



Projet SEDITERRA (N°CUP : I42F17000010006)



**ACTIVITÉ T2.4 : PILOTES DE TRAITEMENTS ET DE VALORISATION DE
SÉDIMENTS NON IMMERGEABLES**

**ATTIVITÀ T2.4 : PILOTI DI TRATTAMENTO E DI VALORIZZAZIONE DEI
SEDIMENTI NON IMMERGIBILI**

LIVRABLE T2.4.7 : SYNTHÈSE DES PILOTES DE TRAITEMENTS ET VALORISATION

DELIVERABLE T2.4.7 : SINTESI DI TRATTAMENTI PILOTA E VALORIZZAZIONE

AVRIL/APRIL 2020



<p>Nom du livrable</p> <p>Nome del deliverable</p>	<p>SYNTHÈSE DES PILOTES DE TRAITEMENTS ET VALORISATION</p> <p>SINTESI DI TRATTAMENTI PILOTA E VALORIZZAZIONE</p>
<p>Rédigé par / Redatto da :</p>	<p>Mohamed Abdelghafour (PROVADEMSE pour INSA LYON) Emmanuel Vernus (PROVADEMSE pour INSA LYON) Salvatore Pistis (Città Metropolitana di Cagliari per RAS) Davide Sartori (ISPRA LIVOURNE) Fabiano Pilato (ISPRA LIVOURNE)</p>
<p>Validé par / Validato da :</p>	<p>Jacques Méhu (INSA de Lyon)</p>
<p>Contribution et Mise en forme finale / Contributo e Formattazione finale :</p>	<p>Erwan Tessier (INSA de Lyon)</p>

ANNÉE/ANNO : 2020

INSA | INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON

ORGANISATION DU DOCUMENT / ORGANIZZAZIONE DEL DOCUMENTO :

LIVRABLE EN FRANÇAIS / DELIVERABLE IN FRANCESE – P8

LIVRABLE TRADUIT EN ITALIEN / DELIVERABLE TRADOTTO IN ITALIANO – P113

ANNEXES / ALLEGATI – P213

SOMMAIRE

	INTRODUCTION	8
1.	DÉMARCHES D'ÉVALUATION DES SÉDIMENTS DANS LE CADRE DE LEUR GESTION APRÈS DRAGAGE	8
1.1	DÉMARCHE FRANÇAISE	9
1.1.1	Caractère dangereux	9
1.1.2	Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière	10
1.2	DÉMARCHE ITALIENNE	11
1.2.1	Cas des sédiments dragués en zone SIN	12
1.2.2	Cas des sédiments dragués en dehors de zone SIN	13
2.	CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS ÉTUDIÉS	16
2.1	CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS SELON LA DÉMARCHE FRANÇAISE	17
2.1.1	Caractérisation des propriétés de danger des sédiments	17
2.1.2	Caractérisation environnementale de niveau 1	23
2.1.3	Caractérisation environnementale de niveau 2	25
2.2	CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS SELON LA DÉMARCHE ITALIENNE	26
2.2.1	Évaluation écotoxicologique des sédiments prélevés à Cagliari et Livourne	26
2.2.2	Résultats	37
2.2.3	Discussion	40
2.2.4	Intégration via le logiciel Ecotox Sediqualssoft®	40
2.2.5	Intégration des données chimiques et écotoxicologiques par SediQualSoft®	46
3.	TRAITEMENT DES SÉDIMENTS ET FORMULATION DE MATÉRIAUX	48
3.1	ÉCHANTILLONS TESTÉS ET PROGRAMME D'ESSAIS	48
3.2	CARACTÉRISATION PRÉLIMINAIRE	50
3.2.1	Caractérisation chimique des sédiments	50
3.2.2	Caractérisation physique des sédiments	50
3.3	FORMULATION DES MORTIERS DE REMBLAIEMENT DE TRANCHÉES	52
3.4	FORMULATION DES BÉTONS COURANTS	54
3.5	SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS	56
4.	ÉVALUATION GÉOTECHNIQUE ET MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX	59
4.1	AVANT-PROPOS	59
4.2	UTILISATION DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE DANS LES MÉLANGES DE CIMENT POUR LA PRODUCTION DE BÉTON	59
4.3	UTILISATION DES SÉDIMENTS POUR LA FABRICATION DE MORTIER	62
4.4	MÉLANGES DE SÉDIMENTS - CIMENT ET AUTRES MATÉRIAUX (C&D ET CENDRES VOLANTES) POUR LA ROUTE	66
4.5	UTILISATION DES SÉDIMENTS POUR LA RÉALISATION DE MÉLANGES CIMENTÉS	69
4.6	COMMENTAIRES SUR LES RÉSULTATS	71

5.	ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES MATÉRIAUX EN CONDITIONS PILOTE	74
	5.1 CONCEPTION ET RÉALISATION DES OUVRAGES PILOTES	74
	5.1.1 Pilotes réalisés sur les deux sédiments Italiens	74
	5.1.2 Pilotes réalisés sur les deux sédiments français	75
	5.1.3 Description des pilotes en lysimètre	76
	5.1.4 Description des dalles pilotes	80
	5.2 SUIVI DES PILOTES	83
	5.2.1 Exposition à l'eau des lysimètres	83
	5.2.2 Exposition à l'eau des dalles	83
	5.2.3 Suivi analytique	84
	5.2.4 Suivi écotoxicologique	85
	5.3 RÉSULTATS DU SUIVI DES LYSIMÈTRES	86
	5.3.1 Suivi du pH et de la conductivité	88
	5.3.2 Suivi des chlorures et sulfates	90
	5.3.3 Suivi des éléments métalliques	95
	5.3.4 Suivi écotoxicologique	96
	5.3.5 Synthèse des résultats des essais en lysimètre	97
	5.4 RÉSULTATS DU SUIVI DES DALLES PILOTES	97
	5.4.1 Suivi du pH et de la conductivité	98
	5.4.2 Suivi des chlorures et sulfates	101
	5.4.3 Suivi des éléments métalliques	104
	5.4.4 Suivi écotoxicologique	106
	5.4.5 Synthèse des résultats des essais en dalles	108
6.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	108
	ANNEXES	213

SOMMARIO

	INTRODUZIONE	113
1.	PROCEDURE DI VALUTAZIONE DEI SEDIMENTI NELL'AMBITO DELLA GESTIONE POST DRAGAGGIO	113
1.1	PROCEDURA FRANCESE	114
1.1.1	Carattere pericoloso dei sedimenti	114
1.1.2	Accettabilità ambientale dei materiali alternativi nelle tecniche stradali	115
1.2	PROCEDURA ITALIANA	116
1.2.1	Sedimenti dragati in zone SIN	117
1.2.2	Sedimenti dragati al di fuori delle zone SIN	119
2.	CARATTERIZZAZIONE DEI SEDIMENTI STUDIATI	122
2.1	CARATTERIZZAZIONE DEI SEDIMENTI SECONDO PROCEDURA FRANCESE	122
2.1.1	Valutazione delle caratteristiche di pericolo dei sedimenti	122
2.1.2	Caratterizzazione ambientale di livello 1	128
2.1.3	Caratterizzazione ambientale di livello 2	131
2.2	CARATTERIZZAZIONE DEI SEDIMENTI SECONDO LA PROCEDURA ITALIANA	132
2.2.1	Valutazione ecotossicologica dei sedimenti prelevati a Cagliari e Livorno	132
2.2.2	Risultati	143
2.2.3	Discussione	146
2.2.4	Integrazione con il software Ecotox SediquaSoft®.	146
2.2.5	Integrazione dei dati chimici ed ecotossicologici con SediQualSoft®.	152
3.	TRATTAMENTO DEI SEDIMENTI E FORMULAZIONE DEI MATERIALI	154
3.1	CAMPIONI TESTATI E PROGRAMMA DI SPERIMENTAZIONE	154
3.2	CARATTERIZZAZIONE PRELIMINARE	156
3.2.1	Caratterizzazione chimica dei sedimenti	156
3.2.2	Caratterizzazione fisica dei sedimenti	156
3.3	FORMULAZIONE DI MALTE PER IL RIEMPIMENTO DI TRINCEE	158
3.4	FORMULAZIONE DI CALCESTRUZZI COMUNI	160
3.5	SINTESI E CONCLUSIONE	163
4.	VALUTAZIONE GEOTECNICA E MECCANICA DEI MATERIALI	165
4.1	PREMESSA	165
4.2	IMPIEGO DEI SEDIMENTI DI DRAGAGGIO NELLE MISCELE DI CEMENTO PER LA PRODUZIONE DI CALCESTRUZZO	166
4.3	IMPIEGO DEI SEDIMENTI PER LA FABBRICAZIONE DI MALTA	169
4.4	MISCELE DI SEDIMENTI - CEMENTO E ALTRI MATERIALI (C&D E CENERI VOLANTI) LE TECNICHE STRADALI	172
4.5	IMPIEGO DEI SEDIMENTI PER LA PRODUZIONE DI MISCELE DI CEMENTO	175
4.6	COMMENTI SUI RISULTATI	177

5.	VALUTAZIONE AMBIENTALE DEI MATERIALI IN CONDIZIONI PILOTA	180
5.1	PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI OPERE PILOTA	180
5.1.1	Piloti effettuati sui due sedimenti italiani	181
5.1.2	Piloti effettuati sui due sedimenti francesi	181
5.1.3	Descrizione delle prove pilota in lisimetro	182
5.1.4	Descrizione delle lastre pilota	185
5.2	MONITORAGGIO DELLE PROVE PILOTA	188
5.2.1	Esposizione all'acqua dei lisimetri	188
5.2.2	Esposizione all'acqua delle lastre	188
5.2.3	Monitoraggio analitico	189
5.2.4	Monitoraggio ecotossicologico	190
5.3	RISULTATI DEL MONITORAGGIO DEI LISIMETRI	191
5.3.1	Monitoraggio del pH e della conducibilità	193
5.3.2	Monitoraggio dei cloruri e dei solfati	194
5.3.3	Monitoraggio dei metalli	197
5.3.4	Monitoraggio ecotossicologico	198
5.3.5	Sintesi dei risultati del delle prove lisimetriche	199
5.4	RISULTATI DEL MONITORAGGIO DELLE LASTRE PILOTA	200
5.4.1	Monitoraggio del pH e della conducibilità	201
5.4.2	Monitoraggio dei cloruri e dei solfati	203
5.4.3	Monitoraggio dei metalli	206
5.4.4	Monitoraggio ecotossicologico	207
5.4.5	Sintesi dei risultati delle prove sulle lastre sperimentali	209
6.	CONCLUSIONE E PROSPETTIVE	209
	ALLEGATI	213

INTRODUCTION

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

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

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

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

1. DÉMARCHES D'ÉVALUATION DES SÉDIMENTS DANS LE CADRE DE LEUR GESTION APRÈS DRAGAGE

Les caractéristiques environnementales des matériaux à draguer conditionnent leur devenir. Ainsi, si les niveaux de contamination demeurent inférieurs aux niveaux N1 et N2 (seuils GEODE définis dans l'arrêté interministériel du 14 juin 2000, révisé par les arrêtés du 9 août 2006, 23 décembre 2009, 8 février 2013, et 17 juillet 2014) alors les sédiments pourront-être orientés vers une gestion marine (immersion ou rejet en mer ou en zone estuarienne). Dans le cas contraire, et sauf dérogation des autorités compétentes (pouvant être basée sur une investigation complémentaire en fonction du projet considéré et du degré de dépassement du niveau N1), dès qu'un unique dépassement du niveau N2 est constaté alors le sédiment dragué doit-être orienté vers une gestion terrestre (stockage ou valorisation) où le sédiment prend alors de facto le statut de déchet.

En effet l'article L541-4-1 du Code de l'Environnement définit le champ d'application des dispositions relatives à la prévention et à la gestion des déchets selon ces termes, repris de la directive européenne 2008/98/CE :

« Ne sont pas soumis aux dispositions du présent chapitre (...) les sédiments déplacés au sein des eaux de surface aux fins de gestion des eaux et des voies d'eau, de prévention des inondations, d'atténuation de leurs effets ou de ceux des sécheresses ou de mise en valeur des terres, s'il est prouvé que ces sédiments ne sont pas dangereux. »

Cette définition implique, de fait, que dès lors que les sédiments sont déplacés à terre, ils relèvent du champ d'application du chapitre relatif à la prévention et à la gestion des déchets.

1.1. DÉMARCHE FRANÇAISE

1.1.1. Caractère dangereux

Les sédiments de dragage et de curage sont répertoriés dans la liste des déchets figurant dans la décision de la Commission européenne du 3 mai 2000 modifiée sous l'un ou l'autre des deux codes suivants :

- 17 05 05* : Boues de dragage contenant des substances dangereuses
- 17 05 06 : Boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17 05 05

La France applique, 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 d'une démarche simplifiée de l'évaluation de la dangerosité des sédiments (pour les propriétés HP 4, HP 5, HP 6, HP 7, HP 8, HP10, HP 11 et HP 13) par rapport à la démarche complète d'évaluation décrite par le guide INERIS (Rapport INERIS-DRC-15-149793-06416A).

Cette démarche simplifiée spécifique de l'évaluation de la dangerosité de sédiments a fait l'objet d'une publication par l'INERIS et le CEREMA référencée INERIS- DRC-16-149793-00431B.

Dans le cas de la propriété de danger « Ecotoxique » HP14, le BRGM a travaillé à l'élaboration d'un protocole d'écotoxicologie pour l'évaluation du caractère dangereux (HP 14) de sédiments destinés à une gestion à terre. Ce protocole a été publié par le BRGM sous la référence BRGM/RP-61420-FR, puis par l'INERIS dans son guide INERIS-DRC-15-149793-06416A.

1.1.2. Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière

Pour évaluer les caractéristiques environnementales des matériaux alternatifs destinés à une utilisation en technique routière, le Ministère chargé de l'Environnement a développé une méthodologie publiée en Mars 2011 par le CEREMA sous la référence SKU1841125457, en vente sur le site (<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/acceptabilite-materiaux-alternatifs-technique-routiere>).

Ce guide méthodologique est décliné en guides d'application, plus opérationnels, pour les gisements de matériaux alternatifs dont le retour d'expérience est probant. Un tel guide d'application dédié aux sédiments de dragage et de curage est en préparation.

Dans l'attente d'un tel cadre d'évaluation spécifique aux sédiments, il convient de se référer au guide méthodologique général qui définit trois niveaux de caractérisation environnementale du matériau alternatif et du matériau routier afin de graduer l'effort de démonstration en fonction du risque que présentent les matériaux concernés vis-à-vis de l'environnement :

- Caractérisation environnementale de niveau 1 : L'objectif de cette étape est de fournir des informations sur la variabilité et de justifier l'acceptabilité en technique routière des matériaux alternatif et routier sur la base d'essais de lixiviation et d'analyses en contenu total.
- Caractérisation environnementale de niveau 2 : L'objectif de cette étape est de justifier l'acceptabilité en technique routière des matériaux alternatif et routier sur la base d'essais de percolation.
- Caractérisation environnementale de niveau 3 : Dans l'hypothèse où les niveaux de caractérisation environnementale précédents ne permettent pas de justifier l'acceptabilité en technique routière d'un matériau alternatif et/ou routier, ou que les procédures ou les essais associés ne semblent pas adaptés à la nature ou au comportement de ces matériaux, le présent guide méthodologique laisse la possibilité de justifier leur acceptabilité en technique routière sur la base d'une étude spécifique.

Cette étude spécifique est élaborée à l'initiative des principales fédérations professionnelles concernées, ou à défaut par l'exploitant d'une installation classée, et validée par le ministère en charge du développement durable, avec l'appui éventuel des organismes publics de son réseau scientifique et technique ou placés sous sa tutelle, en concertation avec des représentants de la maîtrise d'ouvrage et des associations de protection de l'environnement.

1.2. DÉMARCHE ITALIENNE

En Italie, la réglementation des opérations de dragage est définie en fonction de la zone où sont situés les sédiments à draguer : soit dans des zones SIN (pour Sites d'Intérêt National) ; soit dans des zones non-situées dans un SIN. Les zones SIN sont des aires portuaires ou zones marines côtières présentant un besoin de « bonification », soit parce qu'elles présentent une contamination excessive qu'il est nécessaire de remédier, soit parce qu'elles présentent un intérêt écologique particulier qu'il faut préserver. Les zones non SIN sont des aires portuaires ou zones marines côtières non situées en zones SIN.

Les opérations de dragage réalisées au sein des SIN sont régies par l'article 5-bis de la Loi L. 84/1994 (et ses modifications et adjonctions successives) et par le Décret Ministériel (DM) 172/2016 (« Règlement régissant les modalités et normes techniques relatives aux opérations de dragage sur les Sites d'Intérêt National »), sur la base des résultats d'analyses physico-chimiques, microbiologiques et écotoxicologiques, selon les termes du DM du 7/11/2008 et ses modifications et adjonctions successives.

Les opérations de dragage réalisées à l'extérieur des SIN sont régies par le DM 173/2016 ("Règlement fixant les modalités et les critères techniques d'autorisation de l'immersion en mer de matériaux excavés des fonds marins") et par le DM du 24/01/1996, sur la base des résultats d'analyses physico-chimiques, microbiologiques et écotoxicologiques, définis dans ces mêmes décrets.

En Italie, la gestion des sédiments de dragage est orientée quasi-exclusivement vers une gestion marine. La gestion terrestre ne concerne que les sédiments de dragage interdits à une gestion marine (ex. sédiments dangereux) et dont l'exutoire est un stockage en décharge de déchets ; ou ceux dragués dans les zones « SIN » respectant des conditions strictes (cf. point 3 suivant) qui peuvent être employés à terre, tels quels, ou suite à des traitements de désalinisation ou d'élimination des substances polluantes.

1.2.1. Cas des sédiments dragués en zone SIN

Comme indiqué précédemment, les méthodologies et les critères d'exécution des activités de caractérisation des sédiments à draguer en zone SIN sont définis dans le DM 7/11/2008 (modifié par le DM 04/08/2010). Le plan d'échantillonnage prévu pour la caractérisation des sédiments à draguer doit permettre de formuler une hypothèse fiable sur la répartition de la contamination dans l'espace. Dans la mesure du possible, l'analyse géostatistique doit être l'outil à privilégier. En l'absence d'élaboration géostatistique, un critère de précaution doit être utilisé pour calculer et caractériser les volumes à gérer.

Concernant la gestion des sédiments de dragage en zone SIN, les possibilités suivantes sont identifiées, en fonction d'exigences de qualités spécifiques définies selon leurs caractéristiques chimiques, physiques, microbiologiques et écotoxicologiques :

- 1) Dépôt ou reflux dans les masses d'eau d'où ils proviennent ou utilisation pour le remblayage des plages et la formation de sols côtiers, ou pour améliorer l'état des fonds marins par des activités de « capping » : Ces possibilités de gestion marine concernent les sédiments issus des SIN qui présentent, directement ou suite à des traitements ayant pour seul but d'éliminer les polluants (à l'exclusion donc des procédés visant à immobiliser les polluants par solidification ou stabilisation), des caractéristiques physiques, chimiques et microbiologiques similaires à celles du site de destination ; et qu'ils ne présentent pas de résultat positif aux tests écotoxicologiques.
- 2) Refoulement à l'intérieur de casiers étanches, de vasques de collecte ou immobilisation dans des bassins de confinements réalisés en appliquant les meilleures techniques disponibles (conformément aux critères de conception formulés par les normes techniques internationales accréditées et adoptées dans les États membres de l'Union européenne). Les sédiments concernés par ces modes de gestion doivent présenter des caractéristiques garantissant l'absence de risques pour la santé et l'environnement, en relation avec l'obligation de ne pas détériorer la qualité des matrices écologiques, du sol, du sous-sol, des eaux souterraines, des eaux de surfaces, des eaux marines et de transition. Cette réutilisation est autorisée si les sédiments sont jugés non dangereux à l'origine ou suite à des traitements exclusivement destinés à l'élimination des polluants (à l'exclusion donc des procédés visant à immobiliser les polluants par solidification ou stabilisation)

- 3) Utilisation à terre des sédiments à condition que, tels quels, ou après traitement de désalinisation ou d'élimination des polluants (à l'exclusion donc des procédés visant à immobiliser les polluants par solidification ou stabilisation), ils ne présentent pas, en fonction de la destination d'utilisation, des niveaux de contamination supérieurs à ceux indiqués aux colonnes A et B - Tableau 1 - Annexe 5 - Partie IV du D. Lgs. 152/2006, et qu'ils demeurent conformes aux conditions de transfert prévus au DM du 05/02/1998 pour la gestion à terre révisé par l'article 252 du D. Lgs. 152/2006 (lui-même complété par le DM 172/2016 qui traite de la gestion environnementale des phases de dépôt à terre sur les sols). Par ailleurs, dans le cas d'une utilisation à terre des sédiments dans des zones à strates naturellement salées, il est possible d'obtenir une dérogation de dépassement des teneurs lixiviables (i.e. sur éluat) définies à l'annexe 3 du DM du 05/02/1998 pour les sulfates et chlorures, à condition que, avec l'accord de l'autorité territoriale compétente de l'ARPA (Agence régionale de protection de l'environnement), toute modification des caractéristiques du sol récepteur soit évitée.

