali o di capillarità) nelle opere in terra con esse realizzate

- tecniche di miglioramento, quale il trattamento a calce, finalizzate a ricondurre le proprietà fisico-chimiche e meccaniche entro limiti di garanzia delle prestazioni, nel volgere della vita economica dell'opera.

Terre A4 e A5

Per l'impiego dei materiali dei gruppi A4 ed A5 occorre considerare che :

- la consistenza di queste terre ($IP < 10$) cambia sensibilmente per modeste variazioni del contenuto d'acqua ; anche per modesti incrementi d'umidità si passa rapidamente da comportamenti tipici di terreni asciutti, difficili da compattare, a quelli di terreni troppo umidi, per i quali risulta talvolta impossibile ottenere il grado di addensamento richiesto

- in relazione all'assortimento granulometrico ed all'addensamento, la permeabilità ed il potere di risalita capillare possono variare entro limiti abbastanza ampi ; ne risulta un forte potere di imbibizione (portate d'invasamento capillare) e, quindi, un'estrema sensibilità al rigonfiamento ed all'azione del gelo. I rilevati realizzati con questi terreni, pertanto, debbono essere protetti dalle acque interne ed esterne, mediante strati anticapillari, schermi drenanti, tempestivi rinfranchi laterali con inerbimento

- la presenza di ciottoli ed elementi di più grossa pezzatura può impedire l'azione dei mezzi di miscelazione e, quindi, renderne impossibile la stabilizzazione a calce

Terre A6 e A7

Le difficoltà di compattazione delle argille dei gruppi A6 ed A7, le proprietà meccaniche generalmente modeste degli strati, come pure i provvedimenti di difesa dalle acque da mettere in atto per evitare rischi di ritiro-rigonfiamento del materiale posto in opera, limitano l'impiego di queste terre a rilevati di modesta importanza o a riempimenti non strutturali.

Se non sono presenti elementi di grosse dimensioni, le terre dei gruppi A6 ed A7 si prestano bene alla stabilizzazione con calce.”

Prove di accettazione e valori soglia

Oltre a quanto stabilito sulla qualità delle terre da utilizzare per i rilevati, specifiche prove e relativi valori soglia sono stabiliti in funzione di usi particolari dell'utilizzo dei materiali geologici:

- terre per strato anticapillare alla base dei rilevati
- terre per strati costituenti i rilevati o massicci per terre rinforzate
- terre per terreno di sottofondo (couches de forme) (piano di posa della fondazione stradale) per tratti di strada in trincea o al livello

Strati anticapillari

Gli strati anticapillari sono strati di rilevato costituiti da materiali granulari ad alta permeabilità eventualmente protetti da geotessili con funzione anticontaminante, Ossia deve impedire che l'argilla costituente il terreno naturale, si infiltri e “contamini” il materiale granulare della soprastante fondazione.

Lo strato anticapillare in materiale naturale, dello spessore generalmente compreso tra 30 e 50 cm, deve essere costituito da terre granulari (ghiaia, ghiaietto ghiaio), con granulometria compresa tra 2 e 50 mm, con passante al setaccio da 2 mm non superiore al 15% in peso e, comunque, con un passante al setaccio 0,075 mm non superiore al 3%.

Il materiale deve risultare del tutto esente da componenti instabili (gelive, tenere, solubili, etc.) e da resti vegetali; è ammesso l'impiego di materiali frantumati ovvero riciclati.

Salvo maggiori e più restrittive verifiche, il controllo qualitativo dello strato anticapillare va effettuato mediante analisi granulometriche da eseguirsi in ragione di almeno 101 prove ogni 100 m³ di materiale posto in opera. Massicci in terre rinforzate.

Si ottengono per inserimento fra gli strati di un rilevato di elementi resistenti a trazione, di tipo monodirezionale (armature metalliche, generalmente piatte) oppure bidirezionale (geotessili, reti metalliche, geogriglie, ecc.) Ai fini del mantenimento in efficienza del massiccio sono indispensabili speciali caratteristiche dei materiali adottati.

Per il terreno del rilevato in terra rinforzata devono essere impiegate terre appartenenti ai gruppi

A_{1-a}, A_{1-b}, A₃, A₂₋₄ e A₂₋₅ della classifica CNR - UNI 10006/1963.

In ogni caso debbono essere rispettate le seguenti condizioni:

- Il terreno di riempimento deve presentare un passante al setaccio da 0,075 mm inferiore al 15%
- I terreni con passante allo 0,075 mm superiore al 15%, sono ugualmente utilizzabili se:
 - la percentuale del campione esaminato per sedimentazione, di dimensioni minori di 15 micron è inferiore al 10%
 - la suddetta percentuale rimane compresa tra il 10% e 20% e l'angolo di attrito interno, misurato con prove di taglio diretto su campioni saturi, risulta superiore a 25°
 - Il terreno di riempimento non deve contenere nessun elemento maggiore di D = 200 mm
 - Il valore di resistività del materiale, saturato dopo un'ora di contatto terra-acqua alla temperatura di 20°C, deve essere superiore a 1.000 Ohm*cm per opere a secco e 3.000 Ohm*cm per opere inondabili

- Il valore di attività degli ioni (pH) misurato sull'acqua del campione di terra saturato, deve essere compreso tra 5 e 10
- Il contenuto di cloruri e solfati deve essere determinato soltanto per i materiali la cui resistività sia compresa tra 1.000 e 5.000 Ohm*cm e non deve eccedere i valori riportati nella tabella seguente

	Opere a secco	Opere in acqua dolce
ione Cl	200 mg/kg	100 mg/kg
ione SO₄	1000 mg/kg	500 mg/kg

Sottofondo

Il sottofondo è il volume di terra nel quale risultano ancora sensibili le sollecitazioni indotte dal traffico stradale e trasmesse dalla pavimentazione.

Può essere costituito dal terreno naturale in sito, se valutato idoneo utilizzando la classificazione CNR UNI 10006, o da terre idonee e, in questo caso, rappresenta la zona di transizione fra il terreno in sito (nelle sezioni in trincea o a raso con il piano campagna) e la pavimentazione e può essere fatto corrispondere al “*couche de forme*” della norma francese ; oppure tra il rilevato e la pavimentazione.

Questo strato ha la funzione di assicurare i requisiti richiesti al piano di posa della sovrastruttura stradale (costituita da strato di fondazione, strati di base, strato di collegamento e di usura), particolarmente per quanto riguarda la portanza e la regolarità della superficie finita.

Deve quindi essere idoneo coniugare le imperfezioni e l'eterogeneità prodotte dai movimenti di terra con l'omogeneità richiesta, invece, per la posa in opera della pavimentazione e, in particolare :

- conferire al supporto della pavimentazione, in ogni suo punto, una portanza sufficiente a garantire i livelli di stabilità e di funzionalità ammessi in progetto per la sovrastruttura (omogeneizzazione della portanza);
- proteggere, in fase di costruzione, gli strati sottostanti dagli dall'infiltrazione d'acqua di pioggia e, durante l'esercizio, lo strato di fondazione soprastante dalle risalite di fino inquinante; quest'ultima funzione può essere assegnata ad uno strato ad hoc (in sabbia) o ad un geotessile non tessuto.

In termini generali, lo spessore totale dello strato di sottofondo (da realizzare, a seconda dei casi, con la stesa ed il costipamento di uno o più strati) dipende dalla natura del materiale utilizzato, dalla portanza del supporto (terreno naturale o corpo del rilevato) e da quella assunta in progetto per il piano di posa della sovrastruttura.