Pour ces 3 principales filières, le DM 172/2016 offre la description, pour toutes les phases de gestion des sédiments (du dragage au dépôt en passant par le transport, conformément aux usages prévus au paragraphe 2 de l'article 5 bis de la Loi L. 84/1994), des procédures applicables à ces opérations, les mesures d'atténuation et les critères de préparation et de mise en œuvre des activités de surveillance. Demeurent exclues de son champ d'application, les opérations d'entreposage, de transport et de traitement des matériaux qui ne répondent pas aux exigences de qualité établies pour leur utilisation conformément à l'art. 5 bis, L. 84/1994 (et qui restent soumis au régime général des déchets, visés partie IV du D. Lgs. 152/2006), ainsi que les opérations relatives aux matériaux résultant d'opérations de dragage dans les SIN mais destinées à être gérées en dehors des SIN (qui-elles sont régies en application du DM 173/2016 – voir après).

1.2.2. Cas des sédiments dragués en dehors de zone SIN

Comme indiqué précédemment, les opérations de dragage en dehors des SIN sont réglementées par le DM 173/2016 qui établit les modalités d'octroi de l'autorisation d'immersion volontaire en mer des matériaux visés au paragraphe a), alinéa 2, de l'article. 109 du décret législatif 152/2006 (matériaux d'excavation des fonds marins ou des fonds marins saumâtres ou des terres côtières de surface) pour garantir la protection du milieu marin.

Cette réglementation détermine également :

- Les critères homogènes pour l'ensemble du territoire national relatifs à l'utilisation des matériaux de dragage à des fins de remblayage ou dans des environnements adjacents. Il s'agit des critères, auxquels les régions doivent se conformer, de caractérisation, de classification et d'acceptabilité des matériaux afin d'atteindre ou de maintenir les objectifs de qualité environnementale des masses d'eau marine côtières
- La gestion des matériaux de dragage provenant de zones portuaires et côtières marines non comprises dans les SIN
- La gestion, à l'extérieur des SIN, des matériaux provenant des activités de dragage dans les ports côtiers et les zones marines à l'intérieur des SIN

L'annexe technique du DM 173/2016 régit l'ensemble du processus de caractérisation et de gestion des sédiments à déplacer, y compris la planification et la mise en œuvre de l'échantillonnage, l'analyse en laboratoire (physique, chimique, écotoxicologique, biologique et microbiologique) et la classification de la qualité des sédiments, jusqu'à la formulation d'hypothèses de gestion respectueuses de l'environnement et l'élaboration de plans de surveillance des activités.

Des nouveaux critères d'évaluation intégrée et pondérée ont été introduits dans le DM 173/2016 pour compléter et conforter l'évaluation basée sur les seuls critères d'évaluation tabulaire qui utilisent pour la classification chimique : la comparaison des résultats avec les niveaux chimiques de référence nationaux (L1 et L2) ; pour la classification écotoxicologique : les résultats de la batterie d'essais biologiques utilisés. Les critères d'intégration pondérée appliqués aux analyses chimiques prennent en compte le type de paramètre, le nombre de contaminants supérieur aux seuils établis ainsi que l'importance du dépassement par rapport aux seuils établis, la toxicité pressentie des éléments selon qu'ils figurent dans la liste des substances « prioritaires » ou dans celle des matières « dangereuses et prioritaires » ou qu'ils soient mentionnés dans la Convention de Stockholm sur les POP (Polluants Organiques Persistants) et se fondent sur l'élaboration d'un Quotient de Risque chimique (HQc) permettant de pondérer les sédiments selon leur classement de « risque absent » à « risque très élevé ».

Les critères d'intégration pondérée appliqués aux analyses écotoxicologiques prennent en compte les caractéristiques particulières des essais biologiques inclus dans la batterie employée, dont l'importance statistique de la différence d'effet entre l'échantillon et le contrôle ; la gravité de l'effet ; le type d'exposition (aigüe ou chronique) ; la représentativité environnementale de la matrice testée.

La classification écotoxicologique pondérée se fonde donc sur un critère de risque écotoxicologique pouvant aller « d'absent » à « très élevé », élaboré à partir de l'intégration pondérée des résultats de toutes les composantes de l'ensemble des batteries d'essais biologiques utilisés.

La catégorie de Qualité des sédiments résulte donc de l'intégration de la classification chimique et écotoxicologique par l'application des critères tabulaires et des critères d'intégration pondérée.

Cinq catégories de qualités des sédiments (A, B, C, D, E) ont ainsi été définies, allant de risque « absent » à « risque élevé ». Ces 5 catégories d'appartenance du matériau définissent *in fine* les options de gestion disponibles :

Catégorie A :

- ✓ Remblayage de la plage émergée avec une teneur en fraction fine (silt + argile ; <63µm) ≤ 10 % ou autre valeur établie sur une base régionale
- ✓ Remblayage de la plage immergée avec fraction sablonneuse prédominante
- ✓ Immersion volontaire dans des zones marines non côtières (au-delà de 3miles nautiques de la côte)
- ✓ Immersion dans un environnement marin côtier adjacent

N.B. : Pour chacune de ces options une activité de surveillance environnementale doit-être prévue et réalisée.

Catégorie B :

- ✓ Immersion volontaire dans des zones marines non côtières (au-delà d'une distance de 3 milles de la côte) avec surveillance environnementale
- ✓ Immersion dans un environnement contigu à la zone portuaire, y compris pour des opérations de capping, avec surveillance environnementale

Catégorie C :

- ✓ Immersion dans un environnement contigu de la zone portuaire, capable de contenir toutes les fractions granulométriques des sédiments dragués, y compris des opérations de capping à l'intérieur des zones portuaires avec des mesures de surveillance environnementale adaptées

Catégorie D :

- ✓ Immersion dans un environnement contigu imperméabilisé, avec des mesures de surveillance environnementale adaptées

Catégorie E :

- ✓ Éventuelle élimination de l'environnement marin avec prise de mesures garantissant la sécurité, après évaluation des risques, selon les termes de la législation en vigueur

En plus des nouveaux critères d'évaluation intégrée et pondérée qui permettent la revue des classes de qualité des sédiments et des options de gestion, le DM 173/2016 introduit également d'autres éléments importants, tels que : la « Fiche d'Aménagement du Territoire » pour une collecte et une valorisation des informations antérieures en préalable aux phases suivantes ; la possibilité d'adapter le niveau de caractérisation des sédiments en fonction du type d'environnement (Axe 1 : Caractérisation complète pour les zones situées à l'intérieur des ports et les zones situées en dehors de l'entrée des ports et/ou les zones soumises à des obstructions récurrentes ou fortuites de l'accès maritime pour des volumes annuels totaux supérieurs ou égaux à 40 000 m³ / Axe 2 : Caractérisation simplifiée pour les zones côtières non portuaires, les embouchures de fleuves non portuaires, les zones situées à l'intérieur de ports exclusivement de plaisance, les zones situées à l'extérieur de l'entrée des ports et/ou les zones soumises à des obstructions récurrentes ou fortuites de l'accès maritime, pour des volumes totaux annuels de matières inférieurs à 40 000 m³) et en fonction des données déjà disponibles ; la priorité accordée aux résultats de la caractérisation écotoxicologique par rapport aux analyses chimiques.

2. CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS ÉTUDIÉS

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

- ✓ Centuri
- ✓ Toulon
- ✓ Cagliari
- ✓ Livourne

2.1. CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS SELON LA DÉMARCHE FRANÇAISE

2.1.1. Caractérisation des propriétés de danger des sédiments

➤ Caractérisation des propriétés de danger HP4 à HP8, HP10, HP11 et HP13 des sédiments

L'analyse de la composition des sédiments permet de vérifier leur positionnement vis-à-vis des valeurs limites permettant de garantir le caractère non dangereux d'un sédiment au titre des propriétés de danger HP4 à HP8, HP10, HP11 et HP13 selon la démarche simplifiée proposée par le Groupe de travail piloté par l'INERIS et le CEREMA (Rapport INERIS-DRC-15-149793-06416A).

La composition des quatre sédiments étudiés est comparée à ces seuils dans le tableau suivant.

Tableau 1 – Composition des quatre sédiments et valeurs limites permettant de garantir le caractère non dangereux au titre des propriétés de danger HP4 à HP8, HP10, HP11 et HP13

Paramètre	Seuils INERIS – CEREMA (mg/kg MS)	Sédiment Centuri (mg/kg MS)	Sédiment Toulon (mg/kg MS)	Sédiment Cagliari (mg/kg MS)	Sédiment Livourne (mg/kg MS)
Arsenic	330	4,43	7,94	29	14,3
Cadmium	530	<0,40	<0,40	2,52	<0,40
Chrome VI	250	159 (Cr T)	10,9 (Cr T)	14,5	45,2
Cuivre	4000	51,2	14	63,5	27,3
Mercure	500	<0,1	0,33	0,9	<0,1
Nickel	130	125	9,2	9,64	43,5
Plomb	1000	25,6	45,7	175	16,6
Zinc	7230	83,6	57,9	358	68,2
PCB (7 congénères)	50	0,001	0,024	0,012	<0,001
HAP (16 US-EPA)	500	0,26	<0,002	0,006	1,83
Tributylétain	3000	0,134	0,005	0,015	0,007

Ces résultats montrent que les quatre sédiments étudiés ne présentent pas une composition caractéristique de sédiments dangereux selon la démarche simplifiée INERIS – CEREMA.

➤ **Caractérisation de la propriété de danger HP14 des sédiments**

La caractérisation écotoxicologique des sédiments a été réalisée en appliquant la procédure d'évaluation de la propriété HP14 telle que définie par le rapport INERIS-DRC-15-149793-06416A.

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 :

- ✓ 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.

a. Préparation des échantillons

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

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

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

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

Conformément au protocole cité 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 conductivité des éluats pour essais a été mesurée après filtration.

Après filtration, Les éluats ont été conservés à l'obscurité, à +4°C pour une mise en route des bioessais dans les 48h.

b. Essai d'inhibition de la luminescence de la bactérie Vibrio fischeri

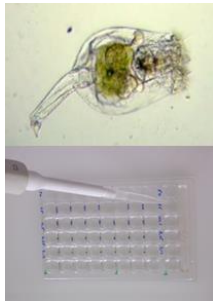


Cet essai permet d'évaluer la toxicité aiguë d'un éluat de sédiment après filtration à 0,45 µm. Il est effectué dans les conditions de la norme NF EN ISO 11348-2 (NF T 90-320). L'essai est réalisé avec des bactéries luminescentes lyophilisées du commerce. Il se déroule dans une enceinte climatisée à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

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.

d. 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.

e. Résultats

Les lots de sédiments prélevés pour les essais à l'échelle pilote pour Centuri et Toulon présentent les caractéristiques écotoxicologiques suivantes :

- Les sédiments de **Toulon** et **Livourne** utilisés pour les essais pilotes sont issus des mêmes lots que les sédiments caractérisés dans le cadre de la caractérisation préliminaire (cf. livrable T2.1.1). Leurs caractéristiques écotoxicologiques obtenues par l'application de la procédure dite « aux seuils » sont rappelées ci-dessous

Tableau 2 – Synthèse des résultats de la batterie d'essais HP14 aux seuils, réalisée sur les sédiments de Toulon et Livourne, et conclusions (valeurs de référence INERIS 2016)

Sédiment	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C)	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 germination de <i>A. sativa</i> à 10%	Inhibition de la croissance de <i>A. sativa</i> à 10%	Conclusions HP14
Valeur limite supérieure	-	50%	20%	50	50	-
Toulon	2 575	0 %	15,7 % - 3,1 %	0 %	0 % ^(f)	non dangereux
Livourne	2 181	0 %	25,6 % - 31,3 %	2,8 %	0 % ^(f)	dangereux

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

- Les sédiments de **Centuri** et **Cagliari** utilisés pour les essais pilotes ont fait l'objet d'un nouveau prélèvement. Leurs caractéristiques écotoxicologiques obtenues par l'application de la procédure HP14 complète sont rappelées ci-dessous :

Tableau 3 – Synthèse des résultats de la batterie d'essais HP14 complète, réalisée sur les sédiments de Centuri et Cagliari, et conclusions (valeurs de référence INERIS 2016)

Sédiment	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C)	CE50 - Inhibition de la luminescence de <i>V. fischeri</i>	CE20 - Inhibition de la reproduction de <i>B. calyciflorus</i>	CE50 - Inhibition de la germination de <i>A. sativa</i>	CE50 - Inhibition de la croissance de <i>A. sativa</i>	Conclusions HP14
Valeur limite inférieure	-	10%	1%	10%	10%	-
Centuri	4 195	>80 %	>90 %	26,3 %	30 %	non dangereux
Cagliari	3 430	>80 %	>90 %	23,7 %	27,4 %	non dangereux

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.

Ces résultats montrent que parmi les 4 sédiments étudiés à l'échelle pilote, seul celui de Livourne présenterait un caractère dangereux de par ses propriétés écotoxiques. Dans le cadre de la démarche française, ce sédiment ne pourrait pas faire l'objet d'une valorisation en l'état.

2.1.2. Caractérisation environnementale de niveau 1

L'analyse de la fraction lixiviable des sédiments permet de vérifier leur positionnement vis-à-vis des valeurs limites en lixiviation permettant de justifier toutes les utilisations prévues par le guide SETRA « Acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale ».

La fraction lixiviable des quatre sédiments étudiés est comparée à ces seuils dans le tableau suivant.

Tableau 4 – Fraction soluble des quatre sédiments et valeurs limites en lixiviation permettant de justifier toutes les utilisations prévues par le guide SETRA « Acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale »

Paramètre	Ensemble de valeurs à respecter par au moins 80% des échantillons (mg/kg MS)	Centuri (mg/kg MS)	Toulon (mg/kg MS)	Cagliari (mg/kg MS)	Livourne (mg/kg MS)
As	0,5	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Ba	20	<0,10	<0,10	0,44	0,29
Cd	0,04	<0,002	<0,002	0,003	<0,002
Cr total	0,5	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Cu	2	0,25	<0,20	0,52	<0,20
Hg	0,01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Mo	0,5	0,62	1,27	1,02	0,19
Ni	0,4	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Pb	0,5	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Sb	0,06	0,012	0,033	0,079	<0,005
Se	0,1	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Zn	4	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Fluorures	10	7,64	9,52	8,46	5,88
Chlorures	800	16500	9350	5970	4360
Sulfates	1000	3790	1980	5600	5370
Fraction soluble	4000	39300	21200	23400	16900

Ces résultats ne permettent pas de valider l'acceptabilité environnementale des quatre sédiments étudiés. En effet, chacun des sédiments présente au moins un dépassement des valeurs limites du Tableau 4.

La fraction lixiviable des quatre sédiments étudiés est comparée aux valeurs limites à ne pas dépasser pour être candidat à une utilisation en technique routière dans le tableau suivant.

Tableau 5 – Fraction soluble des quatre sédiments et valeurs limites à ne pas dépasser pour être candidat à une utilisation en technique routière

Paramètre	Quantité relarguée à L/S=10 (mg/kg MS)	Centuri (mg/kg MS)	Toulon (mg/kg MS)	Cagliari (mg/kg MS)	Livourne (mg/kg MS)
As	2	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Ba	100	<0,10	<0,10	0,44	0,29
Cd	1	<0,002	<0,002	0,003	<0,002
Cr total	10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Cu	50	0,25	<0,20	0,52	<0,20
Hg	0,2	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Mo	10	0,62	1,27	1,02	0,19
Ni	10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Pb	10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Sb	0,7	0,012	0,033	0,079	<0,005
Se	0,5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Zn	50	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Fluorures	150	7,64	9,52	8,46	5,88
Chlorures(*)	15000	16500	9350	5970	4360
Sulfates(*)	20000	3790	1980	5600	5370
Fraction soluble(*)	60000	39300	21200	23400	16900

(*) Concernant les chlorures, les sulfates et la fraction soluble, il convient, pour être jugé conforme, de respecter soit les valeurs associées aux chlorures et aux sulfates, soit de respecter les valeurs associées à la fraction soluble.

Ces résultats montrent que, sous réserve de vérification de leur variabilité, ces sédiments peuvent être candidats à une utilisation en technique routière mais pour lesquels il convient d'envisager la réalisation d'une caractérisation environnementale de niveau 2 ou 3.

2.1.3. Caractérisation environnementale de niveau 2

La norme NF EN/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 EN TS 14405 a été appliqué à chacun des quatre sédiments. Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant

Tableau 6 – Caractérisation du comportement à la percolation des quatre sédiments et valeurs limites permettant de justifier certaines utilisations en technique routière

Paramètre	Quantité relarguée à L/S=10 (mg/kg MS) – (essai de percolation NF EN/TS 14405)					
	Scénario « Sous-couche de chaussée ou d'accotement revêtu »	Scénario « Remblai technique ou accotement recouverts »	Centuri (mg/kg MS)	Toulon (mg/kg MS)	Cagliari (mg/kg MS)	Livourne (mg/kg MS)
As	0,8	0,5	0,041	0,024	0,033	0,008
Ba	56	28	0,162	0,114	0,209	0,119
Cd	0,32	0,16	0,002	0,004	0,015	0,001
Cr total	4	2	0,007	0,004	0,003	0,003
Cu	50	50	0,039	0,045	0,068	0,030
Hg	0,08	0,04	0,001	0,001	0,001	0,013
Mo	5,6	2,8	0,81	1,45	2,38	0,16
Ni	1,6	0,8	0,054	0,023	0,052	0,014
Pb	0,8	0,5	0,012	0,005	0,004	0,003
Sb	0,4	0,2	0,012	0,028	0,148	0,005
Se	0,5	0,4	0,005	0,016	0,004	0,006
Zn	50	50	0,145	0,155	0,452	0,025
Fluorures	60	30	16,5	6,24	16,6	5,83
Chlorures	10 000	5 000	13 124	33 839	7 754	4 250
Sulfates	10 000	5 000	5 259	9 313	17 230	6 563

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

- Aucun des quatre sédiments 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'acotement 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. De tels essais en lysimètre ont été réalisés sur ces quatre sédiments. Ils sont présentés au chapitre 5 de ce document.

2.2. CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS SELON LA DÉMARCHE ITALIENNE

2.2.1. Évaluation écotoxicologique des sédiments prélevés dans la vasque de stockage du port de Cagliari et de Livourne

Les matrices suivantes sont généralement prises en compte lors de l'évaluation de la toxicité d'un sédiment et des contaminants associés : le sédiment en tant que tel, l'eau interstitielle et l'éluât.

Bien que les sédiments en tant que tels représentent le scénario d'exposition le plus réaliste, la réalisation d'essais biologiques sur les sédiments en tant que tels peut nécessiter un investissement considérable en ressources humaines, en matériel et en temps. Contrairement au sédiment tel qu'il est, l'eau interstitielle est une matrice qui peut représenter une voie d'exposition directe pour de nombreuses espèces, mais pas toujours pour tous les types de sédiments (principalement des échantillons sableux) ; il est possible d'extraire une quantité d'eau interstitielle utile pour effectuer une batterie de tests et la méthodologie d'extraction peut entraîner des altérations physico-chimiques (pH et potentiel redox en particulier) de la matrice elle-même qui peuvent affecter la biodisponibilité réelle de tout contaminant présent.

L'éluât parmi les trois matrices traitées représente celui qui est le plus facilement extractible du sédiment et trouve une large application dans une vaste gamme d'essais biologiques avec des espèces appartenant à différents niveaux trophiques et pour cette raison, il est largement utilisé pour effectuer des examens préliminaires rapides et/ou de routine, en particulier lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser certains paramètres sur le sédiment tel quel.

Les essais sur les éluutriats (ou éluats) simulent l'exposition à des sédiments remis en suspension en mélangeant les sédiments avec de l'eau de mer et sont destinés à fournir des indications sur le rejet de contaminants dans la colonne d'eau suite au déversement de sédiments dans la mer, le rejet de sédiments dans la mer et la remise en suspension de sédiments dans des environnements contaminés, tels que les vasques de colmatage (CDF) et la remise en suspension de sédiments dans les zones draguées.

Pour l'évaluation de la toxicité potentielle des matériaux prélevés dans les vasques de colmatage de Livourne et de Cagliari, une batterie de tests composée de la bactérie *Vibrio fischeri* (test en phase solide), de l'algue *Phaeodactylum tricornutum*, de l'échinoderme *Paracentrotus lividus* et, afin d'évaluer la réutilisation potentielle sur terre des sédiments prélevés, l'ostracode *Heterocypris incongruens* a été utilisée. Après le traitement par lavage, les différentes fractions granulométriques des sédiments obtenues ont été testées à nouveau par *H. incongruens* pour évaluer la toxicité résiduelle après le traitement.

➤ Préparation des matrices à tester

L'éluatriat (ou éluât) est la matrice aqueuse dans laquelle se trouve la partie soluble des substances extractibles du sédiment (ASTM, 1994) et qui simule mieux les effets liés au mouvement du fond marin et au dragage (USEPA/USACE, 1991 ; Onorati et Volpi Ghirardini, 2001), activités récemment normalisées en Italie dans le cadre de l'annexe technique du DM 173/2016.

Dans la littérature, il existe différentes méthodes de préparation des éluats (USEPA/USACE, 1991 ; USEPA, 2001) en fonction de la nature de l'environnement (Volpi Ghirardini et al., 2005 ; Arizzi Novelli et al., 2006, 2007) et du but de l'utilisation (USACE, 2003 ; annexe technique du DM 173/2016).

Dans la présente étude, les éluats ont été préparés selon la méthode indiquée dans le protocole ASTM E1367 - 03(2014) en combinant quatre volumes d'eau de mer filtrée (ou eau de mer artificielle) avec une portion en poids de sédiment (poids sec). La suspension ainsi obtenue a été agitée pendant 1 h à 400 tr/min ; la phase liquide a ensuite été recueillie et centrifugée à 4 °C pendant 20 min à 1200 x g.

➤ **Essai biologique avec *Vibrio fischeri***

Vibrio fischeri est une bactérie marine Gram-négative et hétérotrophe appartenant à la famille des Vibrionaceae. Elle est cosmopolite, mais avec une plus grande diffusion 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. Comme en présence de contaminants l'émission de lumière par *V. fischeri* diminue, 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 degré de toxicité de la substance ou de la matrice testée.

Le système de mesure est assez polyvalent car il est applicable aux matrices naturelles, en particulier marines, aqueuses (eau interstitielle, éluat, etc.) et solides (boue, sédiment), ainsi qu'aux solutions aqueuses de substances toxiques organiques et inorganiques pures.

La phase solide a été préparée par simple centrifugation réfrigérée (3500 tours/minute à 4°C pour 30'), éliminant ensuite l'eau interstitielle comme surnageant.

Protocoles de référence et procédure adoptée

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

Les méthodes utilisées sont conformes au protocole de la norme ISO 11348. Pour les échantillons de sédiments centrifugés, le protocole du test en phase solide (SPT) a été appliqué avec la méthode des grands échantillons (Azur Environmental, 1995b) organisée avec 9-12 dilutions et 3 contrôles en fonction de la taille des particules de l'échantillon. Le test comprend une première exposition de 20 minutes pendant laquelle les bactéries sont en contact direct avec le sédiment et une seconde phase de 10 minutes supplémentaires pendant laquelle la remise en 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 traitée par un logiciel dédié (Microtox OmniTM v. 1.16) et a déterminé la valeur de la CE50. La valeur CE50 obtenue a été élaborée plus avant, en l'exprimant à la fois comme TU (Toxic Units = 100/CE50), afin d'obtenir une relation directe entre la toxicité et la réduction de la bioluminescence, et comme Sediment Toxicity Index (S.T.I.), 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., 1999).

Afin d'exprimer le résultat du test sur l'échelle S.T.I., étant donné que le test en phase solide est en fait appliqué sur la fraction granulométrique < 1 mm et que la composante naturelle de la toxicité est fonction de la fraction fine (pélique), une analyse granulométrique a également été effectuée pour identifier la proportion entre les deux fractions mentionnées, ce qui est essentiel pour l'évaluation du niveau réel de toxicité aiguë. Les méthodes utilisées pour identifier ces fractions granulométriques sont divisées en 3 étapes :

1. Traitement de l'échantillon avec une solution d'H₂O₂ pour faciliter la séparation et la désintégration du sédiment
2. Tamisage sur un jet d'eau distillée à l'aide de tamis ASTM 63 µm et 1 mm
3. Récupération des fractions obtenues et séchage dans une étuve, en éliminant la fraction > 1 mm

La matrice solide (centrifugée) a été jugée toxique lorsque la valeur STI était supérieure à 1. L'échelle adoptée pour la quantification de la toxicité est donnée dans le tableau 4 (ICRAM-APAT, 2007).

L'échelle adoptée pour la quantification de la toxicité est indiquée dans le tableau XX (ICRAM-APAT, 2007).

Tableau 7 – Échelles de toxicité aiguë utilisées dans l'essai biologique de *V. fischeri*

Matrice	Toxicité absente/négligeable	Toxicité présente	Toxicité haute	Toxicité très élevée
Phase solide	S.T.I. ≤ 3	3 < S.T.I. ≤ 6	6 < S.T.I. ≤ 12	S.T.I. > 12

➤ Essai biologique avec *Paracentrotus lividus*

La fiabilité de l'oursin en tant que bioindicateur est reconnue dans le monde entier et, depuis les années 1980, les tests de fécondation et de développement de l'embryon figurent sur la liste du ICES (1997) des tests biologiques les plus fiables pour le suivi de la pollution marine.

Des procédures standard pour les tests de fécondation et de développement des embryons ont été mises au point pour les espèces de la côte Est (*Arbacia punctulata*, *Strongylocentrotus droebachiensis*) et de la côte Ouest (*Strongylocentrotus purpuratus*, *Strongylocentrotus droebachiensis*, *Dendraster excentricus*) aux États-Unis (USEPA, 1994 ; ASTM, 1995) et au Canada (Environnement Canada, 1992). En Italie, l'espèce autochtone *Paracentrotus lividus*, a trouvé une application dans le domaine de l'écotoxicologie, notamment en ce qui concerne l'étude des effets sur la fécondation et le développement embryonnaire (défauts de développement et aberrations mitotiques) des substances pures et des effluents. Cependant, le test biologique avec *P. lividus*, peut être utilisé à la fois pour estimer la toxicité des substances ou des préparations solubles dans l'eau de mer et pour évaluer la qualité des matrices salines du milieu marin telles que l'eau interstitielle et l'éluat.

Procédure à suivre pour effectuer le test d'embryotoxicité :

L'essai biologique de développement embryonnaire de l'oursin a pour finalité le développement de la larve de *P. lividus* à pluteus à quatre bras (P4). Le test de développement embryonnaire avec *P. lividus* a été effectué sur la base des méthodes décrites dans le cahier d'écotoxicologie de l'ISPRA n° 11/2017 (ISPRA, Quaderni -Ricerca Marina n° 11/2017) et brièvement décrites ci-dessous.

Les organismes utilisés pour ce travail ont été prélevés dans le système en circuit fermé (RAS) présent dans les laboratoires de l'ISPRA à Livourne, où les organismes sont élevés et maintenus dans des conditions de maturité sexuelle au moyen de régimes alimentaires ad hoc.

Une fois récupérés des bassins de reproduction, les organismes ont été amenés à libérer des gamètes par injection de 0,5 ml de KCl 0,5 M à travers la membrane péristomiale avec une seringue à insuline.

Les œufs ont été récupérés dans des béciers en verre de 100 ml remplis d'eau de mer, en plaçant la femelle avec le pore génital face à l'eau (Fig. 1A).

Le sperme a été récupéré "à sec" directement des gonopores de l'animal (Fig. 1B) par aspiration à l'aide d'une pipette Pasteur en verre et stocké à 4 °C dans un tube de 1,5 ml (type Eppendorf®).

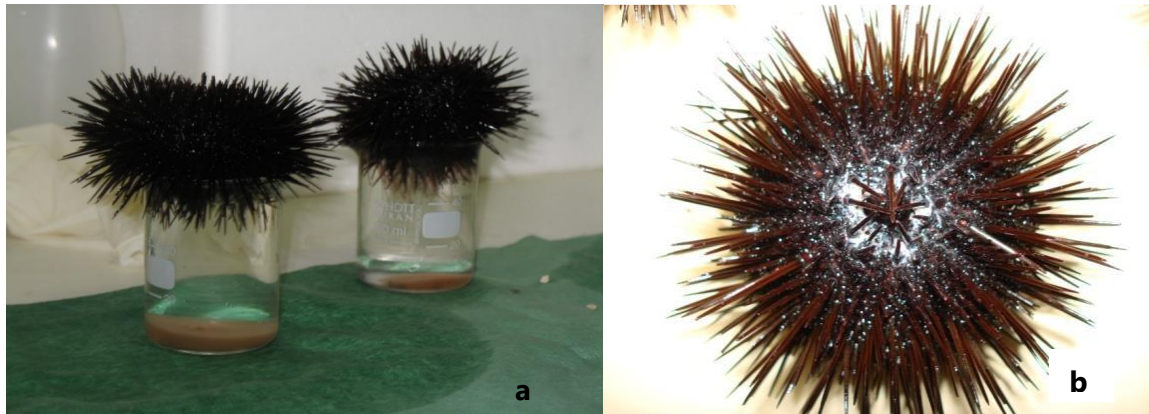


Figure 1 - Récupération des gamètes de *P. lividus* : émission d'ovules (a) et de spermatozoïdes (b)

Les œufs ont d'abord été observés au microscope pour évaluer leur qualité (objectifs 4x et 10x), en éliminant les œufs qui étaient vides, irréguliers ou petits.

Les œufs conformes ont été transférés dans des béchers en verre de 500 ml contenant de l'eau de mer filtrée (FSW) à l'aide de pipettes Pasteur en plastique. La suspension d'œufs a été diluée à une densité de 1000 œufs/mL, puis fertilisée par l'ajout de quelques μ l de sperme. Après 20 minutes, on a vérifié que tous les œufs étaient effectivement fertilisés. Le test d'embryotoxicité a été réalisé en exposant 1 ml de solution d'œufs fécondés pendant 72 h dans 10 ml de l'éluat à tester. L'éluat a été testé tel quel (100%) et dilué avec de l'eau de mer filtrée à 0,45 μ m à des concentrations finales de 25% et 50%.

En parallèle, un contrôle négatif, consistant en l'exposition des œufs fécondés à de l'eau de mer filtrée (FSW) à 0,45 μ m et un contrôle positif par exposition à la substance toxique de référence, le nitrate de cuivre ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \times 3\text{H}_2\text{O}$), ont été mis en place pour évaluer la sensibilité des gamètes.

Normalement, à 18°C, les zygotes se développent et atteignent le stade larvaire en 48h, mais la durée d'exposition choisie pour le test (72h) garantit que tous les zygotes atteignent le stade larvaire (pluteus) dans le témoin négatif. Le test a été fixé avec quelques gouttes de solution Lugol forte.

À la fin du test, on a déterminé le % de larves qui se sont développées normalement.

Afin d'obtenir une estimation plus précise des effets embryotoxiques, les anomalies de développement ont été distinguées en distinguant les plutei malformés, c'est-à-dire les larves développées mais présentant des malformations du squelette et/ou du tube digestif, et les stades pré-larvaires de blastula, gastrula, prisme et panache précoce, qui se bloquent avant d'atteindre le développement complet.

Les pourcentages d'embryons malformés détectés dans les échantillons d'éluats testés et dans le témoin positif ont été utilisés pour le calcul de la CE20 et de la CE50 respectivement par le Tox Calc 5.0 (analyse probit) et le Trimmed Spearman-Kärber (Hamilton et al., 1978). L'échelle adoptée pour la quantification de la toxicité est indiquée dans le tableau XX (ICRAM-APAT, 2007).

Tableau 8 – Échelle de toxicité de l'essai avec *P. lividus*

CE20/CE50	Toxicité
CE20 ≥ 90%	Absents/ Négligeable
CE20 < 90% e CE50 > 100%	Moyenne
40% ≤ CE50 ≤ 100%	Haute
CE50 < 40%	Très élevée

➤ Essai biologique avec *Phaeodactylum tricornutum*

Les premières méthodes internationales de référence pour l'utilisation d'algues monocellulaires dans les tests d'inhibition de la croissance des algues pour l'étude de la contamination des eaux marines et côtières remontent aux années 1970 (IRSA, 1978). La méthode de test des algues pour les organismes marins a été mise à jour avec la norme UNI ISO 10253 (2006) qui prévoit l'utilisation de *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin et *Skeletonema costatum*. Les deux algues peuvent être utilisées, selon ce protocole, pour des essais avec des éluats ou des extraits de sédiments entiers ou avec de l'eau surnageante ou interstitielle.

Les tests sur les microalgues sont parmi les plus couramment utilisés en raison de la facilité et de la rentabilité de leur entretien en laboratoire et de leur réaction rapide à la qualité de l'environnement (Kraynukova 1988 ; Lewis 1995).

Phaeodactylum tricornutum est une diatomée Bacillariophyta largement répandue dans les zones estuariennes et côtières et, dans le domaine de l'écotoxicologie, son utilisation pour l'évaluation de la qualité de l'eau, des sédiments et des eaux usées industrielles a été signalée par plusieurs auteurs (dos Santos et al. 2002 ; Nash et al. 2005 ; Zhuravel et al. 2009 ; Morreno Garrido et al. 2007 ; Morelli et al. 2009 ; Okay et al. 1994).

Les principaux indices considérés dans ces documents étaient la densité cellulaire (Okay et al. 1994 ; dos Santos et al. 2002 ; Morreno-Garrido et al. 2007 ; Zhuravel et al. 2009), mais aussi les réponses physiologiques et biochimiques, comme la teneur en chlorophylle a et la taille des cellules (Zhuravel et al. 2009), la concentration de phytochelatines et de peptides endocellulaires liant les métaux (Morelli et al. 2009) et la fluorescence retardée (Nash et al. 2005).

L'évaluation du taux de croissance est une procédure facile à réaliser et sensible, car l'augmentation ou la réduction de la croissance des cellules de microalgues par rapport au contrôle peut être liée à la pollution des matrices aqueuses (Khristoforova et al. 2001 ; Aizdaicher et al. 1999).

Caractéristiques générales du test

Le principe du test est d'exposer une culture d'algues pures en phase de croissance exponentielle pendant plusieurs générations à des concentrations d'échantillons connues, dans des conditions physico-chimiques standardisées et avec un apport en nutriments défini et homogène. À la fin de la période d'incubation, la croissance des algues dans l'échantillon est comparée à celle du témoin.

Le test biologique a été réalisé selon les protocoles ISO 10253 (2016) et ARPAT (1998 ; Draft, 2003), avec quelques modifications spécifiques.

Entretien de la culture de l'algue mère et étapes préparatoires

Les cultures de cellules mères ont été maintenues dans un milieu de croissance approprié à une salinité de 35 ± 3 g/Kg, avec des renouvellements périodiques pour les maintenir en phase de croissance exponentielle. À partir de la culture mère, une pré-culture avec une densité cellulaire comprise entre 2×10^3 et 10^4 cellules/ml a été préparée 2 à 4 jours avant le début du test et incubée dans les mêmes conditions.

La densité cellulaire obtenue par la pré-culture a ensuite été évaluée immédiatement avant d'être utilisée pour la préparation de la culture de l'inoculum à densité cellulaire définie.

Méthodologie d'exécution des tests

Une aliquote de la culture de l'inoculum a été ajoutée à la solution d'essai et à une quantité appropriée de milieu de culture concentré.

La solution ainsi obtenue, d'une densité cellulaire comprise entre 8×10^3 et $1,2 \times 10^4$ cellules/mL, a ensuite été distribuée en triple exemplaire dans des plaques stériles jetables à 24 puits (ARPAT IRSA-CNR, 2003 ; ISO 10253:2016) et placée pendant 72h dans une chambre thermostatique à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, en régime continu de lumière blanche froide et d'une intensité comprise entre 7 000 et 8 000 lux.

De l'eau de mer filtrée et stérilisée avec un débit de salinité de 30‰ avec l'ajout de la même quantité de milieu de culture et d'inoculum que celle utilisée pour les échantillons, a été considérée comme un témoin négatif. En même temps, un contrôle positif a été effectué en utilisant le dichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) comme toxique de référence pour contrôler la procédure et la sensibilité du test.

À la fin de la période d'incubation prédéterminée, la densité d'algues de chaque réplique a été déterminée après remise en suspension de la solution contenue dans chaque puits.

Toutes les évaluations de densité d'algues ont été effectuées par comptage au microscope inversé à l'aide d'une chambre de comptage de cellules Thoma.

Analyse des résultats

Les densités cellulaires enregistrées à la fin du test ont été comparées à la concentration cellulaire initiale et déterminant :

Facteur de croissance (FC) = Cf/Ci

Taux de croissance (TC) = $(\ln \text{Cf} - \ln \text{Ci})/3$

Coefficient de variation (CV) = Écart-type des valeurs du taux de croissance des répliques uniques/Moyenne des taux de croissance des répliques * 100

Avec :

Cf = concentration finale (cellules/mL)

Ci = concentration initiale (cellules/mL)

Pour que le test soit considéré comme valide, le contrôle négatif (SW) devait répondre aux critères de validation suivants : $\text{FC} \geq 16$; $\text{TC} \geq 0,9 \text{ d}^{-1}$; $\text{CV} \leq 5 \%$.

Un autre critère de validation du test a été la détermination de la valeur de la CE50 enregistrée avec le dichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), qui a ensuite été comparée à la gamme prise comme référence par le protocole ISO 10253 (2016) (CE50 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 = 14,8 - 25,4 \text{ mg/L}$, $n = 7$)

Le taux d'inhibition (I) a ensuite été calculé pour chaque échantillon testé :

$I = (\text{TC Échantillon X} - \text{TC Contrôle}) / \text{TC Contrôle} * 100$

Pour exprimer le jugement de toxicité, on a utilisé l'échelle d'évaluation présentée dans le Tableau 9, basée sur le pourcentage d'inhibition enregistré lors de l'essai de l'éluat à 100 %.

Tableau 9 – Échelle de toxicité utilisée dans l'essai biologique avec *Phaeodactylum tricornutum*

Valore di Inibizione	Évaluation de la toxicité
$I \leq -50\%$	Biostimulation
$-50\% < I < 20\%$	Absente / négligeable
$20\% \leq I \leq 50\%$	Modérée
$50\% \leq I \leq 80\%$	Haute
$80\% < I \leq 100\%$	Très élevée

➤ Test de toxicité avec l'ostracode *Heterocypris incongruens*

Les ostracodes sont des organismes benthiques principalement situés à l'interface entre l'eau et les sédiments et sont particulièrement sensibles à la toxicité libérée par le substrat car ils se nourrissent de particules solides. L'espèce *Heterocypris incongruens* est considérée comme particulièrement adaptée aux tests de toxicité des sols car elle est sensible aux polluants organiques et inorganiques. Le test avec *H. incongruens* sur matrice solide dure 6 jours et évalue deux paramètres différents : la mortalité (effet aigu) et l'inhibition de la croissance (effet chronique) par rapport à un témoin. Le test est effectué sur des nourrissons éclos d'œufs de longue durée (kystes) conservés dans l'obscurité à 4 °C. Le sol artificiel de l'OCDE (1984) est utilisé pour le contrôle.

Avant l'essai, les kystes d'*H. incongruens* ont été éclos dans une boîte de Pétri (Ø 5 cm) avec 10 ml d'eau douce standard (SF) pendant 52h sous une lumière continue 39(3000 - 4000 lux) à une température de 25 ± 2 °C. La composition de l'eau douce standard est la suivante :

- MgSO_4 60 mg l⁻¹
- NaHCO_3 96 mg l⁻¹
- KCl 4 mg l⁻¹
- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 60 mg l⁻¹

La SF doit être stockée dans l'obscurité à 4°C et doit être ventilée et amenée à température ambiante avant utilisation. Après 48 heures à partir du début de l'éclosion des kystes, un préchargement avec des algues *Spirulina* sp. a été effectué et l'incubation a continué pendant 4 heures supplémentaires. Le test a été réalisé dans une plaque à six puits (\varnothing 4 cm) et des organismes nouveau-nés d'une longueur de corps initiale comprise entre 200 et 250 μm ont été utilisés. La procédure (Chial et Persoone, 2003 modifié) prévoyait l'ajout dans chaque puits d'une quantité de terre fraîche équivalente à 400 mg de terre sèche, 4 ml d'eau douce standard et une suspension d'algues d'une population de *S. capricornutum* avec une concentration finale de $1,5 \cdot 10^7$ cellules. ml^{-1} . La suspension a été secouée et décantée pendant 20 minutes. 10 ostracodes ont été transférés dans chaque puits, les plaques ont été fermées avec du parafilm et un couvercle et incubées dans l'obscurité à 25 ± 2 °C pendant 6 jours. A la fin du test, les survivants ont été transférés sur une plaque à plusieurs puits pour le comptage et la mesure de la longueur du corps. Les mesures sous le stéréomicroscope (Zeiss Stemi 2000-C) ont été effectuées à l'aide d'une échelle graduée de 50 μm , après immobilisation des ostracodes avec une goutte de solution fixatrice (Lugol). Les résultats ont été exprimés en pourcentage de mortalité (effet aigu) et en pourcentage d'inhibition de la croissance (effet chronique) par rapport au contrôle.

L'échelle adoptée pour la classification écotoxicologique est la suivante :

Tableau 10 – Échelle de toxicité pour le test de 6 jours avec *H. incongruus*

Mortalité corrigée avec Abbott	Toxicité
$M \leq 15\%$	ABSENTE / NÉGLIGEABLE
$15\% < M \leq 30\%$	MOYENNE
$30\% < M \leq 60\%$	HAUTE
$M > 60\%$	TRÈS ÉLEVÉE

2.2.2. Résultats

➤ Résultats du test *P. tricornutum*

Les paramètres de validation du test de *P. tricornutum*, testé à la fin de l'incubation (72h), ont satisfait aux critères d'acceptabilité du test et la valeur CE50 calculée avec le toxique de référence $K_2Cr_2O_7$ était dans la fourchette du protocole ISO 10253 (2006) (tableau 1).

Tableau 11 – Paramètres de validation du test

Paramètres de validation du test	Paramètre	Résultat requis	Résultat constaté
Contrôle négatif (SW)	FC (facteur de croissance après 72h)	> 16	79,35
	TC (taux de croissance après 72h) (d-1)	> 0,9	1,46
	CV (Coefficient de variation) (%)	< 5	0,59
$K_2Cr_2O_7$	CE50 (mg/L) 72h	14,8 – 25,4 mg/L	19,78 (17,19 - 22,37)

Le Tableau 12 indique les valeurs de concentration d'algues (cellules/mL) et d'inhibition de la croissance (%) obtenues pour le contrôle d'eau de mer filtrée (FSW) et pour chaque échantillon testé.