Per la scelta del materiale e per i provvedimenti costruttivi occorre tenere conto, inoltre, dei rischi d'imbibizione dello strato (derivanti dalla presenza eventuale di una falda superficiale), delle condizioni climatiche previste in fase costruttiva (precipitazioni) ed in fase di esercizio (gelo), nonché del prevedibile traffico dei mezzi di cantiere e delle necessità connesse alla costruzione della pavimentazione.

Nella normativa italiana i parametri richiesti sono :

- materiali privi di elementi maggiori di $D=100$ mm;
- terre granulari, con assortimento granulometrico ben graduato, costituite preferibilmente da elementi a spigoli vivi, dotate di poco fino (passante allo 0,075 mm minore del 12%), non plastiche con $IP < 6$.

Tout-venant di cava ed i misti di fiume (naturali o corretti granulometricamente), con granulometria 0/100 mm ben assortita, appartenenti al gruppo A_{1-a} della classificazione CNR-UNI 10006, si prestano bene a costituire ottimi strati di sottofondo.

Fatte salve soluzioni differenti da giustificarsi sotto il profilo tecnico ed economico, possono essere impiegate, altresì, anche senza trattamento con legante, terre con indice di gruppo $IG = 0$, purché prive di elementi maggiori di $D > 100$ mm e rispondenti ai requisiti di portanza appresso indicati.

Inoltre, nel rispetto delle dimensioni massime sopra specificate, possono essere impiegate :

- terre dei gruppi A_{1-b} , A_{2-4} ed A_{2-5} , con passante allo 0.075 mm maggiore del 12%, previa stabilizzazione a cemento od a calce-cemento ;
- terre dei gruppi A_{2-6} ed A_{2-7} con una percentuale di fino maggiore del 5% previa stabilizzazione mista (a calce e cemento) od a sola calce.

Possono essere considerati idonei come terreno di sottofondo, se costituiscono il terreno in posto :

- limi dei gruppi A_4 ed A_5 previa stabilizzazione a calce e cemento, nonché le argille dei gruppi A_6 ed A_7 , dotate di plasticità non eccessivamente elevata ($IP < 25\%$), previa stabilizzazione con sola calce.

Nel caso in cui le prove di portanza CBR di laboratorio risultino significative (ossia per materiale con dimensioni inferiori a 20 mm), l'idoneità all'impiego della terra può essere accettata se essa presenta valori di indice di portanza CBR (energia AASHO Modificata) non inferiori a quanto appresso specificato :

a) nel caso di sottofondi costituiti da terreni granulari, clima asciutto, assenza di rischi d'imbibizione per infiltrazione laterale o dall'alto o per risalita capillare :

CBR = 20 ($w = w_{opt} \pm 2\%$; senza immersione)

b) per sottofondi costituiti da terreni granulari, nel caso in cui una delle condizioni sopracitate venga a mancare : CBR = 20 ($w = w_{opt} \pm 2\%$; 4 giorni di immersione)

c) nel caso di sottofondi costituiti da terreni limo-argillosi o in presenza di drenaggi insufficienti
CBR = 20 ($w = w_{opt} \pm 2\%$; saturazione completa).

8.5.4) Risultati delle analisi

Nel seguito si presentano le analisi geotecniche eseguite sui sedimenti prelevati nei porti di Tolone, Genova, Livorno, Canale Navicelli (Pisa – Livorno) Corsica – Porto di Centuri e Cagliari.

Per quanto riguarda la descrizione dei punti di campionamento si rimanda ai precedenti capitoli sulla caratterizzazione ambientale.

Le prove geotecniche sono state eseguite secondo le procedure in uso in Italia. La differenza principale con le norme francesi è la quantificazione del materiale fino.

In Francia si utilizza un setaccio con maglia da 80 μm , in Italia un setaccio da 75 μm .

Gli effetti pratici di tale differenza, nei casi esaminati, è non significativa.

Non è stato eseguito il test al blu di metilene (VBS): E stato comunque possibile classificare i sedimenti secondo la norma francese, facendo riferimento ai valori dei limiti di Atterberg.

Per valutare la costipabilità nell'utilizzo dei sedimenti per la costruzione di rilevati, e le condizioni di portanza in ambito stradale, sono state eseguite prove Proctor modificato (AASHO mod.) e prove per la determinazione dell'indice CBR %.

Per quanto riguarda la prova CBR, piuttosto che eseguire un'unica prova su un campione costipato alla densità massima Proctor mod. si è preferito costipare i campioni Proctor con differenti % d'acqua, entro fustelle CBR ed eseguire la prova CBR su ciascun provino.

In questo modo è stato ottenuta sia il grafico "umidità %" "densità secca", da cui si è ricavato il valore di umidità ottima ed il corrispondente massimo valore di addensamento, sia una valutazione del valore dalla portanza CBR, in funzione del grado di umidità della terre.

Il valore massimo CBR è stato valutato attraverso la curva umidità % - CBR %.

Esaminando le curve CBR si noterà un andamento talvolta non regolare della curve di prova.

Questo è dovuto alla presenza entro sedimenti sabbiosi o limoso argillosi di fibre e frustoli di *Posidonia oceanica*.

Per quanto riguarda le prove AASHO (Proctor), è stato sempre possibile stimare i valori di umidità ottima - densità massima, anche se non sempre le curve sono risultate regolari.

Porto di Tolone

Dal Porto di Tolone sono pervenuti tre campioni, distinti con P1; P2;P3

In valori della percentuale di passante alla serie dei setacci UNI é riportata per i tre campioni sono riportati nelle tabelle seguenti

P1

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei gran	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	99,3	98,7	97,1	93,8	76,9

Buona parte del sedimento ha diametro inferiore a 0,075 mm.

Il passante allo 0,4 mm, pari al 98,7 % , é risultato Non Plastico (NP)

L'indice di gruppo 8

Classifica CNR UNI 10006 **A4**; Classifica NF P11-300: **A1** - Limi poco plastici

Il sedimento, dal punto di vista geotecnico, è classificabile come limo poco compressibile

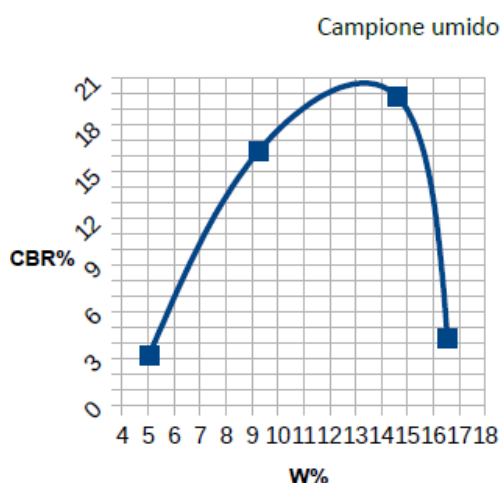
Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo mediocri;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo é molto elevato

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è lieve o medio

La permeabilità è media o scarsa

La densità massima Proctor modificata (AASHO mod) è pari a kN 17,353; l'umidità ottima è del 14,5%



Porto di Tolone Punto 3

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	99,4	99,0	97,6	94,9	79,5

Buona parte del sedimento ha diametro inferiore a 0,075 mm.

Il passante allo 0,4 mm, pari al 79,5 % è risultato Non Plastico (NP)

L'indice di gruppo IG=8.

Classifica CNR UNI 10006 **A4** ; Classifica NF P11-300: **A1** - Limi poco plastici

Il sedimento, dal punto di vista geotecnico, è classificabile come limo poco compressibile

Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo mediocri;

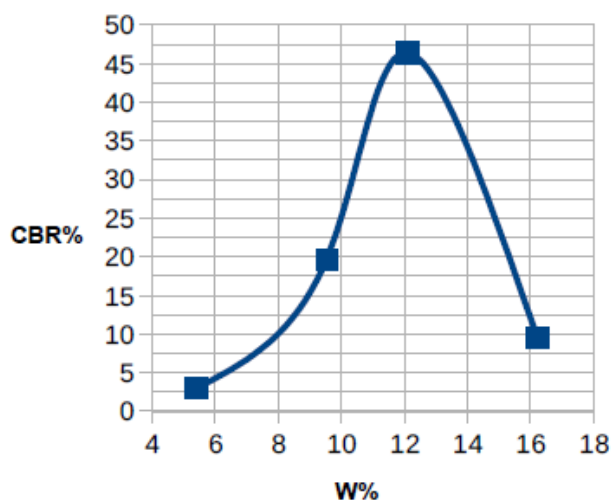
L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo è molto elevato

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è lieve o medio

La permeabilità è media o scarsa

La densità massima Proctor mod. è kN 17,300 e l'umidità ottima è pari a 12,10%

Campione asciutto in grumi



Porto di Genova

Dal Porto di Genova é pervenuto un unico Campione

In valori della percentuale di passante alla serie dei setacci UNI é riportata nella tabella seguente

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	98,4	96,9	93,5	81,9	18,4

Buona parte del sedimento ha diametro inferiore a 0,18 mm e superiore a 0,075 mm.

Dal punto di vista geotecnico si tratta quindi di una sabbia fine limosa

Il passante al setaccio 0,042 mm (pari al 97,1 % del totale) é risultato non plastico (NP)

L'indice di gruppo (IG) =zero.

La classificazione CNR UNI 10006 è **A2-4** sabbie fini limose; Classifica NF P11-300: **B1** – Sabbie siltose

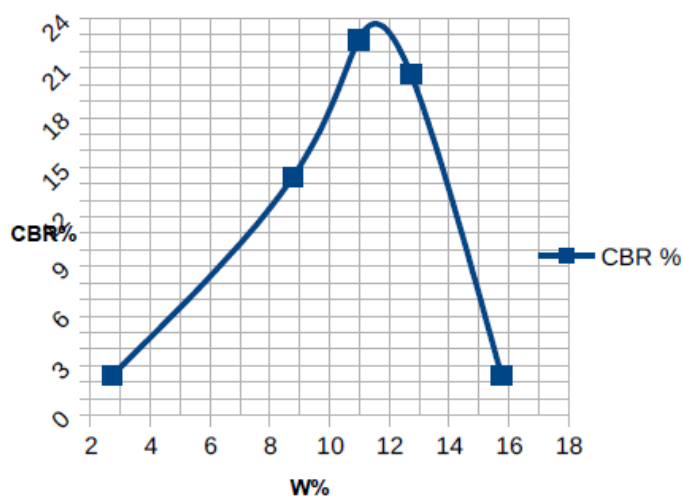
Le qualità portanti se utilizzato come terreno di sottofondo sono buone;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo é lieve

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è nullo

La permeabilità è elevata

La densità massima Proctor mod. è stimabile in kN 16,450 e l'umidità ottima è pari a 11,50%



Canale Navicelli

Dal Canale Navicelli sono pervenuti 3 campioni P1; P2; P3

Punto 1

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	98,0	97,8	96,3	94,1	90,7	88,1	83,3	79,1	75,8

Buona parte del sedimento ha diametro inferiore a 0,075 mm.

Il passante allo 0,4 mm, pari al 83,3 % è risultato con Indice di Plasticità = 12

L'indice di gruppo IG=12.

Classifica CNR UNI 10006 **A 7-5**; Classifica NF P11-300: **A1** - Limi poco plastici

Il sedimento, dal punto di vista geotecnico, è classificabile come terra argillosa fortemente compressibile, mediamente plastica

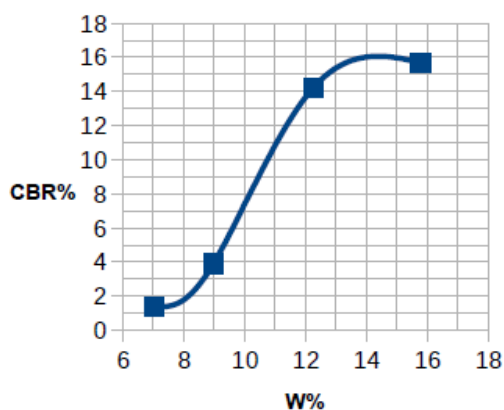
Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo sono scadenti;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo è media

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è elevato

La permeabilità è media o scarsa

La densità massima Proctor mod. è kN 15,685 e l'umidità ottima è pari a 15,50%



Campione asciutto in grumi

Canale Navicelli PUNTO 2

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	98,0	95,6	93,4	83,9	52,7	44,5

Più del 35% del sedimento ha diametro inferiore a 0,075 mm.

Il passante allo 0,4 mm, pari al 83,9 % é risultato avere indice di Plasticità IP= 5

L'indice di gruppo IG=2

Classifica CNR UNI 10006 A4 ; Classifica NF P11-300: A1 - Limi poco plastici

Il sedimento, dal punto di vista geotecnico, è classificabile come limo sabbioso poco compressibile

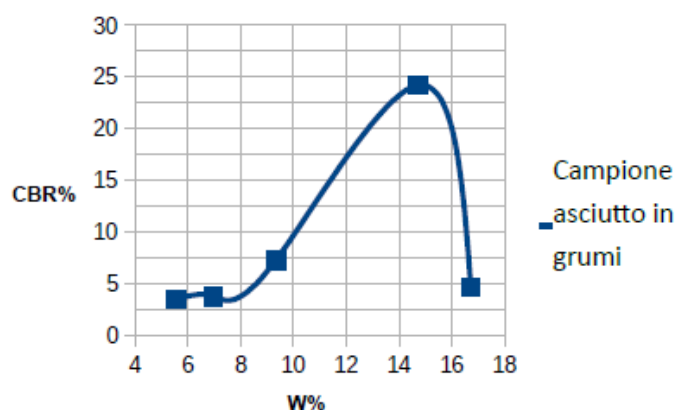
Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo mediocri;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo é molto elevato

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è lieve o medio

La permeabilità è media o scarsa

La densità massima Proctor mod. è kN 18,385 e l'umidità ottima è pari a 14,70%



Canale Navicelli PUNTO 3

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	98,9	98,2	97,3	95,9

Buona parte del sedimento ha diametro inferiore a 0,075 mm.

Il passante allo 0,4 mm, pari al 98,2 % è risultato con Indice di Plasticità = 15

L'indice di gruppo IG=12.