Tableau 12 – Résultats des essais avec *P. tricornutum* basés sur les valeurs en pourcentage de l'inhibition de la croissance des algues (I) à 72h

	Conc. algale 72h (cells/mL)		Inhibition de la croissance (%)		verdict de Toxicité
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	
FSW	829167	21311	0,00	0,59	-
Cagliari TQ	949583	61794	-3,58	1,73	Absent / négligeable
Livorno TQ	1048750	38689	-6,26	1,00	Absent / négligeable

Les valeurs du pourcentage d'inhibition (I) étaient comprises entre -50% et 20%, ce qui, selon le tableau de référence, correspond à des niveaux d'effet absents ou négligeables.

➤ Résultats du test P. lividus

Vous trouverez ci-dessous les paramètres de validation (Tableau 13) et les résultats de l'essai par ensilage d'embryons réalisé avec P. lividus (Tab. 14)

Tableau 13 – Paramètres de validation des tests P.lividus

Paramètres de validation du test	Paramètre	Résultat requis	Résultat obtenu
Contrôle négatif (FSW)	% plutei (P4) normoformé	> 80 %	89%
Contrôle positif Cu(NO ₃) ₂ *3H ₂ O	CE ₅₀ (µg L ⁻¹)	22,60 - 68,34	29,13 (26.57- 31.28)

Tableau 14 – Résultats de l'essai d'embryotoxicité avec P. lividus. Le tableau indique la moyenne (\bar{x}) des plutei malformés, l'écart-type (σ) et la valeur de la CE20/CE50 déterminée par l'analyse Probit

Échantillon	Dilution	P4 Normoformés (répliques)			Moyenne Malformés (\bar{x})	σ	CE20/CE50	Jugement Toxicité
Controllo	-	87	91	89	11,00	2,00	-	-
Cagliari TQ	100	32	30	35	67,67	2,52	CE50 = 71,98 (60.30 - 85.49)	Toxicité élevée
	50	59	62	60	39,67	1,53		
	25	83	85	85	15,67	1,15		
Livorno TQ	100	60	58	63	60,33	2,52	CE20= 45,32 (39,31- 51,63); CE50>100	Toxicité élevée
	50	62	63	6	64,33	3,21		
	25	80	78	7	78,00	2,00		

Les résultats de l'analyse de P. lividus ont montré une toxicité élevée pour les deux échantillons testés.

➤ Résultats du test avec *V. fischeri*

Voici les résultats des tests réalisés sur la phase solide avec *V. fischeri*

Tableau 15 – Résultats de l'essai avec la bactérie bioluminescente *V. fischeri*

Échantillon	Sable <1mm (%)	Fines (%)	Seuil de toxicité Naturelle (TU)	Tox Mesurée (TU)	Intervalle de confiance à 95%. (TU)	R2 (%)	S.T.I.	Jugement Toxicité
Cagliari TQ	75,11	24,89	103	21,128	17,630 - 25,314	98,90	0,20	Absente / négligeable
Livorno TQ	52,20	47,80	175	272,595	184,629 - 402,397	96,01	1,56	Absente / négligeable

Les résultats de l'essai sur *V. fischeri* n'ont montré aucune toxicité pour les échantillons testés.

➤ Résultats du test avec *H. incongruens*

Voici les résultats obtenus sur le sédiment tel quel (TQ) et sur les différentes fractions granulométriques obtenues suite au traitement de lavage du sol.

Tableau 16 – Résultats de l'essai avec *H. incongruens*

Échantillon	Mortalité (%)	σ	Jugement Toxicité
Témoin Cagliari	5	0,55	-
Cagliari TQ	3,33	0,82	Absente / négligeable
Cagliari SG	13,33	1,21	Absente / négligeable
Cagliari SF	11,67	1,47	Absente / négligeable
Cagliari PE	20,00	1,90	Moyenne
Témoin Livorno	5	0,84	-
Livorno TQ	26,67	2,07	Moyenne
Livorno SG	11,67	1,60	Absente / négligeable
Livorno SF	18,33	1,33	Absente / négligeable
Livorno PE	45,00	2,81	Haute

Les résultats obtenus montrent, pour les sédiments de Cagliari, une légère criticité pour la fraction fine. Ce résultat est probablement dû à la concentration de contaminants (tant organiques qu'inorganiques) dans la fraction fine après le traitement de lavage du sol, comme déjà souligné dans le "LIVRABLE T2.3.3 : SÉPARATION GRANULOMÉTRIQUE ET TRAITEMENT DE LAVAGE DU SOL".

2.2.3. Discussion

Les sédiments de Cagliari ont une contamination principalement liée à la présence de Pb, Cd, Zn et d'hydrocarbures C>12. Si la contamination initiale n'entraîne pas d'effets toxiques pour les espèces testées *V. fischeri*, *P. tricornutum* et *H. incongruus*, le test d'embryotoxicité avec *P. lividus* a montré une toxicité élevée, ce qui est plausible compte tenu de la grande sensibilité des larves de cette espèce aux contaminants tant organiques qu'inorganiques, comme le signalent plusieurs études scientifiques dans la littérature (Ices 1997 ; Arizzi Novelli et al, 2002, 2003a,b ; Russo et autres, 2003 ; Losso et autres, 2004 ; Angelini et autres, 2005, Schröder et autres, 2005 ; Gaion et autres, 2013 ; Sartori et autres, 2016 ; Pagano et autres (2017)).

Les sédiments prélevés dans le bassin de remplissage du port de Livourne sont légèrement contaminés par des composés organostanniques, Ni et Zn, et les concentrations d'hydrocarbures dépassent la valeur L2 de DM173/2016. Conformément à l'essai avec l'oursin *P. lividus*, l'essai réalisé sur le sédiment tel qu'il est à l'aide de l'ostracode *H. incongruus* a également montré une toxicité modérée du sédiment tel qu'il est (QT). Tout aussi significative est la toxicité détectée par ce test dans la fraction fine obtenue après le traitement par lavage du sol, où les contaminants inorganiques (Ni, Cu, Zn) et organiques (Organostanniques et Hydrocarbures) dépassent largement les niveaux de concentration L2 indiqués dans le DM173/2016 (voir "LIVRABLE T2.3.3 : SÉPARATION GRANULOMÉTRIQUE ET TRAITEMENT DE LAVAGE DU SOL").

2.2.4. Intégration via le logiciel Ecotox Sediqualsoft®

L'outil SediQualSoft 109.0® a été utilisé pour l'intégration pondérée des données écotoxicologiques et chimiques et pour la classification de la qualité des sédiments. Ce système a été développé par l'Université Polytechnique des Marches (Département des Sciences de la Vie et de l'Environnement - Ancône) en collaboration avec l'ISPRA et a été adopté dans la classification de la qualité des sédiments marins et saumâtres selon le D.M. 173 du 15 juillet 2016.

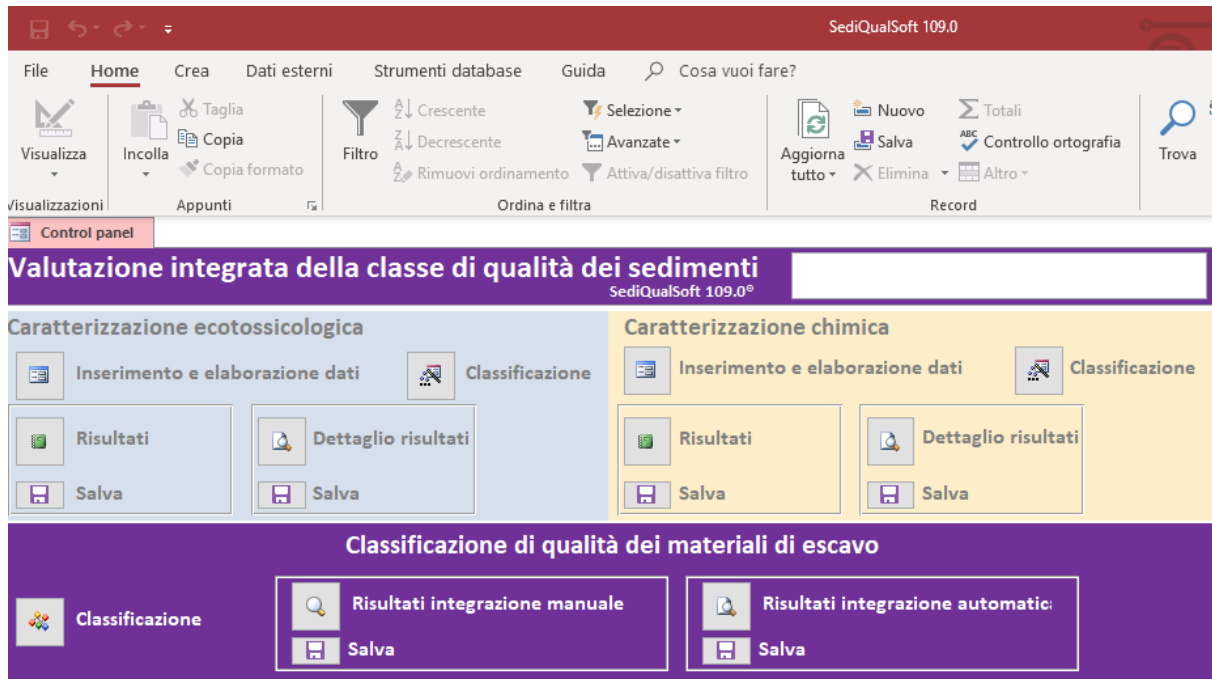


Figure 2 - Écran principal du logiciel SediQualSoft® 109.0

L'outil est organisé en 3 modules (Figure 2) et les données analytiques sont importées via un tableur Excel (Figure 3) et traitées à l'aide d'algorithmes et d'organigrammes spécifiques.

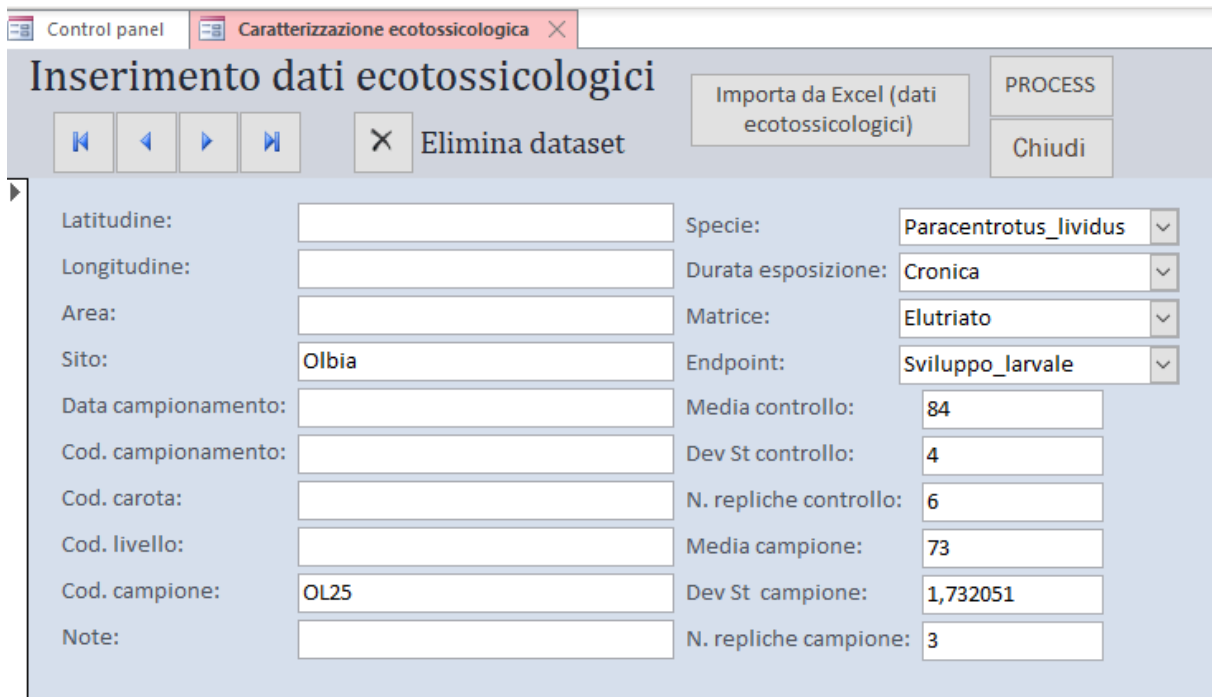


Figure 3 - Saisie de données écotoxicologiques dans SediQualSoft® 109.0

Les deux premiers modules, relatifs à la caractérisation écotoxicologique et à la caractérisation chimique, fournissent le QG (Quotient de risque) correspondant et la classe de risque correspondante (entre "Absent" et "Très élevé") ; le troisième module intègre les deux modules précédents et attribue la classe de qualité des sédiments.

➤ **Intégration des données écotoxicologiques**

Les critères pour l'intégration pondérée des résultats écotoxicologiques, afin de fournir l'indice de danger HQb, prennent en considération 5 caractéristiques spécifiques des essais biologiques inclus dans la batterie d'enquêtes (Appendice 2B - Annexe technique du décret ministériel 173/2016) :

- la signification statistique de la différence d'effet entre l'échantillon et le témoin
- mesure de l'effet par rapport à la variation minimale considérée comme biologiquement significative pour chaque condition expérimentale (valeur seuil définie pour chaque essai)
- la sévérité de l'effet (c'est-à-dire la gravité de l'état final)
- le type d'exposition (aiguë ou chronique)
- la représentativité de la matrice testée

Des poids sont attribués à chaque caractéristique individuelle.

Après la saisie des données, le logiciel applique le critère d'intégration pondérée aux résultats écotoxicologiques (appendice 2B - Annexe technique du décret ministériel 173/2016) en tenant compte des aspects suivants :

- ✓ vérification de l'exactitude des données individuelles
- ✓ calcul de l'effet (E_i) : compris comme la variation en pourcentage du paramètre analysé par rapport au témoin compensé par la correction d'Abbott
- ✓ calcul du coefficient Z : ce paramètre a une valeur égale à 1 lorsque l'échantillon est significativement différent du témoin alors qu'il diminue avec la diminution de la signification. Cette correction permet de réduire le poids global d'un test qui n'est pas statistiquement significatif
- ✓ calcul de l'effet corrigé (E_{iw}) : chaque E_i est multiplié par son propre coefficient Z et comparé au "seuil" spécifique pour ce dosage. Le E_{iw} indique combien de fois la variation mesurée dans un test dépasse la variation biologiquement pertinente

- ✓ calcul de HQb : indice de danger de la batterie d'essais écotoxicologiques calculé en additionnant les effets pondérés (Eiw) des essais individuels multipliés par le facteur W2 correspondant au produit des poids attribués aux 5 caractéristiques décrites ci-dessus
- ✓ la normalisation de HQb sur une échelle comprise entre 0 et 10 (figure 3)

HQ BATTERIA DI SAGGI	CLASSE DI PERICOLO
< 1	Assente
≥1 – 1.5	Basso
≥ 1.5 – 3.0	Medio
≥ 3.0 – 6.0	Alto
≥6.0 – 10.0	Molto alto

Figure 4 - Classes de danger écotoxicologique par rapport aux valeurs HQ de la batterie de tests (Tableau A3 du décret ministériel 173/2016)

Les données HQb finales, normalisées, fournissent une classe de danger de l'échantillon (également marquée par différentes couleurs, comme le montre la Figure 4).

➤ Intégration des données chimiques

Les critères pour l'intégration pondérée des données chimiques, pour fournir l'indice de danger HQc, prennent en compte la classe du contaminant, le nombre de contaminants dépassant les paramètres de référence et la gravité de l'excès. Tous les paramètres chimiques sont inclus dans différentes listes de dangers et de priorités, sur la base desquelles ils sont pondérés, afin d'accorder plus d'importance aux polluants ayant une toxicité plus élevée, une plus grande tendance à la bioaccumulation et une plus grande persistance dans l'environnement. En ce qui concerne l'intégration pondérée des résultats écotoxicologiques, également pour le traitement des données chimiques, l'annexe technique du décret ministériel 173/2016 introduit une séquence de calculs à effectuer :

1. la vérification de l'exactitude des données
2. vérification de la présence de valeurs de référence L1 et L2 ou de valeurs de référence locales (selon la réglementation en vigueur dans la zone d'enquête) pour tous les paramètres chimiques analysés

3. calcul du ratio à la référence (RTR) : ratio entre chaque paramètre chimique et sa valeur de référence
4. calcul du RTR corrigé (RTRw) : chaque RTR est multiplié par le poids attribué à la classe chimique du contaminant
5. calcul du HQc : l'indice de danger quantitatif est calculé en additionnant la moyenne des paramètres chimiques ayant un poids <1 et la somme des paramètres chimiques ayant un poids >1
6. normalisation du HQc à une classe de danger avec une échelle entre 0 et 13 (Figure 5).

HQc	CLASSE DI PERICOLO
0 – < 0.7	Assente
0.7 – < 1.3	Trascurabile
1.3 – < 2.6	Basso
2.6 – < 6.5	Medio
6.5 – < 13.0	Alto
≥13.0	Molto Alto

Figure 5 - Classes de danger chimique par rapport aux valeurs HQc (Tableau C.2 du D.M. 173/2016)

Comme pour la batterie écotoxicologique, les données finales de l'intégration chimique, HQc, normalisées, fournissent une classe de danger de l'échantillon.

➤ Attribution d'une classe de qualité aux matériaux excavés

L'attribution de la classe de qualité aux matériaux excavés résulte de l'intégration de la classification chimique et écotoxicologique obtenue par l'application des critères d'intégration pondérés (appendice 2C - Annexe technique du décret ministériel 173/2016).

Enfin, l'intégration des deux quotients de risque (HQb et HQc), réalisée par le logiciel, fournit une classe de qualité du matériau, comme le résume la figure 5, à laquelle correspondent les différentes utilisations indiquées dans l'annexe technique du décret ministériel 173/2016 (figure 6).

Classe di pericolo ecotossicologico elaborato per l'intera batteria (HQ _{Batteria})	Classificazione chimica	Classe di Qualità del materiale
Assente	HQ _C (L2) ≤ Trascurabile	A
	Basso ≤ HQ _C (L2) ≤ Medio	B
	HQ _C (L2) = Alto	C
	HQ _C (L2) > Alto	D
Basso	HQ _C (L1) ≤ Basso	A
	HQ _C (L1) ≥ Medio e HQ _C (L2) ≤ Basso	B
	Medio ≤ HQ _C (L2) ≤ Alto	C
	HQ _C (L2) > Alto	D
Medio	HQ _C (L2) ≤ Basso	C
	HQ _C (L2) ≥ Medio	D
≥ Alto	HQ _C (L2) ≤ Basso	D
	HQ _C (L2) ≥ Medio	E

Figure 6 - Classification de la qualité des sédiments selon les critères d'intégration pondérés (Tab 2.7 Annexe technique du D.M. 173/2016)



Figure 7 - Options de gestion compatibles avec la classification de la qualité des matériaux à draguer

2.2.5. Intégration des données chimiques et écotoxicologiques des échantillons de sédiments de Cagliari et Livourne par SediQualSoft® 109.0.

L'intégration pondérée des données chimiques à l'aide de SediQualSoft® 109.0 a montré, pour les échantillons de Cagliari, un risque chimique élevé (HQc), principalement en raison des concentrations élevées de Pb et de TBT. Pour les sédiments prélevés dans le réservoir de Livourne, le risque chimique associé était quasiment absent (Figure 8).

Caratterizzazione chimica dei sedimenti

Ente: **ISPRA**

Latitudine:
 Longitudine:
 Area:
 Sito:
 Data:
 Cod. campionamento:
 Cod. carota:
 Livello:
 Cod. campione: **Cagliari 1**
 % Pelite: **22,41379**

Note

Lista parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)

	L1	L2
Indice HQc	26,555	6,87
Max % contr a HQc	27,7% (TBT)	38,5% (Pb)
N° param. non conformi	7	3
N° param. con riferimento	23	18
N° param. analizzati	37	37
Classe di gravità del pericolo	MOLTO ALTO	ALTO

Caratterizzazione chimica dei sedimenti				Ente: ISPRA
Cod. Campionamento	Cod. Campione	L1	L2	Note
		ND	ND	Lista parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)
		ND	ND	Lista parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)
		ND	ND	Lista parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)
		ND	ND	Lista parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)
	Cagliari 1	MOLTO ALTO	ALTO	Lista parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)
	Livorno 1	BASSO	ASSENTE	Lista parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)
N. campioni	6			

Figure 8 - Rapport de l'intégration des résultats de la caractérisation chimique des sédiments effectuée par SediQualSoft® 109.0

L'intégration pondérée des résultats écotoxicologiques à l'aide du logiciel SediQualSoft® 109.0 n'a révélé aucun danger écotoxicologique (batterie HQ) pour les deux sédiments analysés (Figure 9).

Caratterizzazione ecotossicologica dei sedimenti								Ente: ISPRA
Area	Sito	Cod. campione	Campionamento	Specie	HQ (specifico)	HQ Batteria	Classe di gravità del pericolo ecotossicologico	
		Cagliari 1				0	ASSENTE	
				Vibrio_fischeri	0			
				Paracentrotus_lividus	0			
				Phaeodactylum_tricornutum	0			
		Livorno 1				0,53	ASSENTE	
				Vibrio_fischeri	0,65			
				Paracentrotus_lividus	1,68			
				Phaeodactylum_tricornutum	0			

Figure 9 - Rapport de l'intégration des résultats de la caractérisation écotoxicologique des sédiments effectuée par SediQualSoft® 109.0

L'intégration de la classification chimique et écotoxicologique a conduit, pour les sédiments de Cagliari et de Livourne, à l'identification des classes de qualité suivantes (figure 9).