Classifica CNR UNI 10006 **A 7-5** ; Classifica NF P11-300: **A2** - Limo

Il sedimento, dal punto di vista geotecnico, è classificabile come terra argillosa fortemente compressibile, mediamente plastica

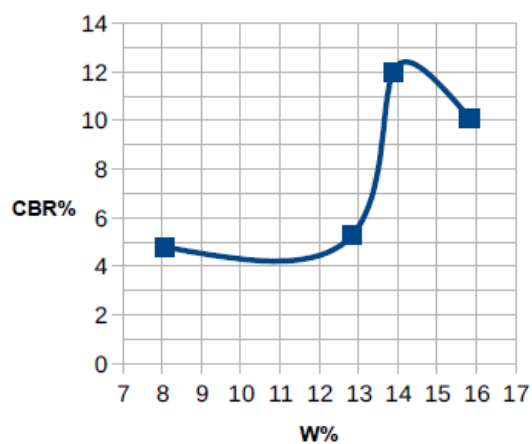
Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo sono scadenti;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo è media

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è elevato

La permeabilità è media o scarsa

La densità massima Proctor mod. è kN 16,400e l'umidità ottima è pari a 13,80%



campione asciutto in grumi

Corsica – Porto di Centuri

Dalla Corsica - Porto di Centuri - sono pervenuti 3 campioni

Corsica 1

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	98,5	96,2	91,6	64,2	22,9	6,0

Buona parte del sedimento ha diametro inferiore a 2 mm e superiore a 0,075 mm

Il passante allo 0,4 mm, pari al 64,2 % é risultato Non Plastico

L'indice di gruppo IG=0.

Classifica CNR UNI 10006: **A3**; Classifica NF P11-300: **D1** – sabbia

Il sedimento, dal punto di vista geotecnico, è classificabile come sabbia fine

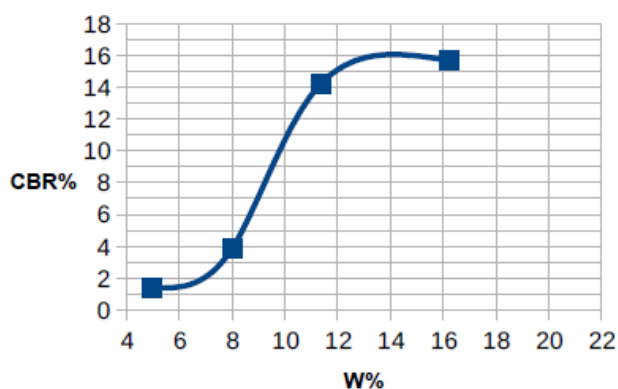
Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo sono buone;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo é lieve o nulla

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è nullo

La permeabilità è elevata

La densità massima Proctor mod. è kN 13,30 e l'umidità ottima è pari a 17,00%



Campione sciolto con fibre di Posidonia

Corsica 2

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,4	91,2	83,2	74,5	48,2	17,7	4,8

Buona parte del sedimento ha diametro inferiore a 2 mm e superiore a 0,075 mm

Il passante allo 0,4 mm, pari al 48,2 % , é risultato Non Plastico

L'indice di gruppo IG=0.

Classifica CNR UNI 10006 **A1-b** ; Classifica NF P11-300: **D1** sabbia

Il sedimento, dal punto di vista geotecnico, è classificabile come sabbia media con una % di ghiaia pari a circa il 17%

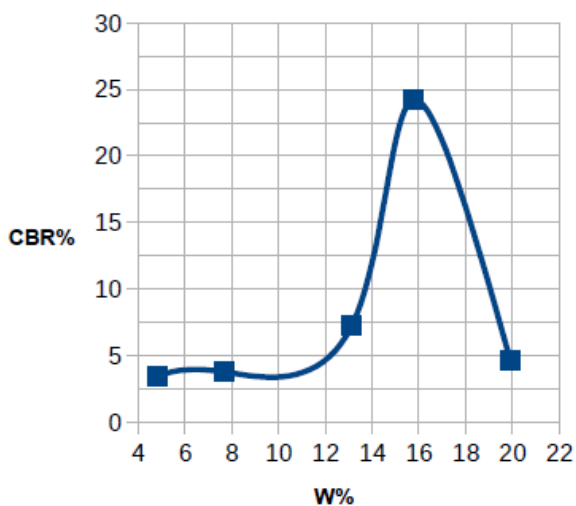
Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo sono da eccellenti a buone;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo é lieve o nulla

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è nullo

La permeabilità è elevata

La densità massima Proctor mod. è kN 13,55 e l'umidità ottima è pari a 16,00%



Con fibre e fusti di Posidonia

Corsica 3

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,8	97,4	92,5	82,6	44,2	13,0	3,4

Buona parte del sedimento ha diametro inferiore a 2 mm e superiore a 0,075 mm

Il passante allo 0,4 mm, pari al 44,2 % , é risultato Non Plastico

L'indice di gruppo IG=0.

Classifica CNR UNI 10006 **A1-b** ; Classifica NF P11-300: **D1** Sabbia

Il sedimento, dal punto di vista geotecnico, è classificabile come sabbia media – fina con una % di ghiaia pari a circa il 7 %

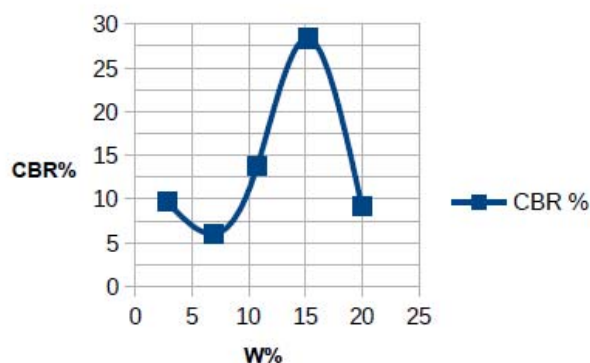
Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo sono da eccellenti a buone;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo é lieve o nulla

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è nullo

La permeabilità è elevata

La densità massima Proctor mod. è kN 14,95 e l'umidità ottima è pari a 14,30%



Con foglie e fusti di Posidonia

Porto di Livorno - vasca di colmata

Sono pervenuti 3 campioni

Porto di Livorno 1

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,1	95,7	93,3	91,2	89,2	86,0	80,5	48,6

Circa la metà del sedimento (48,6%) ha diametro inferiore a 0,075 mm.

Il passante allo 0,4 mm, pari al 86 % è risultato Non Plastico (NP)

L'indice di gruppo IG=3.

Classifica CNR UNI 10006 **A4**; Classifica NF P11-300: **A1** - Limi poco plastici

Il sedimento, dal punto di vista geotecnico, è classificabile come limo poco compressibile

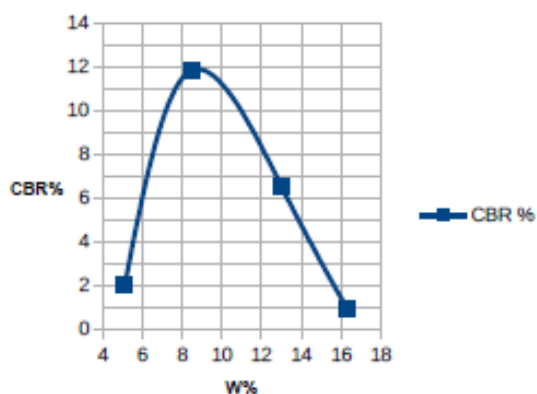
Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo sono mediocri;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo è molto elevato

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è lieve o medio

La permeabilità è media o scarsa

La densità massima Proctor mod. è kN 18,450 e l'umidità ottima è pari a 12,80%



Livorno 2

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	90,5	86,7	82,5	77,6	69,6	56,6	45,3	30,4	20,1	15,8

Il sedimento è costituito per il 43,4 % da ghiaia; dal 40,8 % da sabbia e dal 15,8% da fini

Il passante allo 0,4 mm, pari al 30,4 % , è risultato Non Plastico

L'indice di gruppo IG=0.

Classifica CNR UNI 10006 **A1-b**; Classifica NF P11-300: **B5** Sabbie e ghiaie molto siltose

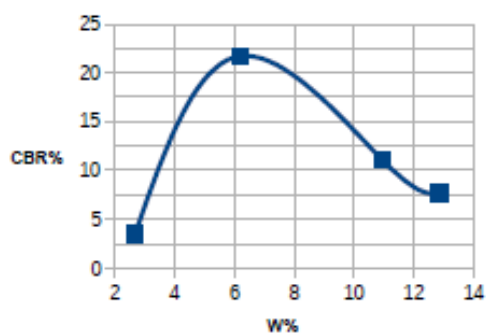
Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo sono da eccellenti a buone;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo è lieve o nulla

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è nullo

La permeabilità è elevata

La densità massima Proctor mod. è kN 18,400 e l'umidità ottima è pari a 11,30%



Livorno 3

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	97,4	95,9	94,8	92,0	89,2	86,3	82,4	73,9	50,4

Circa la metà del sedimento (50,4 %) ha diametro inferiore a 0,075 mm.

Il passante allo 0,4 mm, pari al 82 ,4% é risultato Non Plastico (NP)

L'indice di gruppo IG=3.

Classifica CNR UNI 10006 **A4**; Classifica NF P11-300: **A1** - Limi poco plastici

Il sedimento, dal punto di vista geotecnico, è classificabile come limo poco compressibile

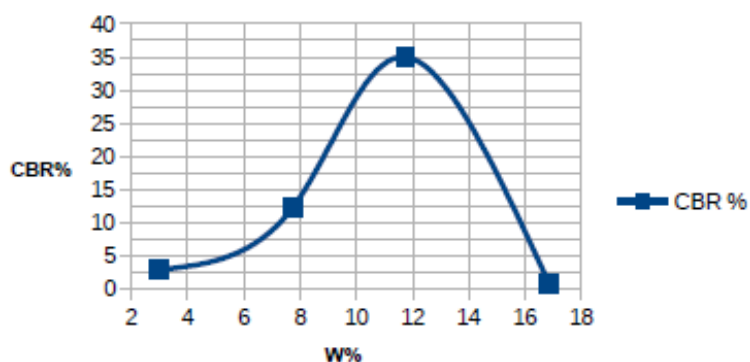
Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo mediocri;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo é molto elevato

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è lieve o medio

La permeabilità è media o scarsa

La densità massima Proctor mod. è kN 19,020 e l'umidità ottima è pari a 9,50 %



Porto di Cagliari- Vasca di colmata

Porto di Cagliari 1

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	96,4	96,4	96,1	95,5	94,5	92,2	89,2	79,6	50,4	28,7

Il sedimento è costituito da 7,8 % di ghiaia, dal 12,6% di sabbia grossolana, dal 48% di sabbia media e fine e dal 28,7% di fino.

Dal punto di vista geotecnico si tratta quindi di una sabbia fine limosa

Il passante al setaccio 0,042 mm (pari al 79,7% % del totale) é risultato non plastico (NP)

L'indice di gruppo (IG) =zero.

La classificazione CNR UNI 10006 è **A2-4**; Classifica NF P11-300: **B5** Sabbie e ghiaie molto siltose

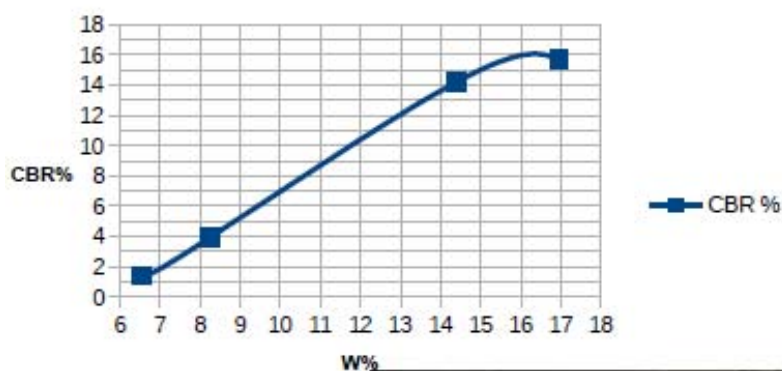
Le qualità portanti se utilizzato come terreno di sottofondo sono buone;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo é lieve

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è nullo

La permeabilità è elevata

La densità massima Proctor mod. è stimabile in kN 16,30e l'umidità ottima è pari a 15,00%



Cagliari 2

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,7	98,4	97,7	96,3	94,3	85,1	49,4	19,7

Il passante al setaccio da 2 mm è pari al 96,3 %, il passante allo 0,075 mm è inferiore al 20% per cui il sedimento è prevalentemente sabbioso limoso.

Il passante allo 0,4 mm, pari al 85,1,% è risultato Non Plastico (NP)

L'indice di gruppo IG=0.

Classifica CNR UNI 10006 A2-4 ; Classifica NF P11-300: **B5** – Sabbie e ghiaie molto siltose

Il sedimento, dal punto di vista geotecnico è sostanzialmente una sabbia limosa

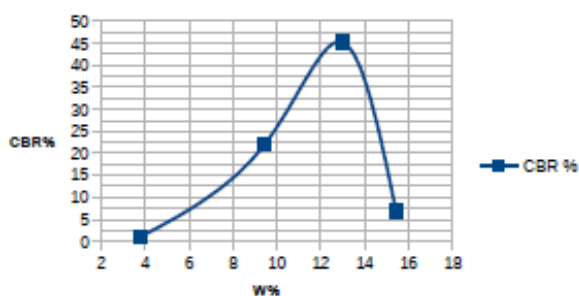
Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo sono buone;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo è media

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è nullo o lieve

La permeabilità è elevata

La densità massima Proctor mod. è kN 16,900 e l'umidità ottima è pari a 13,2 %



con fibre di *Posidonia*

Cagliari 3

ANALISI GRANULOMETRICA (CNR-B.U. n° 23)													
Diametro dei grani	100	75	63	40	25	16	10	5	2	1	0,4	0,18	0,075
Passante (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	99,4	98,6	97,4	91,7	62,9	38,2

Il passante al setaccio 0,075 mm è del 38,2%

il passante al setaccio da 2 mm è pari al 98,6%

Il passante allo 0,4 mm, pari al 82,4% è risultato Non Plastico (NP)

L'indice di gruppo IG=1.

Classifica CNR UNI 10006 **A4**; Classifica NF P11-300: **A1** - Limi poco plastici

Il sedimento, dal punto di vista geotecnico, ricade nel campo dei limi poco compressibili

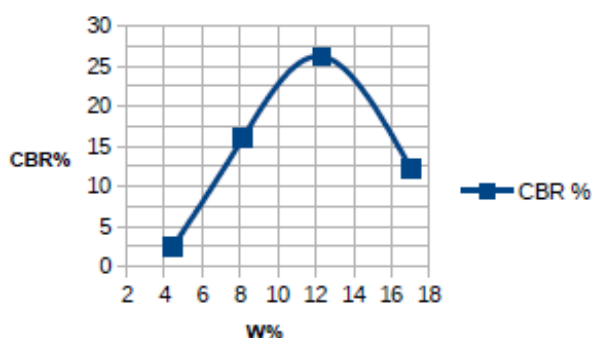
Le qualità portanti, in assenza di gelo, se utilizzato come terreno di sottofondo mediocri;