Classificazione di qualità dei materiali di escavo									Ente: ISPRA
Cod. Campione	cod. Campionamento	Sito	Classe di pericolo ecotossicologico	Contributo % elutriato	Classe di pericolo chimico	% Pelite	Classe di qualità del materiale	Note	
Cagliari 1			ASSENTE	0	HQc(L2) = Alto	22,41379	C		
Livorno 1			ASSENTE	72,1	HQc(L2) <= Trascurabile	38,46154	A	Pelite superiore a quanto indicato per ripascimento emerso (Allegato tecnico, Figura 7)	
N. classificazione ecotossicologica:			2						
N. classificazione chimica:			2						
N. classe di qualità dei materiali:			2						

Figure 10 - Identification de la classe de qualité des sédiments de Cagliari et Livourne à l'aide de SediQualSoft® 109.0

Sur la base de la classification obtenue, les sédiments stockés dans le bassin de stockage de Livourne ont été jugés appropriés (classe A) pour les options de rechargement de plage et d'immersion délibérée en pleine mer.

La classe de qualité attribuée aux sédiments de Cagliari s'est avérée être C. Pour les matériaux appartenant à cette classe de qualité, les options de gestion possibles sont le confinement dans des environnements clos, comme les réservoirs de colmatage et l'éventuel recouvrement à l'intérieur des zones portuaires.

3. TRAITEMENT DES SÉDIMENTS ET FORMULATION DE MATÉRIAUX

Parmi les scénarios de valorisation, le Comité de pilotage du programme a souhaité orienter l'utilisation de sédiments ou de leurs fractions sableuses dans l'élaboration de matériaux employés dans des chantiers de VRD, d'utilisation courante, susceptibles de pouvoir utiliser des quantités importantes de sédiments dragués.

Ainsi, une étude de formulation a été confiée au LERM (en sous-traitance de l'INSA de Lyon) avec l'objectif d'incorporer dans une formulation de mortier de remblaiement de tranchées et dans une formule de béton courant, des sédiments marins dragués qui seront ou non traités par écrêtage sur des tamis de différentes mailles.

3.1. ÉCHANTILLONS TESTÉS ET PROGRAMME D'ESSAIS

Cette étude a été menée sur les sédiments de Toulon, Cagliari et Livourne, les résultats obtenus devant permettre la réalisation d'une formulation avec le sédiment de Centuri. Seuls les sédiments de Cagliari et de Livourne ont fait l'objet d'essais de formulation avant et après traitement par tamisage au laboratoire.

Les essais réalisés en laboratoire sont les suivants :

- ✓ préparation de deux sédiments par homogénéisation et quartage afin d'obtenir 2 lots
- ✓ élimination du refus à 4 mm afin d'obtenir un sable 0/4 mm (trois sédiments non traités)
- ✓ traitement de deux des trois sédiments par élimination du refus à 2 mm et du passant à 0,063 mm afin d'obtenir un sable 0,063/2 mm (deux sédiments traités)
- ✓ analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1

- ✓ mesures des masses volumiques et du coefficient d'absorption d'eau selon la norme NF EN 1097-6 pour les sédiments traités et selon l'annexe G de cette même norme pour les sédiments non traités (conservation des fines 0/0,063 mm),
- ✓ détermination de la teneur en chlorures après extraction aqueuse selon la norme NF EN 1744-1§ 7,
- ✓ détermination de la teneur en sulfates solubles dans l'eau selon la norme NF EN 1744-1§ 10.2,
- ✓ mise au point de formulations de mortier de remblaiement de tranchées (observation des propriétés à l'état frais et confection de 4 éprouvettes cylindriques),
- ✓ mise au point de formulations de béton courant (observation des propriétés à l'état frais et confection de 4 éprouvettes cylindriques),
- ✓ Confection de corps d'épreuve destinés à la caractérisation environnementale et mécanique,
- ✓ mesure de la résistance mécanique à la compression à l'échéance de 28 jours selon la norme NF NE 12390-3.

Les échantillons testés ainsi que les matériaux et réactifs employés sont rassemblés dans le tableau suivant :

Tableau 17 – Identification des échantillons testés et des matériaux et réactifs employés

Réf. LERM	Réf. INSA	Caractéristiques
43604-1A	CAGLIARI	Elimination du refus à 4 mm <i>Sédiments non traités</i>
43604-1B		Elimination du refus à 2 mm et du passant à 0,063 mm <i>Sédiments traités</i>
43604-2A	LIVORNO PUNTO 1	Elimination du refus à 4 mm <i>Sédiments non traités</i>
43604-2B		Elimination du refus à 2 mm et du passant à 0,063 mm <i>Sédiments traités</i>
43604-3	TOULON	Elimination du refus à 4 mm <i>Sédiments non traités 0,040/4 mm</i>
43604-4	-	Sable 0/4 mm SCL Alluvions du Gardon Carrière de Montfrin - GSM
43604-5	-	Gravillon 6,3/16 mm RL Alluvions du Gardon Carrière de Montfrin - GSM
43604-6	-	Ciment CEM I 52,5 N CE CP2 NF Ciments Calcia – Usine de Beaucaire
43604-7	-	CHRYSO®Fluid Optima 206 Superplastifiant Haut réducteur d'eau

Le traitement des échantillons de sédiment devant faire l'objet des essais de formulation a été réalisé par séparation des fractions supérieures à 2 mm et inférieures à 0,063 µm. Ces séparations ont été effectuées par tamisage à sec au laboratoire.

3.2. CARACTÉRISATION PRÉLIMINAIRE

3.2.1. Caractérisation chimique des sédiments

La teneur en chlorures a été déterminée après extraction aqueuse selon la norme NF EN 1744-1§ 7 et la teneur en sulfates solubles dans l'eau a été déterminée selon la norme NF EN 1744-1§ 10.2.

Les résultats sont donnés dans le

Tableau 18.

Tableau 18 – Résultats des analyses chimiques sur sédiments

Réf. LERM	Réf. INSA	Teneur en sulfates (% massique)	Teneur en chlorures (% massique)
43604-1A	CAGLIARI <i>Sédiments non traités</i>	0,20	0,61
43604-1B	CAGLIARI <i>Sédiments traités</i>	0,18	0,01
43604-2A	LIVORNO PUNTO 1 <i>Sédiments non traités</i>	0,17	0,13
43604-2B	LIVORNO PUNTO 1 <i>Sédiments traités</i>	0,14	< 0,01
43604-3	TOULON <i>Sédiments non traités</i>	0,09	< 0,02

3.2.2. Caractérisation physique des sédiments

Les analyses granulométriques par tamisage ont été réalisées selon la norme NF EN 933-1.

Les résultats sont donnés dans le Tableau 19 et illustrés par la Figure 11.

Les mesures des masses volumiques et du coefficient d'absorption d'eau pour les sédiments traités sont réalisées selon la norme NF EN 1097-6 et selon l'annexe G de cette même norme pour les sédiments non traités (conservation des fines 0/0,063 mm).

Les résultats sont donnés dans le tableau 20.

Tableau 19 – Résultats des analyses granulométriques

Réf. LERM	43604-1A	43604-1B	43604-2A	43604-2B	43604-3
Réf. INSA	CAGLIARI <i>Sédiments non traités</i>	CAGLIARI <i>Sédiments traités</i>	LIVORNO PUNTO 1 <i>Sédiments non</i>	LIVORNO PUNTO 1 <i>Sédiments traités</i>	TOULON <i>Sédiments non traités</i>
Ouverture du tamis (mm)	Pourcentage de tamisats cumulés				
4	100	100	100	100	100
2	100	100	100	100	100
1	98	98	99	99	97
0,63	95	95	96	97	95
0,25	77	67	38	26	86
0,125	37	15	18	6	64
0,063	24	1	14	0	30
0,040	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré	14

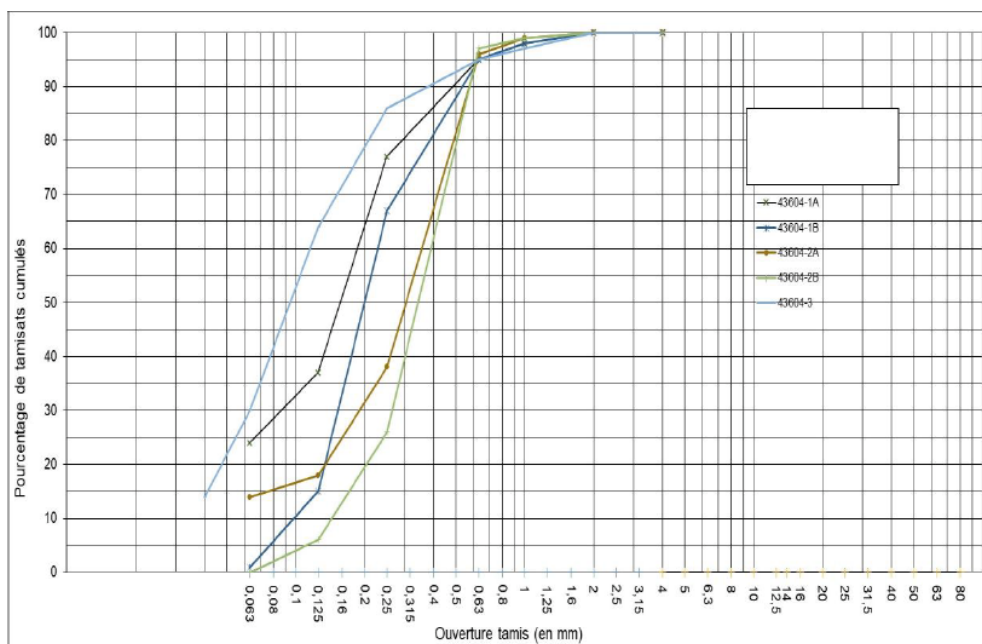


Figure 11 – Illustration des résultats des analyses granulométriques

Tableau 20 – Résultats des masses volumiques et absorption d'eau

Réf. LERM	Réf. INSA	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Absorption d'eau (%)
43604-1A	CAGLIARI <i>Sédiments non traités</i>	2700	1,2
43604-1B	CAGLIARI <i>Sédiments traités</i>	2640	0,2
43604-2A	LIVORNO PUNTO 1 <i>Sédiments non traités</i>	2680	0,4
43604-2B	LIVORNO PUNTO 1 <i>Sédiments traités</i>	2680	0,4
43604-3	TOULON <i>Sédiments non traités</i>	2680	0,9

3.3. FORMULATION DES MORTIERS DE REMBLAIEMENT DE TRANCHÉES

Le Tableau 21 donne les compositions massiques des différents mortiers formulés avec les 5 lots de sédiments. Le Tableau 22 donne la consistance à l'état frais, les principales informations de formulation et les résistances mécaniques moyennes à la compression à l'échéance de 28 jours.

Les consistances obtenues pour chaque mortier sont illustrées par les Figure 12 à Figure 16 respectivement pour les mortiers référencés 43604-A, -B, -C, -D et -I.

Tableau 21 – Composition massique des mortiers de remblaiement de tranchées

Réf. LERM	43604-A	43604-B	43604-C	43604-D	43604-I
Sédiments 43064-1A Cagliari non traité	5600 g	-	-	-	-
Sédiments 43604-2A Livorno Punto 1 non traité	-	5600 g	-	-	-
Sédiments 43064-1B Cagliari traité	-	-	5600 g	-	-
Sédiments 43604-2B Livorno Punto 1 traité	-	-	-	5600 g	-
Sédiments 43604-3 Toulon non traité	-	-	-	-	16000 g
Sable 0/4 mm SCL Alluvions du Gardon Carrière de Montfrin - GSM	10400 g	10400 g	10400 g	10400 g	-
Ciment CEM I 52,5 N Usine de Beaucaire - Calcia	3000 g	3000 g	3000 g	3000 g	3000 g
Adjuvant haut réducteur d'eau Optima 206 - Chryso	30 g	30 g	30 g	30 g	30 g
Eau efficace	4082 g	3567 g	3138 g	2947 g	5756 g

Tableau 22 – Propriétés à l'état frais et paramètres de formulation principaux des mortiers de remblaiement de tranchées * : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams et non d'un étalement

Réf. LERM	43604-A	43604-B	43604-C	43604-D	43604-I
Etalement au cône d'Abrams (cm)	60	46	40	41	13*
% massique de sédiments dans le granulat	35	35	35	35	100
% massique de sédiments dans le mortier	24	25	25	25	64
Rapport massique Eau efficace / Ciment	1,36	1,19	1,05	0,98	1,92
Résistance mécanique moyenne à la compression à 28 jours (MPa)	7,7	9,7	10,5	10,3	4,0



Figure 12 – Illustration du mortier 43604-A à l'état frais



Figure 13 – Illustration du mortier 43604-B à l'état frais



Figure 14 – Illustration du mortier 43604-C à l'état frais



Figure 15 – Illustration du mortier 43604-D à l'état frais



Figure 16 – Illustration du mortier 43604-I à l'état frais

3.4. FORMULATION DES BÉTONS COURANTS

Le Tableau 23 donne les compositions massiques des différents bétons formulés avec les 5 lots de sédiments. Le

Tableau **24** donne la consistance à l'état frais, les principales informations de formulation et les résistances mécaniques moyennes à la compression à l'échéance de 28 jours.

Les consistances obtenues pour chaque béton sont illustrées par les Figure 17 à Figure 21 respectivement pour les mortiers référencés 43604-E, -F, -G, -H et -J.

Tableau 23 – Composition massique des bétons courants

Réf. LERM	43604-E	43604-F	43604-G	43604-H	43604-J
Sédiments 43064-1A Cagliari non traité	4350 g	-	-	-	-
Sédiments 43604-2A Livorno Punto 1 non traité	-	4350 g	-	-	-
Sédiments 43064-1B Cagliari traité	-	-	4350 g	-	-
Sédiments 43604-2B Livorno Punto 1 traité	-	-	-	4350 g	-
Sédiments 43604-3 Toulon non traité	-	-	-	-	6090 g
Sable 0/4 mm SCL Alluvions du Gardon Carrière de Montfrin - GSM	4350 g	4350 g	4350 g	4350 g	2610 g
Gravillon 6,3/16 mm RL Alluvions du Gardon Carrière de Montfrin - GSM	9500 g	9500 g	9500 g	9500 g	9500 g
Ciment CEM I 52,5 N Usine de Beaucaire - Calcia	3300 g	3300 g	3300 g	3300 g	3300 g
Adjuvant haut réducteur d'eau Optima 206 - Chryso	46 g	46 g	46 g	46 g	46 g
Eau efficace	2406 g	2341g	1717 g	2111 g	2795 g

Tableau 24 – Propriétés à l'état frais et paramètres de formulation principaux des bétons courants

Réf. LERM	43604-E	43604-F	43604-G	43604-H	43604-J
Affaissement au cône d'Abrams (cm)	9	6	12	17	8
% massique de sédiments dans le granulat	24	24	24	24	33
% massique de sédiments dans le béton	18	18	19	18	25
Rapport massique Eau efficace / Ciment	0,73	0,71	0,52	0,64	0,85
Résistance mécanique moyenne à la compression à 28 jours (MPa)	23,8	28,9	28,2	31,4	25,0



Figure 17 – Illustration du béton 43604-E à l'état frais



Figure 18 – Illustration du béton 43604-F à l'état frais



**Figure 19 – Illustration du béton 43604-G
à l'état frais**



**Figure 20 – Illustration du béton 43604-H
à l'état frais**



Figure 21 – Illustration du béton 43604-J à l'état frais

3.5. SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

L'étude visant à incorporer dans une formulation de mortier de remblaiement de tranchées et dans une formule de béton courant, des sédiments marins dragués qui seront ou non traités par écrêtage sur des tamis de différentes mailles, a permis de dégager les points essentiels suivants :

- les sédiments non traités ont une teneur en chlorures (exprimées en pourcentage massique) inférieure à 0,02 % pour les sédiments provenant de Toulon et égale à 0,13 % et 0,61 % respectivement pour les sédiments provenant de Livorno et Cagliari. Le traitement (élimination des fines inférieures à 63 μm) sur les sédiments de Livorno et Cagliari ont permis de faire baisser cette teneur respectivement à inférieure à 0,01 % et égale à 0,01 %
- les sédiments non traités ont une teneur en sulfates (exprimées en pourcentage massique) égale à 0,09 %, 0,17 % et 0,20 % respectivement pour les sédiments provenant de Toulon, Livorno et Cagliari. Le traitement (élimination des fines inférieures à 63 μm) sur les sédiments de Livorno et Cagliari ont permis de faire baisser cette teneur respectivement égale à 0,14 % et 0,18 %
- au final les chlorures semblent très concentrés dans les fines particules alors que c'est moins vrai pour les sulfates
- le coefficient d'absorption d'eau des sédiments non traités est égal à 0,4 %, 0,9 % et 1,2 % respectivement pour les sédiments de Livorno, Toulon et Cagliari
- le traitement (élimination des fines inférieures à 63 μm) du sédiment de Cagliari permet de diminuer par 6 ce coefficient alors qu'il n'est pas modifié lors du traitement du sédiment de Livorno
- les trois sédiments peuvent être assimilés à un sable fin 0/0,63 mm. Le traitement des sédiments de Livorno et Cagliari permettent d'éliminer la très grande majorité des particules inférieures à 63 μm , soit respectivement une fraction de 14 et 23 % du sédiment
- les mortiers de remblaiement de tranchées ont été formulés avec 35 % (en massique) du squelette granulaire et même 100 % pour le sédiment de Toulon
- les rapports massiques eau efficace / ciment, pour les sédiments non traités permettant d'obtenir la consistance visée, sont respectivement égaux à 1,19 ; 1,36 et 1,92 pour les sédiments de Livorno, Cagliari et Toulon. La forte teneur en fines, avec 14 % de particules inférieures à 40 μm et 30 % de particules inférieures à 63 μm du sédiment de Toulon est très certainement à l'origine du fort besoin en eau mis en évidence. En effet, même pour un dosage en eau très élevé, la consistance visée n'a pas été atteinte. Le traitement des sédiments de Livorno et de Cagliari a permis de faire chuter ce rapport respectivement à 0,98 et 1,05

- les résistances mécaniques à la compression, à l'échéance de 28 jours, sont respectivement égales à 4,0 MPa, 7,7 MPa, 9,7 MPa, 10,3 MPa et 10,5 MPa pour les sédiments non traités de Toulon, Cagliari et Livorno et pour les sédiments traités de Livorno et Cagliari
- les bétons courants ont été formulés avec une substitution de 24% (en massique) du squelette granulaire par les sédiments de Livorno et Cagliari, ce taux atteint même 33 % pour le sédiment de Toulon
- les rapports massiques eau efficace / ciment, pour les sédiments non traités, pour obtenir la consistance visée, sont respectivement égaux à 0,71 ; 0,73 et 0,85 pour les sédiments de Livorno, Cagliari et Toulon. La forte teneur en fines, avec 14 % de particules inférieures à 40 μm et 30 % de particules inférieures à 63 μm du sédiment de Toulon est très certainement à l'origine de besoin en eau élevé. Le traitement des sédiments de Livorno et de Cagliari a permis de faire chuter ce rapport respectivement à 0,64 et 0,52
- les résistances mécaniques à la compression, à l'échéance de 28 jours, sont respectivement égales à 23,8 MPa, 25,0 MPa et 28,9 MPa pour les sédiments non traités de Cagliari, Toulon et Livorno et pour les sédiments traités de Cagliari et Livorno, elles sont respectivement égales à 28,2 MPa et 31,4 MPa

Au final, l'incorporation de sédiments marins dragués dans le mortier et le béton est envisageable mais nécessite des études spécifiques visant à déterminer le pourcentage d'incorporation pour chaque nature de sédiment et pour chaque type d'application visée. Ce pourcentage d'incorporation sera bien entendu fonction d'une part de la qualité initiale des sédiments et du ou des traitement(s) qu'il aura subi et d'autre part, des performances souhaitées pour les bétons ou mortiers visés. On peut d'ores et déjà noter que :

- l'élimination des fines inférieures à 63 μm permet de réduire le besoin en eau et donc d'obtenir de meilleures performances mécaniques,
- la teneur en sulfates est à limiter afin de garantir la durabilité en se prémunissant d'une éventuelle réaction sulfatique interne,
- les teneurs en chlorures sont à maîtrisées pour des applications béton armé.

Par ailleurs, il conviendrait de compléter la caractérisation mécanique par une caractérisation physique en mesurant le retrait de dessiccation du fait de la demande en eau des sédiments ainsi que le gonflement sous eau du fait de la présence éventuelle de particules de type argiles gonflantes.

Enfin, il aurait été intéressant de pouvoir comparer les résultats obtenus à des formules de mortier et béton n'incorporant que des granulats naturels afin de voir l'impact de la demande en eau des sédiments sur les performances mécaniques.

Ce besoin en eau pourrait être limité en utilisant des adjuvants superplastifiants haut réducteur d'eau à des dosages plus élevés mais l'impact économique reste à évaluer.