L'effetto del gelo sulle qualità portanti come sottofondo è molto elevato

Il rigonfiamento per azione dell'acqua è lieve o medio

La permeabilità è media o scarsa

La densità massima Proctor mod. è kN 15,700 e l'umidità ottima è pari a 13,50%



UBICAZIONE	NF P11 - 300	CNR UNI 10006	Giudizio CNR UNI 10006	Classificabili come utilizzabili per rilevati e couche de forme NF P11- 300
PORTO DI TOLONE 1	A1	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO DI TOLONE 2	A1	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO DI TOLONE 3	A1	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO DI GENOVA	B1	A2-4	BUONO	SI
CANALE NAVICELLI PISA-LIVORNO 1	A1	A7-5	SCADENTE	NO
CANALE NAVICELLI PISA-LIVORNO 2	A1	A4	MEDIOCRE	NO
CANALE NAVICELLI PISA-LIVORNO 3	A2	A7-5	SCADENTE	NO
CORSICA 1	D1	A3	BUONO	SI
CORSICA 2	D1	A1-b	BUONO/OTTIMO	SI
CORSICA 3	D1	A1-b	BUONO/OTTIMO	SI
PORTO LIVORNO 1	A1 h	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO LIVORNO 2	B5 h	A1-b	BUONO/OTTIMO	SI
PORTO LIVORNO 3	A1	A4	MEDIOCRE	NO
PORTO CANALE CAGLIARI 1	B5	A2-4	BUONO	SI
PORTO CANALE CAGLIARI 2	B5	A2-4	BUONO	SI
PORTO CANALE CAGLIARI 3	A1	A4	MEDIOCRE	NO

8.5.5) Geotecnica – conclusioni

I dati delle analisi geotecniche sono riassunti in quattro tabelle.

LA TABELLA 1, per ciascun campione, riporta :

Parametri indicativi della granulometria del campione :

passante al setaccio con maglia da 2 mm

passante al setaccio con maglia da 0,4 mm

passante al setaccio con maglia da 0,075 mm

Parametri indicativi della suscettività all'acqua

Limite di Liquidità (LL)

Limite di Plasticità (LP)

Indice di Plasticità (IP)

Classificazione geotecnica dei sedimenti

Classificazione HRB - AASHO M 145-49 – CNR UNI 10006

Classificazione **NF-P 11 300**

Compattabilità e portanza

Indice di gruppo (IG)

Densità massima ed umidità ottima Proctor modificato

Indice CBR% massimo in rapporto all'umidità di costipamento.

La **TABELLA 2** riporta i valori relativi alle prove Proctor modificato e CBR%, eseguite su ciascuno dei campioni ; il valore di densità secca massima Proctor modificato e della Umidità ottima % di costipamento.

Le tabelle da 3 a 8 riportano i grafici umidità % - CBR % da cui è stato stimato il valore CBR massimo.

In appendice allegati i certificati di prova emessi dal Laboratorio Geotecnico della Città Metropolitana di Cagliari.

Per ciascun campione si forniscono :

- la curva granulometrica con i passanti ai setacci,
- i valori di LL LP IP IG;
- la curve delle prove CBR alle differenti umidità
- il certificato della prova prove Proctor mod. (AASHO modificata)

TABELLA 4

Riporta il quadro sinottico della classificazione francese e italiana con i giudizi di utilizzabilità delle terre in campo stradale.

TABELLA 1

Passante a	TOULON			GENOVA	LIVORNO			NAVICELLI			CORSICA			CAGLIARI		
	P1	P2	P3	P1	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P3	P3
2 mm	99,3	99,4	99,4	98,4	91,2	56,6	89,2	90,7	95,6	99,4	96,2	83,2	92,5	92,2	96,3	98,6
0,4 mm	97,1	97,4	97,6	93,5	86	30,4	82,4	83,3	83,9	98,2	64,2	48,2	44,2	97,6	85,1	91,7
0,075 mm	76,9	77,8	79,5	18,4	48,6	15,8	50,4	75,8	44,5	95,9	6	4,8	3,4	28,7	19,7	38,2
LL	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	54	32	51	ND	ND	ND	ND	ND	ND
LP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	42	27	51	ND	ND	ND	ND	ND	ND
IP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	12	5	36	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Indice di Gruppo	8	8	8	0	3	0	3	12	2	15	0	0	0	0	0	1
CNR-UNI 1006	A4	A4	A4	A2-4	A4	A1-b	A4	A7-5	A4	A7-5	A3	A1-b	A1-b	A2-4	A2-4	A4
NF P 11-300	A1h	A1h	A1h	B5h	A1h	B5h	A1h	A1h	A1h	A2h	D1	D1	D1	B5h	B5h	B5h
Umidità Ottima %	14,5	12,11	12,1	11,8	12	11,3	9,5	15,5	14,7	13,8	17	16	14,3	15	13,2	13,5
Densità secca max Proctor (kN/mc)	17,353	17,674	17,3	16,45	18,45	18,4	19,02	15,685	18,385	16,5	13,3	13,55	14,95	16,3	16,9	15,7
Umidità di costipamento	13,4	12,11	12,2	11,6	8,5	6,3	11,75	16	14,72	14,3	14	16	15,2	16,5	12,98	12,3
Indice CBR (%) max	20,8	46,4	38,3	24	11,9	21,8	35	14,5	24,3	12,4	16	24,3	28,4	16	45,2	26,2

A1_a; A1_b Ghiaia o breccia, ghiaia o breccia sabbiosa, sabbia grossa
A3 Sabbia fine
A2-4; A2-5 Ghiaia o sabbia limosa
A2-6; A2-7 Ghiaia o sabbia argillosa
A4 Limo poco compressibile
A5 Limo fortemente compressibile
A6 Argilla poco compressibile
A7-5 Argille fortemente compressibili, mediamente plastiche
A7-6 Argille fortemente compressibili, fortemente plastiche
A8 Torbe e detriti organici di origine palustre

A₁ = SOLS FINS (limons peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu poullés, arènes peu plastiques)

A₂ = SOLS FINS (sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arenas)

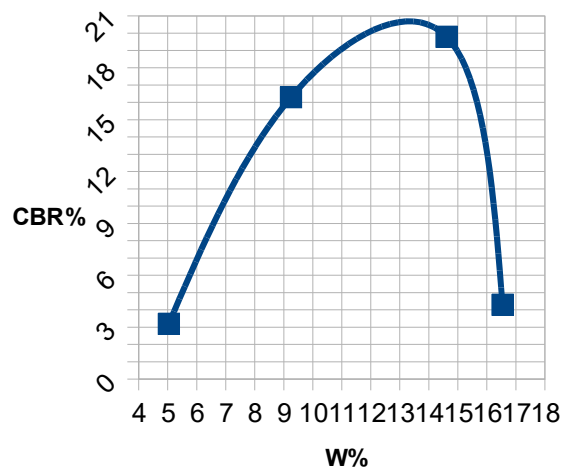
B_s = SOLS SABLEUX (sables très silteux)

D₁ = SOLS INSENSIBLES à l'eau (sables alluvionnaires propres, sables de dunes)

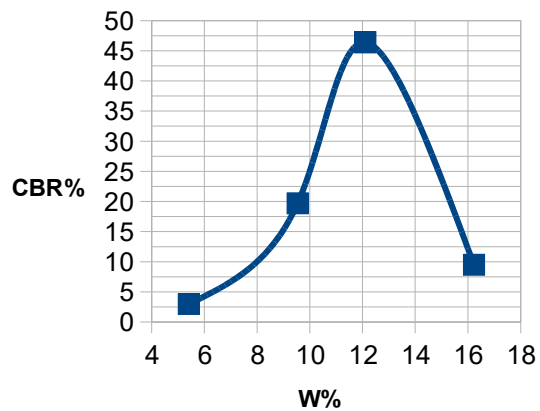
h = état d'humidité très élevé autorisant la réutilisation du sol en prenant des dispositions particulières (aeration, traitement, etc...)

TABELLA 3 : TOULON CBR%

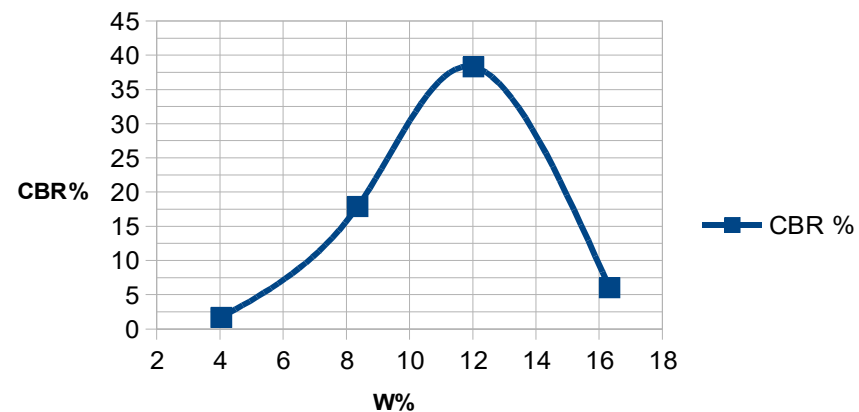
TOULON P1		W %	CBR %	TOULON P2		W %	CBR %	TOULON P3		W %	CBR %
		5,04	3,2			5,41	3			4,04	1,7
		9,25	16,3			9,54	19,7			8,36	17,9
		14,61	19,8			12,11	46,4			12,02	38,3
		16,54	4,3			16,23	9,5			16,33	6



■ CBR %



■ CBR %



■ CBR %

TABELLA 4 : GENOVA CBR%

GENOVA 1	W %	CBR %
	2,72	2,4
	8,77	14,4
	10,97	22,7
	12,73	20,6
	15,76	2,4

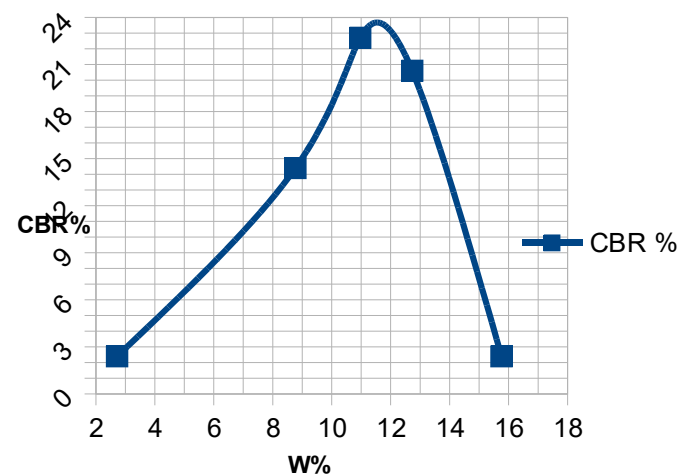
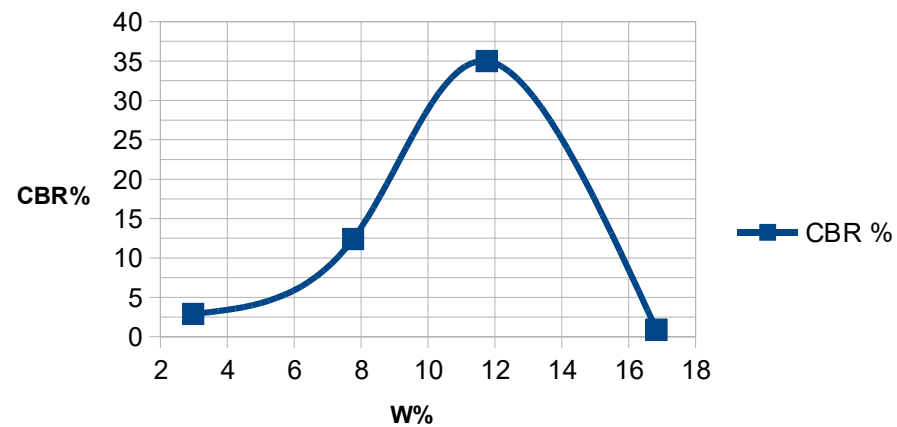
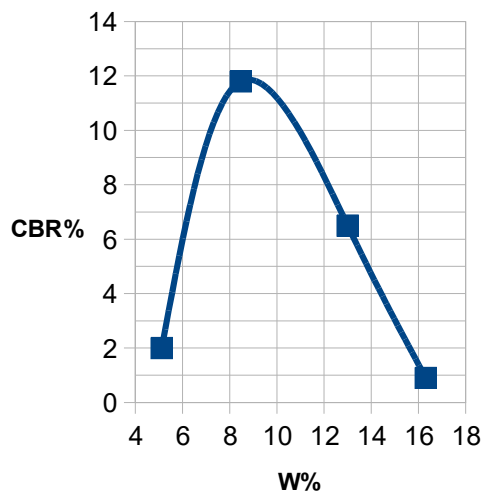


TABELLA 5 : LIVORNO CBR%

Livorno 1		Livorno 2		Livorno 3	
W %	CBR %	W %	CBR %	W %	CBR %
5,12	2	2,69	3,5	2,98	2,9
8,47	11,8	6,2	21,7	7,76	12,4
13	6,5	10,94	11,1	11,75	35
16,31	0,9	12,85	7,7	16,83	0,9



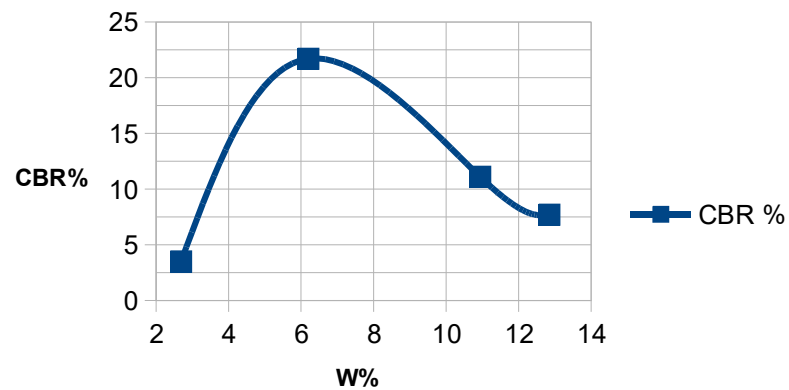
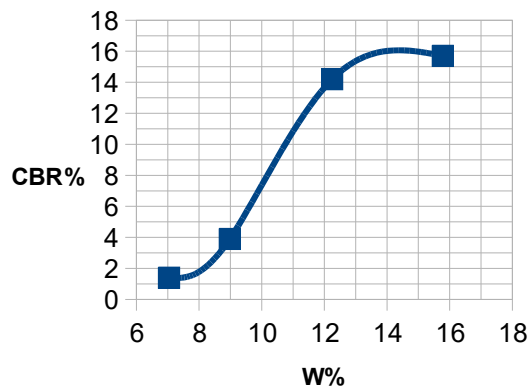
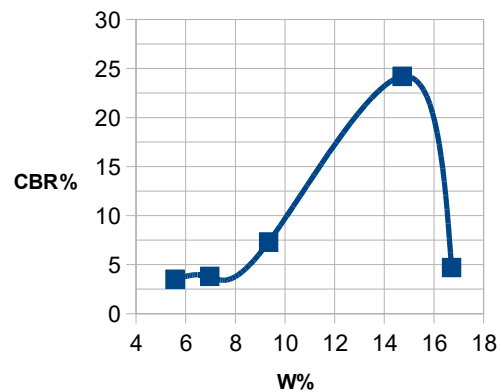