4. ÉVALUATION GÉOTECHNIQUE ET MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX

4.1. AVANT-PROPOS

Ce document intègre les résultats mis en œuvre par la RAS des essais de caractérisation géotechnique réalisés sur les sédiments de dragage tels quels et leur aptitude dans le secteur routier, avec les résultats des essais sur des échantillons obtenus en mélangeant les sédiments avec d'autres matériaux : sable, gravier, ciment afin de vérifier leur aptitude dans le domaine de l'ingénierie comme le béton ou le mortier. D'autres expérimentations ont également été menées pour vérifier l'utilisation des mélanges sédiments-ciment dans le domaine routier (amélioration de la valeur de l'indice de capacité portante CBR et construction de mélanges cimentés, également additionnés de gravats de démolition (C&D) et de cendres volantes.

4.2. UTILISATION DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE DANS LES MÉLANGES DE CIMENT POUR LA PRODUCTION DE BÉTON

Des sédiments de dragage ont été utilisés par PROVADEMSE INSAVALOR (en sous-traitance de l'INSA de Lyon) et par ISPRA pour fabriquer les matériaux destinés aux essais lysimétriques de Toulon et de Livourne. A cette occasion des éprouvettes ont été réalisées et expédiés en Sardaigne pour cette étude géotechnique. La référence commune pour la France et l'Italie sont les normes européennes (EN).

En particulier, la norme EN 206-1:2006 classe le béton en fonction :

- de sa structure
- de sa densité spécifique (ou poids spécifique)
- de sa résistance à la compression

➤ Classification selon la structure

- a) structure ouverte ou poreuse (la courbe granulométrique du matériau inerte est sans la fraction fine)

- b) structure fermée ou dense (la courbe granulométrique est complète) : il n'y a que de petites cavités entre les grains.

Les spécimens, réalisés avec un mélange de gravier et de sable, ont une structure fermée.

➤ **Classification en fonction du poids spécifique**

On distingue les classes suivantes (EN 206-1:2006) :

- Béton léger : a une densité après séchage dans un four d'au moins 800 kg/m^3 et d'au plus $2\,000 \text{ kg/m}^3$
- Béton normal : a une densité après séchage dans un four supérieure à $2\,000 \text{ kg/m}^3$ mais ne dépassant pas $2\,600 \text{ kg/m}^3$
- Béton lourd : a une densité après séchage dans un four supérieur à $2\,600 \text{ kg/m}^3$

➤ **Classification en fonction de la résistance à la compression**

La résistance à la compression (N/mm^2 ou MP) est exprimée comme la résistance caractéristique des éprouvettes cylindriques (f_{ck}) de 150 mm de diamètre et de 300 mm de hauteur ou des éprouvettes cubiques (R_{ck}) de 150 mm de côté.

Le rapport entre la résistance caractéristique déterminée sur des échantillons cylindriques (f_{ck}) et des échantillons cubiques est : $f_{ck} = 0,83 R_{ck}$. Une distinction est faite sur la base des valeurs de résistance :

- Béton non structurel : C8/10 - C12/15
- Béton à résistance normale (NSC) : C16/20 - C45/55
- Béton à haute performance (BHP) : C50/60 - C60/75
- Béton à haute résistance (HSC) : C70/85 - C100/120

où : C = béton ; 8 = résistance à la compression cylindrique / 10 = résistance à la compression cubique

Afin d'évaluer les résultats obtenus, des éprouvettes témoins ont été testées :

Tableau 25 – Résistance à la compression de bétons témoins et classe de référence

Échantillon	Résistance à la compression sur des éprouvettes cylindriques	Classe de référence
BETON TEMOIN	23,39	C20/25
BETON TEMOIN	20,53	C20/25

D'après les résultats des essais de compression, les échantillons de Béton Témoin entrent dans la catégorie du béton ordinaire car ils se situent entre les classes C16/20 et C45/55.

➤ **Résultats des essais sur les échantillons réalisés à Toulon et à Livourne**

Tableau 26 – Composition massique des bétons avec les sédiments de Toulon et Livourne

Béton Toulon et Béton Livourne	Sédiment brut	Sédiment traité
Matériaux	% sur sec total	
Sédiment	20,19	40,38
sable	20,19	0,00
gravier	44,09	44,09
ciment	15,32	15,32
réducteur	0,21	0,21
Total	100	100
Eau (% sur le total)	10,86	13,69

Tableau 27 – Caractéristiques mécaniques des bétons Toulon brut et Toulon traité

ÉCHANTILLON	MASSE VOLUMIQUE MOYENNE χ (kg/m ³)	CLASSE D'APPARTENANCE	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION MOYENNE σ (N/mm ²) (fck)	CLASSE	CLASSE D'UTILISATION
TOULON BRUT BETON	2.303,91	NORMALE	12,21	C12/15	NON- STRUCTURELLE
TOULON BETON TRAITE'	2.209,60	NORMALE	12,31	C12/15	NON- STRUCTURELLE

Tableau 28 – Caractéristiques mécaniques des bétons Livourne brut et Livourne traité

ÉCHANTILLON	MASSE VOLUMIQUE MOYENNE χ (kg/m ³)	CLASSE D'APPARTENANCE	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION MOYENNE σ (N/mm ²) (fck)	CLASSE	CLASSE D'UTILISATION
LIVORNO BRUT BETON	2.266,80	NORMALE	11,79	C8/10	NON- STRUCTURELLE
LIVORNO BETON TRAITE'	2.264,73	NORMALE	13,57	C12/15	NON- STRUCTURELLE

4.3. Utilisation des sédiments pour la fabrication de mortier

Le mortier peut être utilisé pour fixer des briques ou pour fabriquer divers types de plâtre.

En ce qui concerne la classification, on peut se référer à la norme européenne EN 998-2 qui distingue différentes classes en fonction de la résistance à la compression à 28 jours.

Tableau 29 – Différentes classes de mortier en fonction de la résistance à la compression à 28 jours

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

➤ **Échantillons témoins**

Les valeurs de résistance à la compression suivantes sont disponibles à des fins de comparaison des données

Tableau 30 – Valeurs de résistance à la compression de mortier témoin

Échantillon	Résistance à la compression (N/mm ²)	Classe
MORTIER TMOIN	12,38	M10
MORTIER TMOIN	14,34	M10

➤ **Résultats des essais sur les échantillons réalisés à Toulon, Centuri et Cagliari**

Les spécimens cylindriques, réalisés avec des sédiments de Toulon, Centuri et Cagliari ont la composition suivante :

Tableau 31 – Composition massique des mortiers de sédiments

Composition	Sédiment brut	Sédiment traité
Matériaux	% sur sec total	
Sédiment	29,43	42,04
sable	54,65	42,04
gravier	0,00	0,00
ciment	15,76	15,76
réducteur	0,16	0,16
Total	100	100
Eau (% sur le total)	21,44	16,50

➤ **Résultats des essais**

Tableau 32 – Caractéristiques mécaniques des mortiers Toulon brut et Toulon traité

ÉCHANTILLON	MASSE VOLUMIQUE MOYENNE χ (kg/m ³)	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION MOYENNE σ (N/mm ²) (fck)	CLASSE D'APPARTENANCE EN 998 -2
TOULON BRUT MORTIER	2.015,85	7,17	M5
TOULON MORTIER TRAITÉ'	1.851,89	3,88	M2,5

Tableau 33 – Caractéristiques mécaniques des mortiers Centuri brut et Centuri traité

ÉCHANTILLON	MASSE VOLUMIQUE MOYENNE γ (kg/m ³)	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION MOYENNE σ (N/mm ²) (fck)	CLASSE D'APPARTENANCE EN 998 -2
CENTURI BRUT MORTIER	2.045,92	13,89	M10
CENTURI MORTIER TRAITÉ'	2.081,81	15,44	M15

Tableau 34 – Caractéristiques mécaniques des mortiers Cagliari brut et Cagliari traité

ÉCHANTILLON	MASSE VOLUMIQUE MOYENNE γ (kg/m ³)	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION MOYENNE σ (N/mm ²) (fck)	CLASSE D'APPARTENANCE EN 998 -2
CAGLIARI BRUT MORTIER	1.896,45	5,97	M5
CAGLIARI MORTIER TRAITÉ'	1.853,25	6,39	M5

Comme anticipé, les valeurs de résistance pour Toulon et Cagliari sont modestes (d'environ 50 à 70 kg/cm²), tandis que les spécimens de Centuri, constitués principalement de sables avec un pourcentage variable de posidonies, présentent des valeurs égales à environ le double des précédentes.

L'échantillon de Toulon mortier traité, qui aurait dû fournir une valeur plus élevée que l'échantillon non traité, est également anormal en termes de densité moyenne et de valeur de résistance.

4.4. MÉLANGES DE SÉDIMENTS - CIMENT ET AUTRES MATÉRIAUX (C&D ET CENDRES VOLANTES) POUR LA ROUTE

Les tests expérimentaux ont été effectués sur des échantillons du "bassin de Livourne" et sur les sédiments de Centuri.

La granulométrie et les limites d'Atterberg ont été déterminées sur les échantillons.

➤ Classification des sédiments

Echantillon "VASCA LIVORNO" Toscane – Italie

Tableau 35 – Classification du sédiment Livourne

LIMITES ET INDICES D'ATTERBERG (CNR-UNI-10014)			
Limite de liquide (%)	N.D.	INDICE DES GROUPES (CNR-UNI 10006)	0
Limite plastique (%)	N.D.	CLASSIFICATION (CNR-UNI 10006)	A 2-4
Limite de retrait (%)	N.D.	CLASSIFICATION NF P11 - 300	1 B
Indice de plasticité	N.D.	CLASSIFICATION (U.S.C.S)	SM

Echantillon "CENTURI" Corse – France

Tableau 36 – Classification du sédiment Centuri

LIMITES ET INDICES D'ATTERBERG (CNR-UNI-10014)			
Limite de liquide (%)	N.D.	INDICE DES GROUPES (CNR-UNI 10006)	0
Limite plastique (%)	N.D.	CLASSIFICATION (CNR-UNI 10006)	A 1-b
Limite de retrait (%)	N.D.	CLASSIFICATION NF P11 - 300	1 D
Indice de plasticité	N.D.	CLASSIFICATION (U.S.C.S)	SW

Le test Proctor modifié (AASHO mod.) a permis de déterminer la valeur d'humidité optimale, ce qui permet d'obtenir, par compactage, la densité maximale.

➤ **Tests de compactage A.A.S.H.O³**

Echantillon "VASCA LIVORNO" Toscane – Italie

Tableau 37 – Propriétés de compactage du sédiment Livourne

DENSITÉ MAXIMALE (kN/m ³)	17,65
HUMIDITÉ OPTIMALE (%)	10,50

Echantillon "CENTURI" Corse – France

Tableau 38 – Propriétés de compactage du sédiment Centuri

DENSITÉ MAXIMALE (kN/m ³)	18,14
HUMIDITÉ OPTIMALE (%)	5,00

➤ **Indice CBR**

En référence à ces valeurs d'humidité optimales, des échantillons ont été conditionnés pour la détermination de l'indice CBR sur le sédiment en tant que tel et sur le sédiment auquel on a ajouté un pourcentage croissant de ciment.

Échantillon "VASCA LIVORNO" Toscana – Italia Évaluation "TEL QUEL"

Tableau 39 – Indices CBR du sédiment Livourne « Tel quel »

INDICE C.B.R.		DENSITÉ SÈCHE	HUMIDITÉ (%)			RÉINFLECTION
a 2,5 mm	a 5 mm	kN/m ³	Initiale	Sous piston	le	(%)
27,6	30,5	17,658	9,05	9,24		0,00

³ ASTM D2844 AASHTO T190 CTM 301: Essai d'Exudation d'Humidité de Sols Compactés

Échantillon "VASCA LIVORNO" Toscana – Italia Évaluation avec l'ajout de 5% de ciment

Tableau 40 – Indices CBR du sédiment Livourne avec l'ajout de 5% de ciment

INDICE C.B.R.		DENSITÉ SÈCHE	HUMIDITÉ (%)		RÉINFLECTION
a 2,5 mm	a 5 mm	kN/m ³	Initiale	Sous le piston	(%)
46,7	54,8	18,318	13,71	11,78	0,00

Échantillon "CENTURI" Corse – France Évaluation " TEL QUEL "

Tableau 41 – Indices CBR du sédiment Centuri « Tel quel »

INDICE C.B.R.		DENSITÉ SÈCHE	HUMIDITÉ (%)		RÉINFLECTION
a 2,5 mm	a 5 mm	kN/m ³	Initiale	Sous le piston	(%)
13,4	18,1	17,575	5,68	5,77	0,00

Échantillon "CENTURI" Corse – France Évaluation avec l'ajout de 3% de ciment

Tableau 42 – Indices CBR du sédiment Centuri avec l'ajout de 3% de ciment

INDICE C.B.R.		DENSITÉ SÈCHE	HUMIDITÉ (%)		RÉINFLECTION
a 2,5 mm	a 5 mm	kN/m ³	Initiale	Sous le piston	(%)
53,1	49,3	17,501	10,24	8,52	0,00

Échantillon "CENTURI" Corse – France Évaluation avec l'ajout de 5% de ciment

Tableau 43 – Indices CBR du sédiment Centuri avec l'ajout de 5% de ciment

INDICE C.B.R.		DENSITÉ SÈCHE	HUMIDITÉ (%)		RÉINFLÉCTION
a 2,5 mm	a 5 mm	kN/m ³	Initiale	Sous le piston	(%)
193,3	-----	19,388	8,94	8,86	0,00

Échantillon "CENTURI" Corse – France Évaluation avec l'ajout de 10% de ciment

Tableau 44 – Indices CBR du sédiment Centuri avec l'ajout de 10% de ciment

INDICE C.B.R.		DENSITÉ SÈCHE	HUMIDITÉ (%)		RÉINFLÉCTION
a 2,5 mm	a 5 mm	kN/m ³	Initiale	Sous le piston	(%)
219,1	-----	19,107	13,07	11,41	0,00

Une analyse des données, comparée aux valeurs de l'indice CBR de l'échantillon non traité, montre que, même avec un modeste % de ciment, on obtient une augmentation significative de la valeur de la portance.

4.5. Utilisation des sédiments pour la réalisation de mélanges cimentés

➤ Essais sur les mélanges cimentés (C.N.R. - B.U. n°29 du 07/11/1972) - Détermination de la charge de rupture en compression

Le mélange cimenté est un matériau obtenu en mélangeant un mélange granulaire avec du ciment pour 2,5% - 3,5% du poids du matériau inerte.

Certains mélanges avec des quantités variables de ciment ont été testés afin de confectionner des échantillons de mélange cimenté à soumettre à des épreuves de compression uniaxiale.

Pour chaque mélange, l'humidité optimale a été déterminée par des tests A.A.S.H.O. modifiés. En outre, un mélange composé de sédiments, d'agrégats composés de matériaux de construction et de démolition et de cendres volantes provenant de la combustion du charbon dans les centrales thermoélectriques, en particulier les cendres volantes de Carbosulcis S.p.a., a été testé.

Les tests ont été effectués exclusivement sur des sédiments provenant de Centuri.

Des échantillons avec l'ajout de différents % de ciment et des échantillons avec l'ajout, en plus du ciment, de gravats de démolition (C&D) et de cendres volantes produites par la combustion du charbon dans les centrales électriques ont été produits.

Les spécimens ainsi fabriqués ont été soumis à une rupture par compression, après une période de maturation de 7 jours.

Echantillon "CENTURI" Corse – France : Échantillon tel quel avec ajout de 3 % de ciment et de 10 % d'eau

Tableau 45 – Propriétés mécaniques du sédiment Centuri additionné de 3% de ciment et 10% d'eau

Évaluation	Poids spécifique	Rupture à la compression	
N°	kN/m ³	Kg/cm ²	MPa
1	21,73	4,4	0,43
2	21,05	6,0	0,59
Valeurs moyennes	21,39	5,2	0,51

Echantillon "CENTURI" Corse – France : Échantillon tel quel avec ajout de 5 % de ciment et de 15 % d'eau

Tableau 46 – Propriétés mécaniques du sédiment Centuri additionné de 5% de ciment et 15% d'eau

Évaluation	Poids spécifique	Rupture à la compression	
N°	kN/m ³	Kg/cm ²	MPa
1	20,86	7,7	0,75
2	21,29	7,1	0,70
Valeurs moyennes	21,07	7,4	0,73

Echantillon "CENTURI" Corse – France : Échantillon obtenu à partir du mélange de 30% de sédiments "Centuri", 30% de C&D 0-15 mm, 30% de C&D 15-40 mm, 10% de cendres volantes Carbosulcis, 3% de ciment et 15% d'eau

Tableau 47 – Propriétés mécaniques du mélange de 30% de sédiment Centuri, 30% de C&D 15-40mm, 10% de cendres volantes Carbosulcis, 3% de ciment et 15% d'eau

Évaluation	Poids spécifique	Rupture à la compression	
N°	kN/m ³	Kg/cm ²	MPa
1	20,30	15,4	1,51
2	20,40	15,4	1,51
Valeurs moyennes	20,35	15,4	1,51

4.6. COMMENTAIRES SUR LES RÉSULTATS

➤ Béton : utilisation dans le secteur de la construction

Les résultats montrent que l'utilisation des sédiments tels quels, mélangés à un pourcentage égal de sable, a entraîné une réduction significative des valeurs de résistance à la compression, qui ont été presque divisées par deux par rapport à celles de l'échantillon d'essai.

Les valeurs de résistance obtenues permettent en tout cas de faire entrer les mélanges de sédiments et de ciment dans le champ des matériaux utilisables. En particulier, les valeurs de résistance à la compression permettent de classer les bétons adaptés à un usage non structural, c'est-à-dire aux produits pour lesquels une valeur de résistance à la compression élevée n'est pas requise.

Il est également à noter que même dans les spécimens faits entièrement avec du sédiment traité, les valeurs de résistance sont sensiblement similaires à celles faites avec le sédiment tel quel (brut).

➤ **Mortier : utilisation dans le secteur de la construction**

Même dans le cas d'échantillons de mortier, la valeur de résistance des éprouvettes témoins est presque le double de celle des éprouvettes faites avec des sédiments.

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

➤ **Mélanges sédiments-ciment : utilisation en technique routière**

L'ajout de ciment aux sédiments a conduit à une amélioration significative des caractéristiques de portance.

Dans le cas des sédiments sableux limoneux de la "Vasca Livorno", de bonnes valeurs CBR ont été obtenues sur le matériau tel quel, qui a augmenté d'environ 20 points avec l'ajout de 5% de ciment, comme le montre le tableau :

Tableau 48 – Valeurs d'indice CBR du sédiment Livourne « Tel quel » et avec l'ajout de 5% de ciment

Indice CBR Vasca Livorno (Italia) tel quel		Indice CBR Vasca Livorno (Italia) + 5% ciment	
A 2,5 mm	A 5,0 mm	A 2,5 mm	A 5,0 mm
27,6	30,5	46,7	54,8

De même les sédiments sableux de Centuri-Corse (France) ont connu une augmentation significative de l'indice CBR, à mesure que le pourcentage de ciment utilisé dans le mélange augmente, le tableau suivant résume cela :

Tableau 49 – Valeurs d'indice CBR du sédiment Centuri « Tel quel » et avec l'ajout de 3% de ciment

Indice CBR Vasca Livorno (Italia) tel quel		Indice CBR Vasca Livorno (Italia) + 3% ciment	
A 2,5 mm	A 5,0 mm	A 2,5 mm	A 5,0 mm
13,4	18,1	53,1	49,3

Tableau 50 – Valeurs d’indice CBR du sédiment Centuri avec l’ajout de 5% et 10% de ciment

Indice CBR Vasca Livorno (Italia) + 5% ciment		Indice CBR Vasca Livorno (Italia) + 10% ciment	
A 2,5 mm	A 5,0 mm	A 2,5 mm	A 5,0 mm
193,3	n.d.	219,1	n.d.

➤ **Utilisation dans les routes : mélanges pour les enrobés cimentés**

Les valeurs de référence de la résistance à la compression sont comprises entre 3 et 4,5 MPa.

Le tableau suivant indique les mélanges testés et les valeurs obtenues :

Tableau 51 – Valeurs de poids spécifique moyen et de rupture de compression moyenne de mélanges à base du sédiment Centuri, de ciment, d’eau et d’autres ajouts

Echantillon	Poids spécifique moyen (kN/m ³)	Rupture de compression moyenne	
		(Kg/cm ²)	(MPa)
Centuri Corse –(France) + 3% ciment et 10 % eau	21,39	5,2	0,51
Centuri Corse –(France) + 5% ciment et 15 % eau	21,07	7,4	0,73
Centuri Corse –(France) + C&d et cendres volantes + 3% ciment et 15% eau	20,35	15,4	1,51

En ce qui concerne les valeurs minimales prescrites par la réglementation, il convient de noter que ces mélanges ne sont pas adaptés à la confection de mélanges cimentés.

Toutefois, l'amélioration, pour le même ciment utilisé, des valeurs de résistance à la compression dans les mélanges dans lesquels les matériaux de construction et de démolition et les cendres volantes ont été utilisés est significatif.

5. ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES MATÉRIAUX EN CONDITIONS PILOTE

5.1. CONCEPTION ET RÉALISATION DES OUVRAGES PILOTES

Quatre sédiments ont été retenus pour la réalisation d'essais à l'échelle pilotes. Deux sédiments Italiens issus pour l'un du port de Livourne et pour l'autre de Cagliari et deux sédiments français issus pour l'un du port de Centuri et pour l'autre de Toulon.