TABELLA 6 : NAVICELLI CBR%

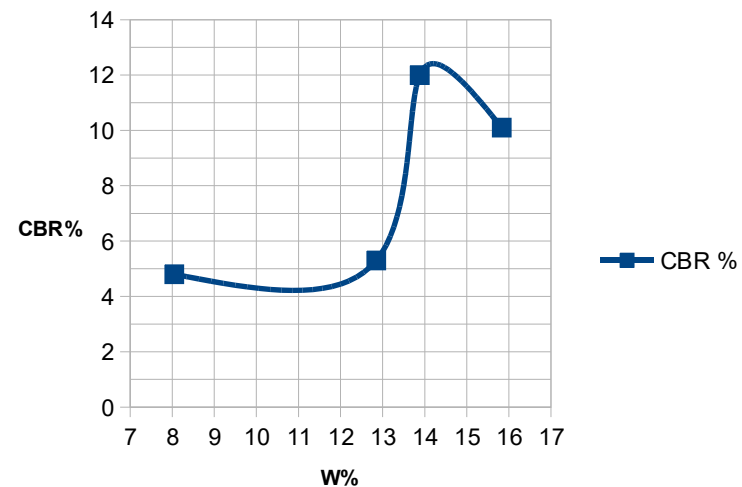
Navicelli	W %	CBR %	Navicelli 2	W %	CBR %	Navicelli 3	W %	CBR %
	7,04	1,4		5,57	3,5		8,05	4,8
	8,98	3,9		6,97	3,8		12,85	5,3
	12,25	14,2		9,34	7,3		13,88	12
	15,78	15,7		14,72	24,2		15,83	10,1
				16,71	4,7			



■ CBR %



■ CBR %



■ CBR %

TABELLA 7 : CENTURI CBR%

Corsica	W %	CBR %	CBR		CORSICA 3	W %	CBR %
			W %	%			
	4,96	1,5	4,84	1,5		2,8	9,7
	8,01	0,4	7,67	1,4		6,87	6
	11,35	4,9	13,15	1,9		10,76	13,8
	16,2	7,5	15,75	5,9		15,20	28,4
	20,80	2,8	19,92	15,5		19,95	9,2

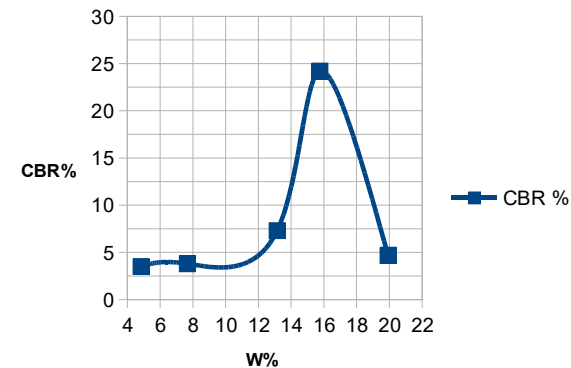
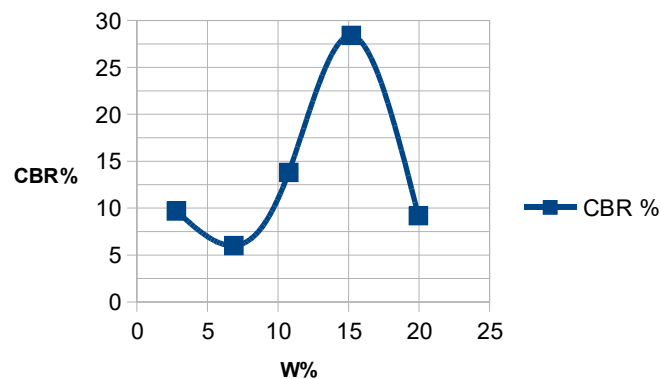
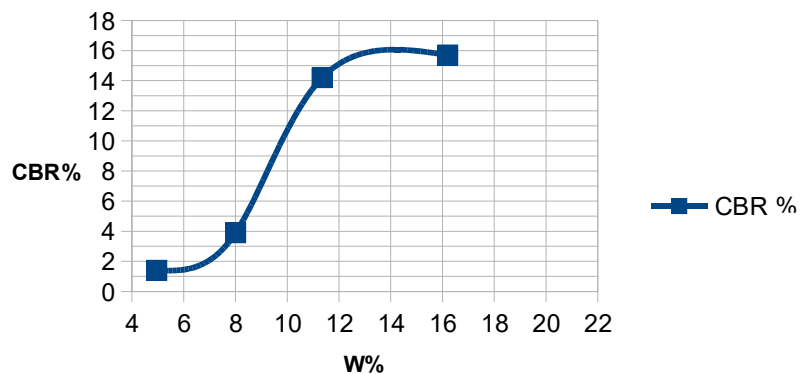
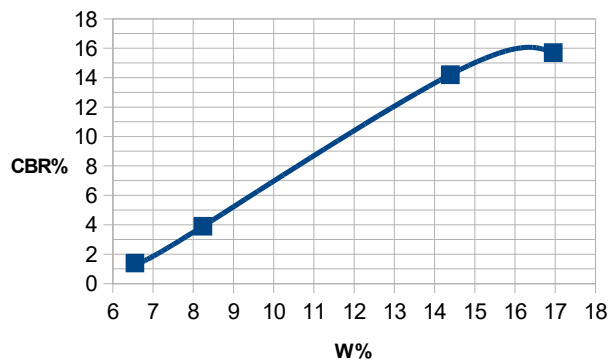
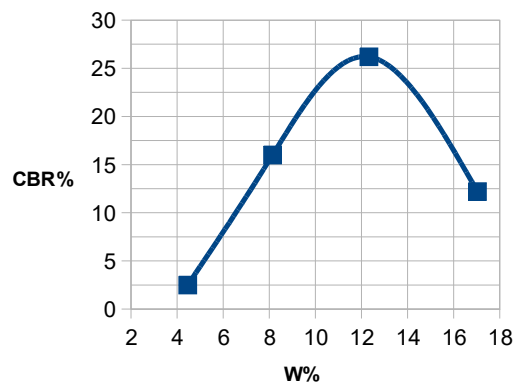


TABELLA 8 : CAGLIARI CBR%

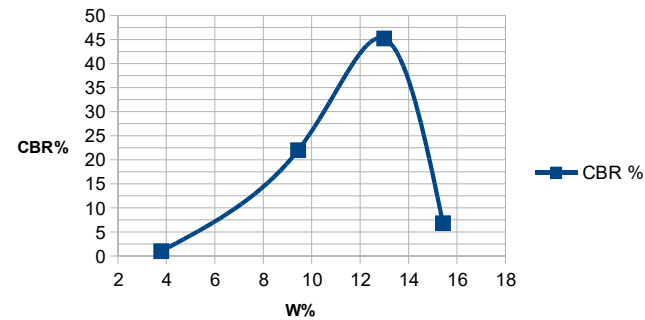
CAGLIARI 1		CAGLIARI 2		CAGLIARI 3	
w %	CBR %	w %	CBR %	w %	CBR %
6,55	2,7	3,79	1	4,46	2,5
8,24	13,3	9,44	22	8,14	16
14,39	22,4	12,99	45,2	12,32	26,2
16,95	11,3	15,42	6,8	17,03	12,2



■ CBR %



■ CBR %



■ CBR %