Ces ouvrages pilotes de conception identique, ont été réalisés sur deux sites distincts :

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

5.1.1. Pilotes réalisés sur les deux sédiments Italiens

Dans le cas des sédiments italiens, les scénarii et les types de pilotes retenus sont récapitulés ci-dessous :

- Deux lysimètres simulant un remblai
 - Un sur le sédiment de Cagliari brut.
 - et le second sur le sédiment de Livourne traité.
- Et quatre dalles en mortier ou béton
 - Deux dalles en mortier avec les sédiments de Cagliari l'une sur le brut et l'autre sur le traité
 - Deux dalles en béton avec les sédiments de Livourne l'une sur le brut et l'autre sur le traité.

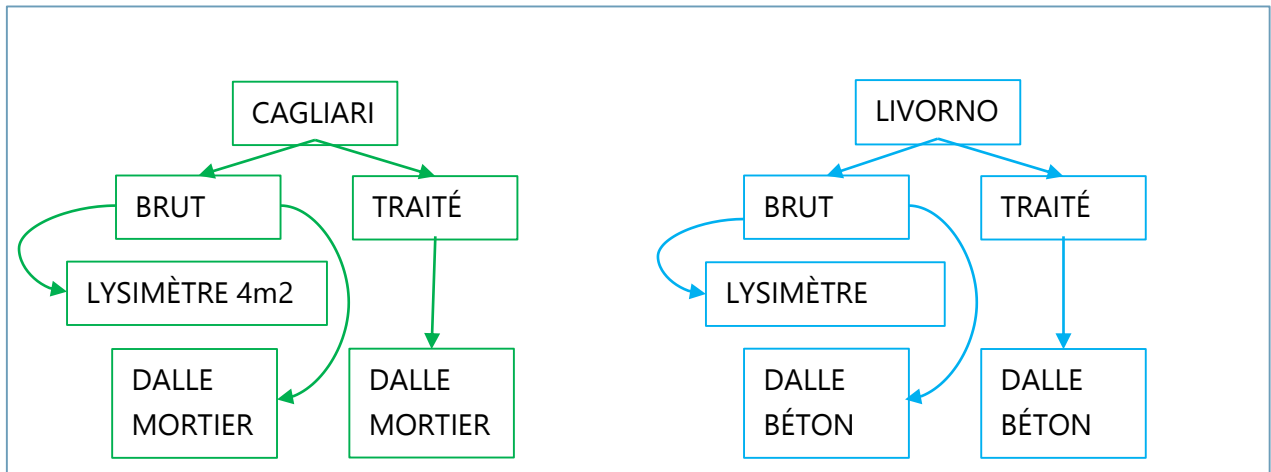


Figure 22 – Schéma récapitulatif des essais réalisés sur le site d’ISPRA

5.1.2. Pilotes réalisés sur les deux sédiments français

Dans le cas des sédiments français, les scénarii et les types de pilotes retenus sont énoncés ci-dessous :

- Trois lysimètres simulant un remblai
 - Un sur le sédiment de Centuri brut.
 - Un sur le sédiment de Centuri traité sur Toulon par l’équipe ISPRA et avec un pilote ISPRA
 - et le troisième sur le sédiment de Toulon brut.

- 6 dalles en mortier ou béton
 - Deux dalles en mortier avec les sédiments de Toulon l’une sur le brut et l’autre sur le traité
 - Deux dalles en béton avec les sédiments de Toulon l’une le brut et l’autre sur le traité
 - Deux dalles en mortier avec les sédiments de Centuri l’une sur le brut et l’autre sur le traité.

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

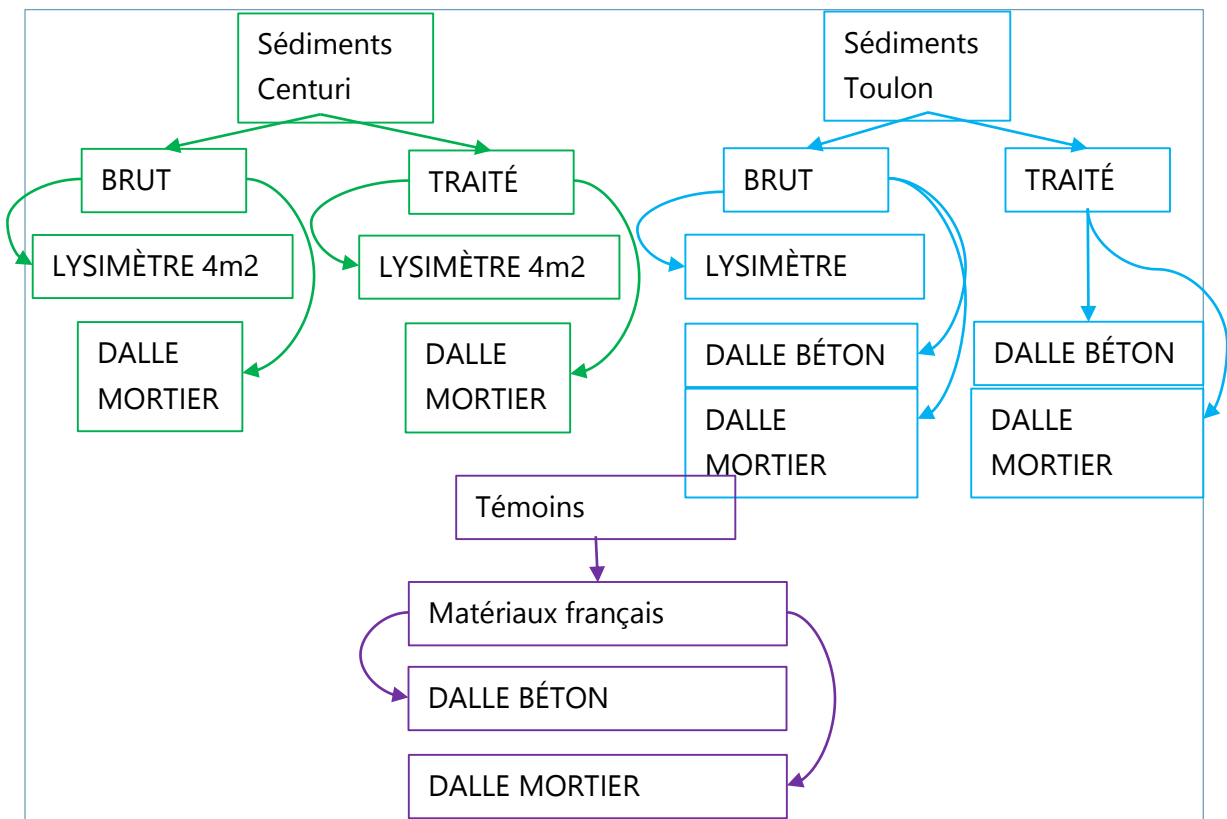


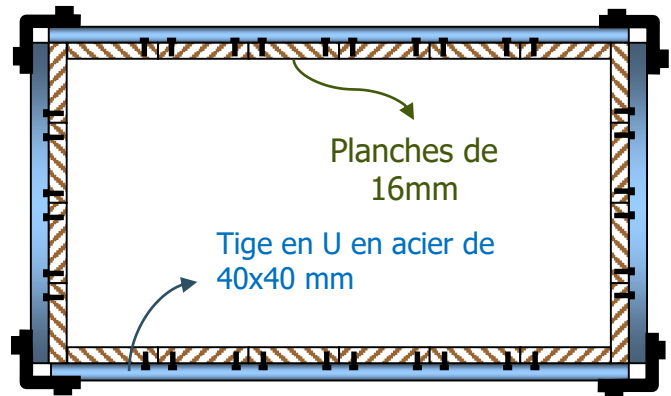
Figure 23 – Schéma récapitulatif des essais réalisés sur la plate-forme de Toulon

5.1.3. Description des pilotes lysimétriques

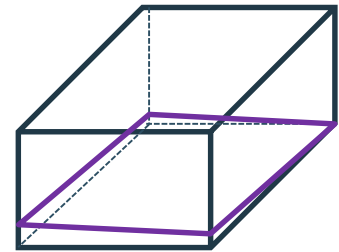
➤ Réalisation des bacs contenant les sédiments

Les pilotes consistent en des bacs de 2,5 m de long par 1,75 m de large et 0,83 cm de haut ; soit une surface de 4,375 m². Les panneaux latéraux sont réalisés avec des panneaux dit OSB (Oriented Strand Board) ce qui se traduit par « Panneau de lamelles orientées ». Les lamelles OSB sont composés de plusieurs couches de longues lamelles de bois, collées entre elles, afin d'obtenir la même qualité que le bois massif.

1. Réalisation du coffrage en panneaux OSB de 16 mm d'épaisseur. Celui-ci est posé directement au sol sur une dalle bétonnée.
2. Une lumière est prédécoupée à endroit prévu pour la récolte des éluats.
3. Les panneaux sont solidarisés à l'aide de tiges en acier galvanisé en U et des équerres (voir le schéma ci-contre



4. Une couche de sable est mise place au fond de sorte à créer un point bas sur l'un des coins où a été prévue la récolte des éluats. La hauteur du sable en ce point est à 0 cm du sol. Le coin opposé constitue le point le plus haut, il est à environ 15 cm du sol. Les 2 autres coins sont à environ 10 et 8 cm du sol. Le sable est nivelé avec une truelle et une règle en bois.



5. Pose du film PVC sans soudure en faisant des plis aux niveaux des 4 coins (voir le schéma ci-contre).

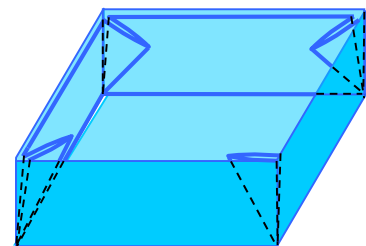
6. Pose de la canalisation d'évacuation par soudage et cerclage

7. Une couche de gravier roulé (6-12mm) et lavé, d'une hauteur minimale de 5 cm, est mise en place et nivelée pour avoir une surface horizontale. Cette couche permet le ruissellement des percolats vers le point bas.



8. Le gravier est recouvert d'une membrane perméable (BEDIM) pour éviter le transfert de fines dans la couche drainante.

9. Le sédiment est mis en place par couches de 15 à 20 cm qui sont ensuite compactées par foulage aux pieds. Le sédiment est ajouté par seaux qui sont préalablement pesés.



10. Une fois le compactage fini, la couche de surface est nivelée pour obtenir une surface horizontale

11. Et enfin le système d'arrosage est posé par-dessus.

Système d'arrosage

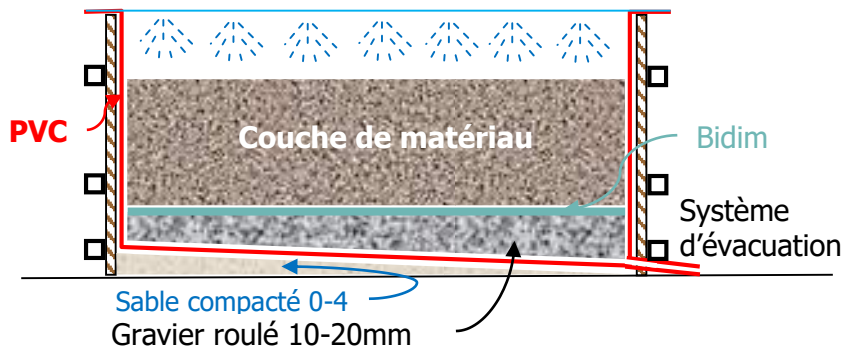


Figure 24 – Schéma en coupe du lysimètre



Figure 25 – Mise en œuvre des pilotes à Livourne (gauche) et Toulon (droite)

➤ Spécificité des bacs réalisés à Toulon

Les bacs lysimétriques réalisés à Toulon sont installés à l'intérieur de containers réfrigérés. Les containers ont une largeur de 2,294 m. Si on tient compte de l'épaisseur des parois il reste 2,26 m de largeur utile. Nous avons opté pour mettre les bacs au fond des containers de sorte que 3 parois du lysimètre soient contre celles du container. Seule la quatrième paroi a besoin d'être rigidifiée et renforcée pour résister à la poussée des sédiments. Nous avons donc adapté les dimensions des lysimètres pour maintenir la même surface soit 2,26 x 1,94 m.

➤ **Description du système d'arrosage**

Le système d'arrosage consiste en 48 buses de brumisation réparties en 3 réseaux de 16 buses. Comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous, les buses des 3 réseaux sont réparties pour arroser l'ensemble du lysimètre. Les buses de chaque réseau sont reliées entre elles de sorte que les longueurs des tubes de chaque buse au point de jonction central soient égales. Les buses sont fixées sur une grille rigide posée sur les bordures du bac. Les 3 réseaux sont gérés par un ensemble de minuteriers et 3 électrovannes. Les 3 réseaux sont déclenchés un par un toutes les 6 minutes et 40 secondes, soit un arrosage complet toutes les 20 minutes.

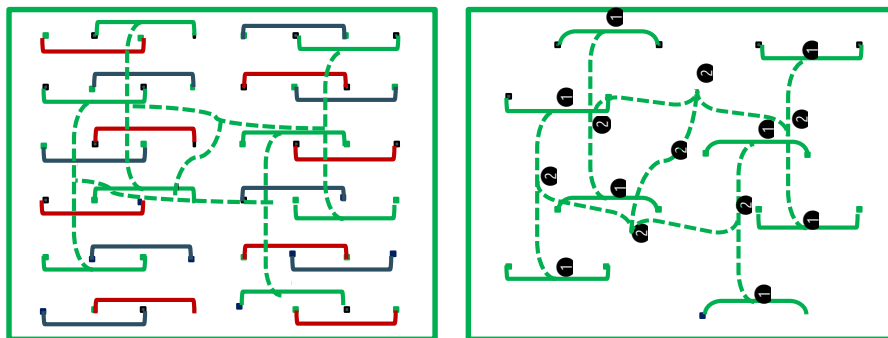


Figure 26 – Réseau de buses réparties à la surface du lysimètre

Le premier jour les buses sont déclenchées manuellement afin d'imbiber le massif total ; l'arrosage est arrêté dès que l'eau arrive à la sortie (fond du lysimètre).

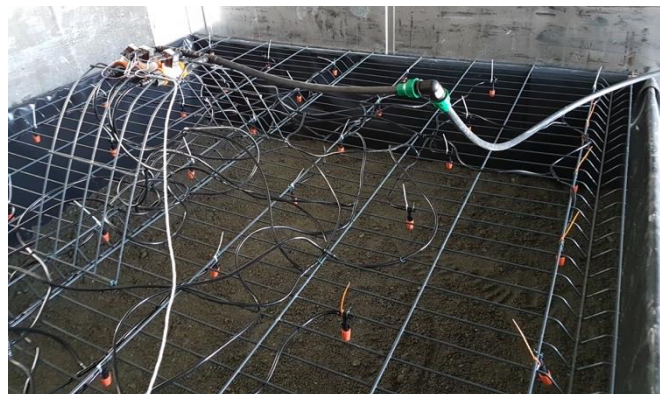


Figure 27 – Dispositif d'arrosage en place sur le lysimètre

5.1.4. Description des dalles pilotes

Les dalles mortier et béton sont réalisées selon les formulations mises au point au chapitre 3. Le gâchage est réalisé dans une bétonnière standard. Le coulis est versé dans des contenants en PE de dimensions L x l x h = à 555 x 355 x 235 mm soit une surface de 0,20 m². Les dalles réalisées font environ 11 cm de hauteur. Les formulations ci-dessous sont issues de l'étude réalisée par le LERM et des essais complémentaires réalisés par PROVADEMSE INSAVALOR.

Dans le tableau ci-dessous sont donnés les pourcentages calculés par rapport à la masse totale des matériaux et l'eau :

➤ Composition des dalles réalisées à ISPRA

Tableau 52 – Composition massique des mortiers et béton réalisés avec les sédiments brut et traité de Cagliari et de Livourne

	Mortier avec le sédiment de Cagliari		Béton avec le sédiment de Livourne	
	brut	traité	brut	traité
Sédiment	24,23%	35,35%	18,10%	34,00%
sable	43,00%	35,35%	18,10%	0,00%
gravier	0,00%	0,00%	39,77%	38,78%
ciment	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%
réducteur	0,13%	0,14%	0,19%	0,19%
eau	17,65%	14,16%	9,80%	12,04%
total	100,02%	100,00%	100,96%	100,01%

Le choix des pourcentages pris en compte dans la réalisation des matériaux a été basé sur les pourcentages calculés par rapport aux matériaux hors eau extraits de l'étude du LERM donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 53 – Composition massique des mortiers et béton issue des essais de formulation

	Masse	Sédiment	Sable	Gravier	Ciment	Réducteur	Eau	Total
Mortier	(kg)	5,6	10,4		3	0,03	4,08	19,03
	(%)	29,43%	54,65%	0,00%	15,76%	0,16%		100,00%
Béton	(kg)	4,35	4,35	9,5	3,3	0,046	2,34	21,546
	(%)	20,19%	20,19%	44,09%	15,32%	0,21%		100,00%

Le LERM nous a fourni une seule formulation mortier et une seule formulation béton qui toutes deux sont censées donner des résultats mécaniques corrects pour l'ensemble des sédiments. Nous avons donc maintenu ces pourcentages pour les sédiments bruts et nous avons augmenté leurs proportions dans le cas des formulations sur sédiments traités. Pour les mortiers nous avons mis autant de sable que de sédiments soit 42,04% chacun.

Pour les bétons nous avons remplacé la totalité du sable par du sédiment. Nous avons utilisé les mêmes principes pour l'ensemble des formulations réalisées. Seules les quantités d'eau ajoutées sont différentes. Elles ont été adaptées selon la manœuvrabilité du coulis.

Tableau 54 – Composition en % de masse sèche des mortiers et béton issue des essais de formulation et réalisés pour les dalles pilotes

Matériaux (% sur sec)	Mortier Cagliari & Toulon & Centuri			Béton Livourne & Toulon		
	Réf. LERM*	brut	traité	Réf. LERM*	brut	traité
Sédiment	29,43%	29,43%	42,04%	20,19%	20,19%	40,38%
sable	54,65%	54,65%	42,04%	20,19%	20,19%	0,00%
gravier	0,00%	0,00%	0,00%	44,09%	44,09%	44,09%
ciment	15,76%	15,76%	15,76%	15,32%	15,32%	15,32%
réducteur	0,16%	0,16%	0,16%	0,21%	0,21%	0,21%
total	100%	100%	100%	100%	100%	100%

* Formulation LERM Brut

NB : le traitement des sédiments a été réalisé par lavage / hydrocyclonage sous la supervision d'ISPRA sur le site de Livourne d'une part (sédiments Livourne et Cagliari) et sur le site de Toulon d'autre part (sédiments de Toulon et Centuri) pour en extraire les éléments fins ainsi que les résidus végétaux comme notamment des fibres de posidonies. Ce traitement fait l'objet du LIVRABLE T2.3.3 : SÉPARATION GRANULOMÉTRIQUE ET TRAITEMENT DE LAVAGE DU SOL

On notera que la proportion de sédiment dans la masse sèche de matériau est plus importante dans les formulations à base de sédiment traité (40 à 42%) que dans les formulations à base de sédiment brut (20 à 29%).

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

Tableau 55 – Teneur en eau des formulations de dalles pilotes

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



Figure 28 – Dalles pilotes mortier et béton mis en œuvre à Livourne (gauche) et à Toulon (droite)



Figure 29 – Dispositif d'accueil des dalles pilote et du lysimètre dans un conteneur réfrigéré sur le CPEM de Toulon

5.2. SUIVI DES PILOTES

5.2.1. Exposition à l'eau des lysimètres

La procédure retenue consiste à arroser les sédiments avec un volume équivalent à la pluviométrie moyenne annuelle en France soit 800 mm/m^2 sur 6 mois. Cela correspond à $30,77 \text{ mm/m}^2/\text{semaine}$. Les lysimètres ont une surface de $4,375 \text{ m}^2$ et nécessitent chacun un arrosage par semaine d'un volume d'eau de 61,5 litres ; soit 1600 litres pour les 6 mois d'essai. Les éluats ont été recueillis chaque semaine et le volume de solution récupéré ainsi que son pH et sa conductivité ont été notés.

Les volumes de percolats récupérés seront égaux aux volumes arrosés déduction faite de l'évaporation qui n'est pas négligeable dans notre cas. En effet nous avons retenus un arrosage en semi continu. Un arrosage de 180 millilitres toutes les 30 minutes à 244 millilitres toutes les 45 minutes. Dans ce cas la surface des lysimètres reste constamment humide et participe au relargage mais aussi à l'évaporation en continue.

5.2.2. Exposition à l'eau des dalles

La procédure retenue pour les dalles de matériaux consiste à les couvrir de 10 mm d'eau durant 24 h une fois par semaine. Ce qui correspond à apporter 2 litres d'eau par dalle et par semaine. Le volume récupéré est mesuré pour tenir compte de l'évaporation et de l'eau d'infiltration.

Cette procédure a été maintenue tant que la diminution des concentrations obtenues des éléments majeurs n'était pas significative. Ensuite, le temps de contact avec l'eau est passé à 48h par quinzaine et toujours 10 mm d'eau pour donner le temps à la dalle de recharger son eau des pores et d'obtenir des concentrations mesurables pour les éléments traces.

Dans ce cas l'équivalent de pluviométrie est de 150 l/m², par contre toute l'eau reste au contact du matériau. Ce scénario représente des épisodes pluvieux fréquents et une configuration permettant le maintien d'une lame d'eau durant 24 à 48 h. Le relargage obtenu est probablement équivalent à celui de quelques années dans la réalité en fonction de la façon dont est estimée la pluie efficace pour une dalle.

5.2.3. Suivi analytique

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

Tableau 56 – Calendrier de prélèvements pour analyses chimiques

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

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

Les paramètres d'analyse chimique qui ont fait l'objet du suivi sont :

- pH
- Conductivité
- Chlorures
- Sulfates
- Fluorures
- Antimoine (Sb)

- Arsenic (As)
- Baryum (Ba)
- Cadmium (Cd)
- Chrome (Cr)
- Cuivre (Cu)
- Etain (Sn)
- Mercure (Hg)
- Molybdène (Mo)
- Nickel (Ni)
- Plomb (Pb)
- Sélénium (Se)
- Zinc (Zn)

5.2.4. Suivi écotoxicologique

Les éluats des lysimètres et des dalles ont fait l'objet d'une analyse écotoxicologique sur 3 prélèvements à l'issue des semaines suivantes :

Tableau 57 – Calendrier de prélèvements pour analyses écotoxicologiques

semaines	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Essai écotoxicologique		2							mix 9 - 10					
semaines	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
Essai écotoxicologique									mix 23 à 26					

Le bioessai sélectionné pour faire l'objet du suivi écotoxicologique des éluats de lysimètres et de dalles est l'essai d'inhibition de la reproduction du rotifère *Brachionus calyciflorus* 48h (ISO 20666), qui s'est montré le plus sensible lors des essais préliminaires de caractérisation de la propriété de danger écotoxique (HP14).

Il s'agit d'un essai de toxicité chronique dont l'indicateur utilisé dans le cadre de la procédure française HP14 est la CE20 avec un seuil de déclenchement du caractère dangereux de 1%.

5.3. RÉSULTATS DU SUIVI DES LYSIMÈTRES

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

Ainsi, la note d'information « Aide à la mise en œuvre du niveau 3 de caractérisation environnementale – Volet n°1 : les essais lysimétriques et plots expérimentaux » fourni deux gammes de seuils, la première exprimée en concentration maximale, la seconde en masse relarguée cumulée par unité de surface :

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

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

Figure 30 – Valeurs limites de concentration

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

Paramètre	Quantité surfacique relarguée cumulée	
	Valeur (mg/m ²)	
As	10	} X $\min(d; \frac{P_{eff}}{P_{ref}})$
Ba	700	
Cd	4	
Cr total	50	
Cu	625	
Hg	1	
Mo	70	
Ni	20	
Pb	10	
Sb	5	
Se	6	
Zn	625	
Fluorure	750	
Chlorure	125 000	
Sulfate	125 000	

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

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

Figure 31 – Valeurs limites de quantité surfacique relarguée

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

Dans notre cas, la durée d'exposition prise pour référence est la pluviométrie d'1 an et la pluie efficace est proche de 800 mm/an. Le facteur correctif est donc de 1. Les valeurs limites de quantité surfacique relarguée cumulée figurant dans le tableau de la Figure 31 sont donc celles qui s'appliquent pour évaluer l'acceptabilité des émissions de nos lysimètres.

Les résultats de concentration et de relargage surfacique cumulé des différents sédiments testés sont présentés ci-après avec, pour référence les valeurs limites présentées ci-dessus. Les résultats sont présentés en regroupant les données en fonction de l'origine du sédiment. Ainsi :

- Pour Toulon : il s'agit du lysimètre du sédiment Toulon brut
- Pour Centuri : il s'agit des lysimètres du sédiment Centuri brut et du sédiment Centuri traité
- Pour Cagliari : il s'agit du lysimètre du sédiment Cagliari brut
- Pour Livourne : il s'agit du lysimètre du sédiment Livourne brut.

L'ensemble des résultats figure sous la forme de tableaux de données et de graphes rassemblés en annexe.

La notation abrégée des différents sédiments testés est la suivante :

Toulon Brut Lysimètre (TBR)

Centuri brut Lysimètre (CBR)

Centuri traité Lysimètre (CTR)

Cagliari brut Lysimètre (Cag Br)

Livourne brut Lysimètre (Liv Br)

5.3.1. Suivi du pH et de la conductivité

Les sédiments testés présentent tous un pH relativement stable compris entre 7,5 à 8,5. Une sensible évolution à la hausse peut être observée entre le démarrage et le terme du suivi. Cette évolution traduit une lente dissolution des carbonates.

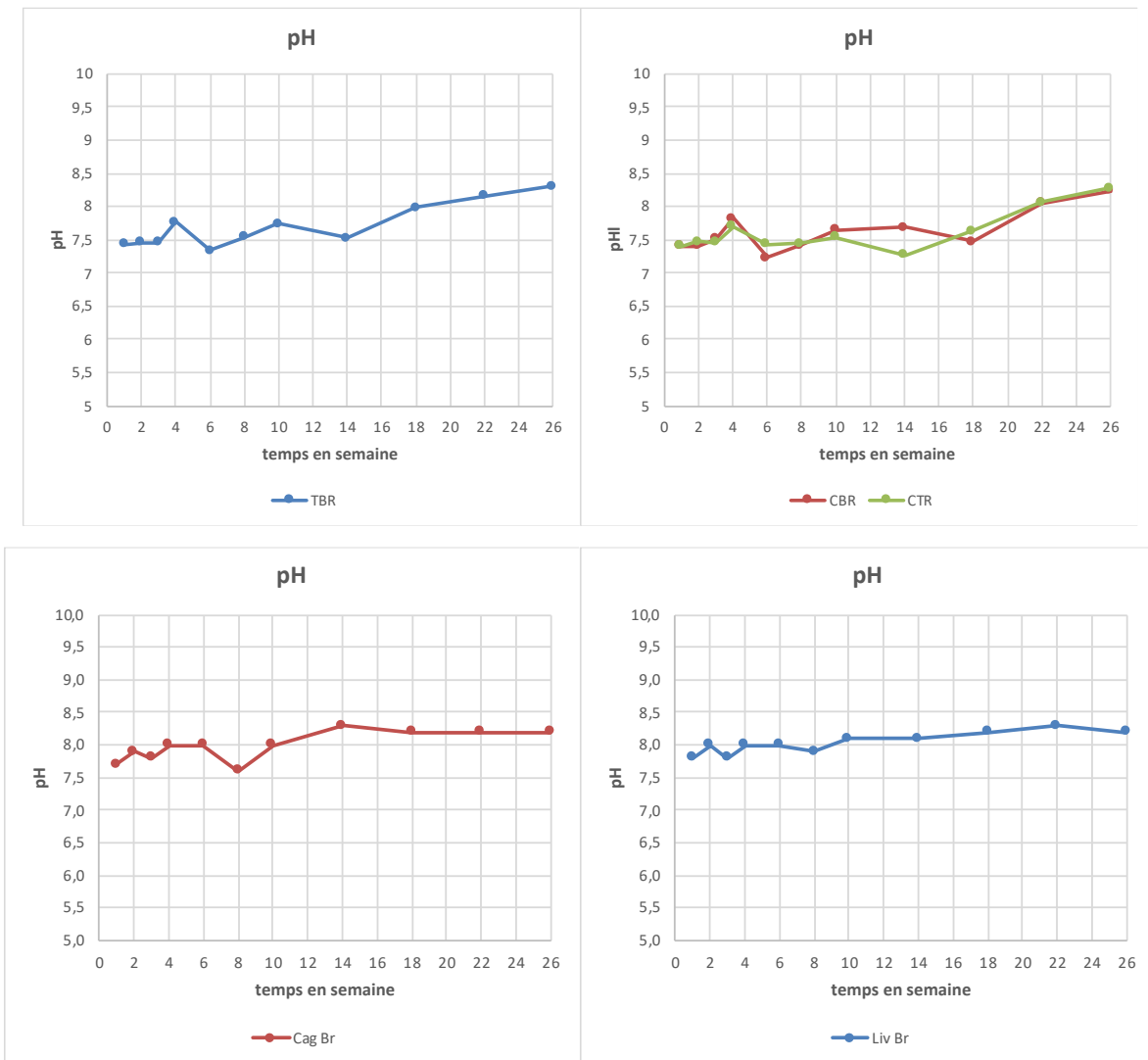


Figure 32 – Evolution du pH dans les éluats de lysimètre des différents sédiments testés

Les courbes de conductivité présentent une allure semblable. La conductivité diminue très rapidement dès les premiers éluats des sédiments de Toulon et Centuri, plus progressivement pour les sédiments de Cagliari et Livourne.

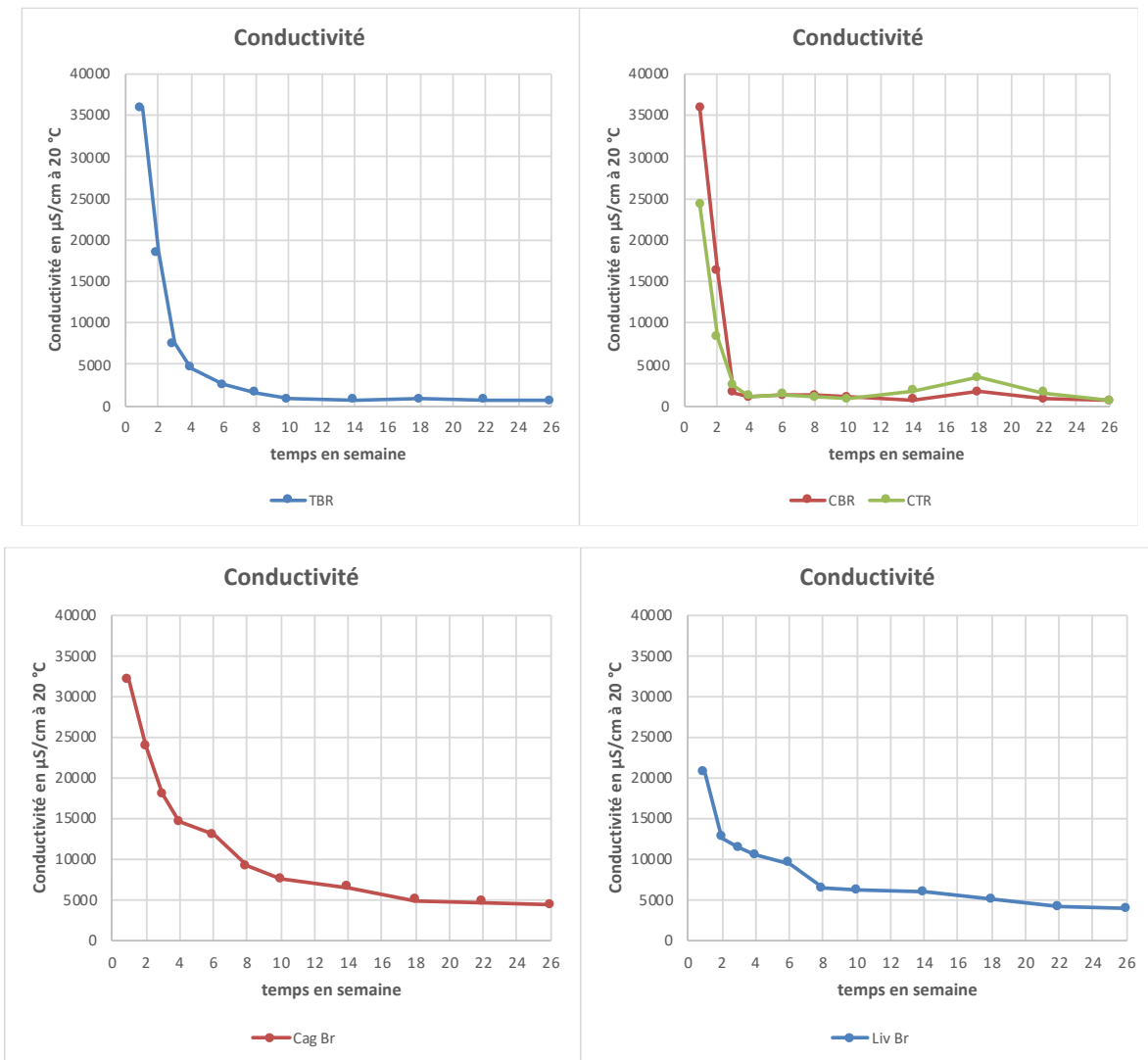


Figure 33 – Evolution de la conductivité dans les éluats de lysimètre des différents sédiments testés

5.3.2. Suivi des chlorures et sulfates

➤ Résultats exprimés en concentrations

L'évolution de la concentration en chlorures reflète celle de la conductivité.

Seul le premier point de prélèvement des lysimètres de sédiments de Toulon, Centuri brut, Centuri traité et Cagliari brut dépasse la valeur limite pour les chlorures.

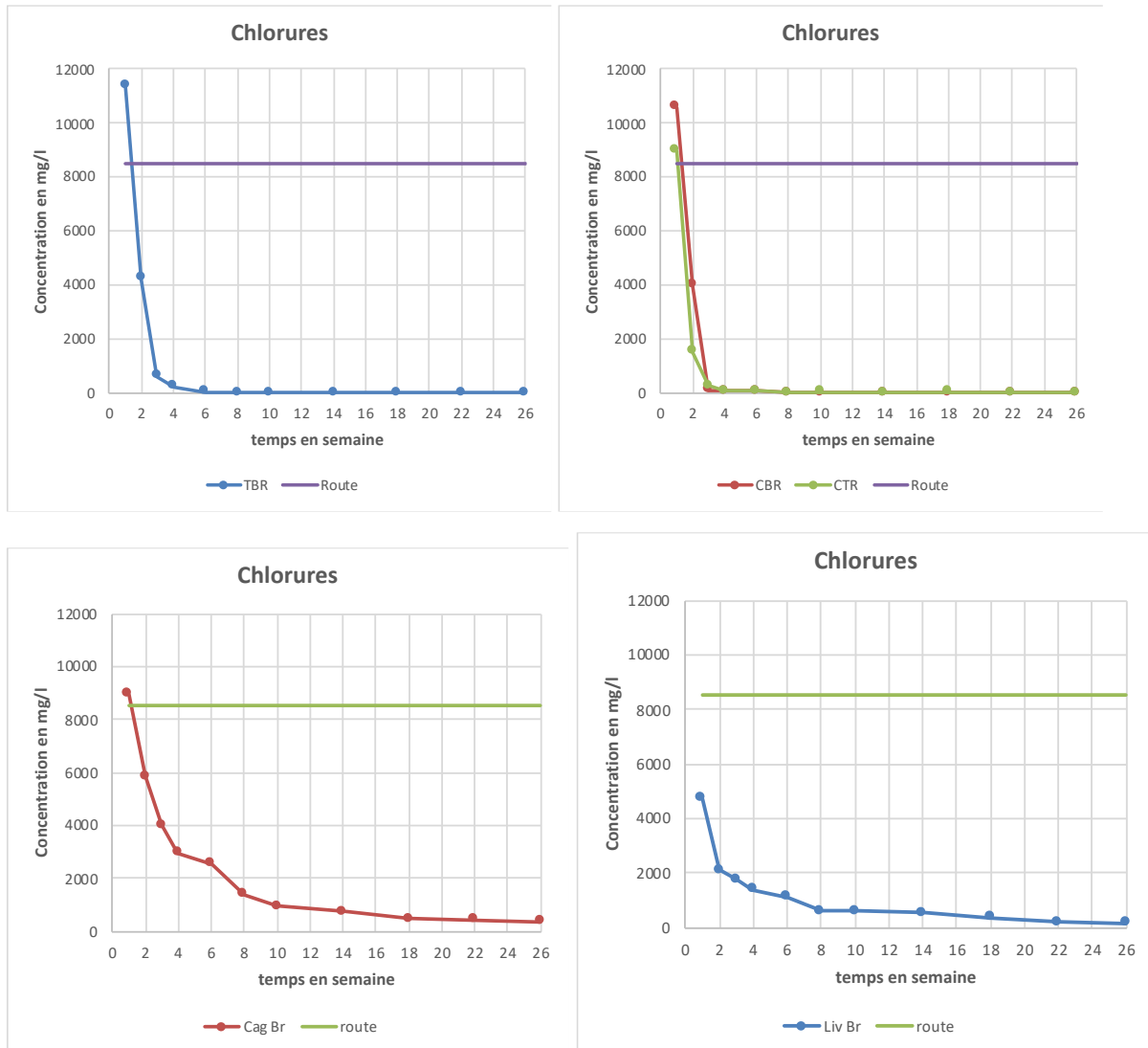


Figure 34 – Evolution de la concentration en chlorures dans les éluats de lysimètre des différents sédiments testés

Seul le premier prélèvement du lysimètre Centuri Brut dépasse le seuil des sulfates en concentration.

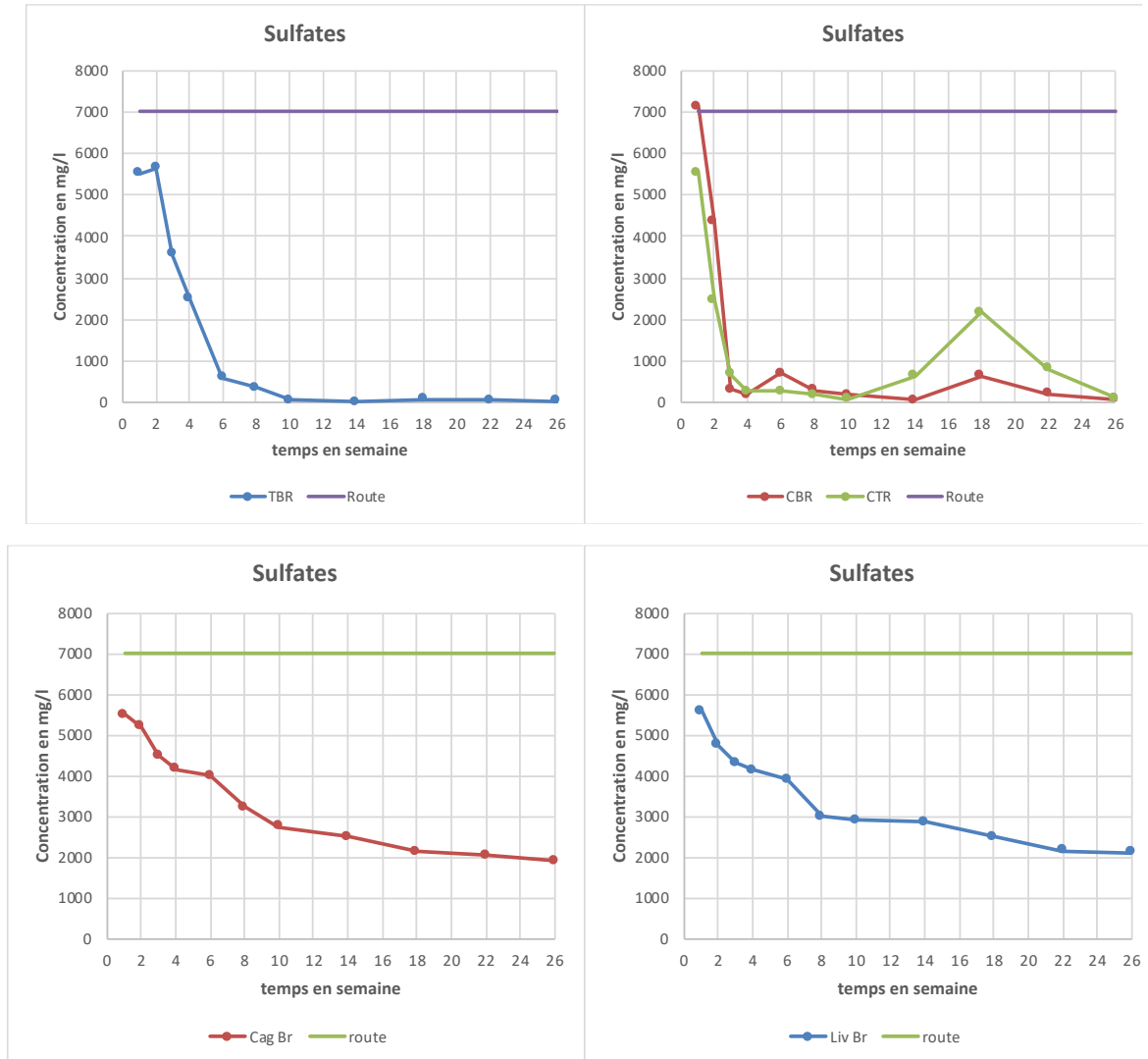


Figure 35 – Evolution de la concentration en sulfates dans les éluats de lysimètre des différents sédiments testés

Dans le cas des sédiments de Centuri (traité, non traité) et de Toulon, les lysimètres ont subi un arrêt d'arrosage entre les semaines 14 et 18 qui peut expliquer l'augmentation observée des concentrations en sulfates des éluats des sédiments Centuri brut et Centuri traité en semaine 18.

➤ **Résultats exprimés en relargage surfacique cumulé**

Chacun des sédiments testés présente un dépassement de la valeur limite de quantité surfacique relarguée cumulée pour les chlorures. Ce dépassement est observé dès le premier éluats pour les sédiments de Toulon, Centuri et Cagliari, ou à partir du troisième éluat pour le sédiment de Livourne.

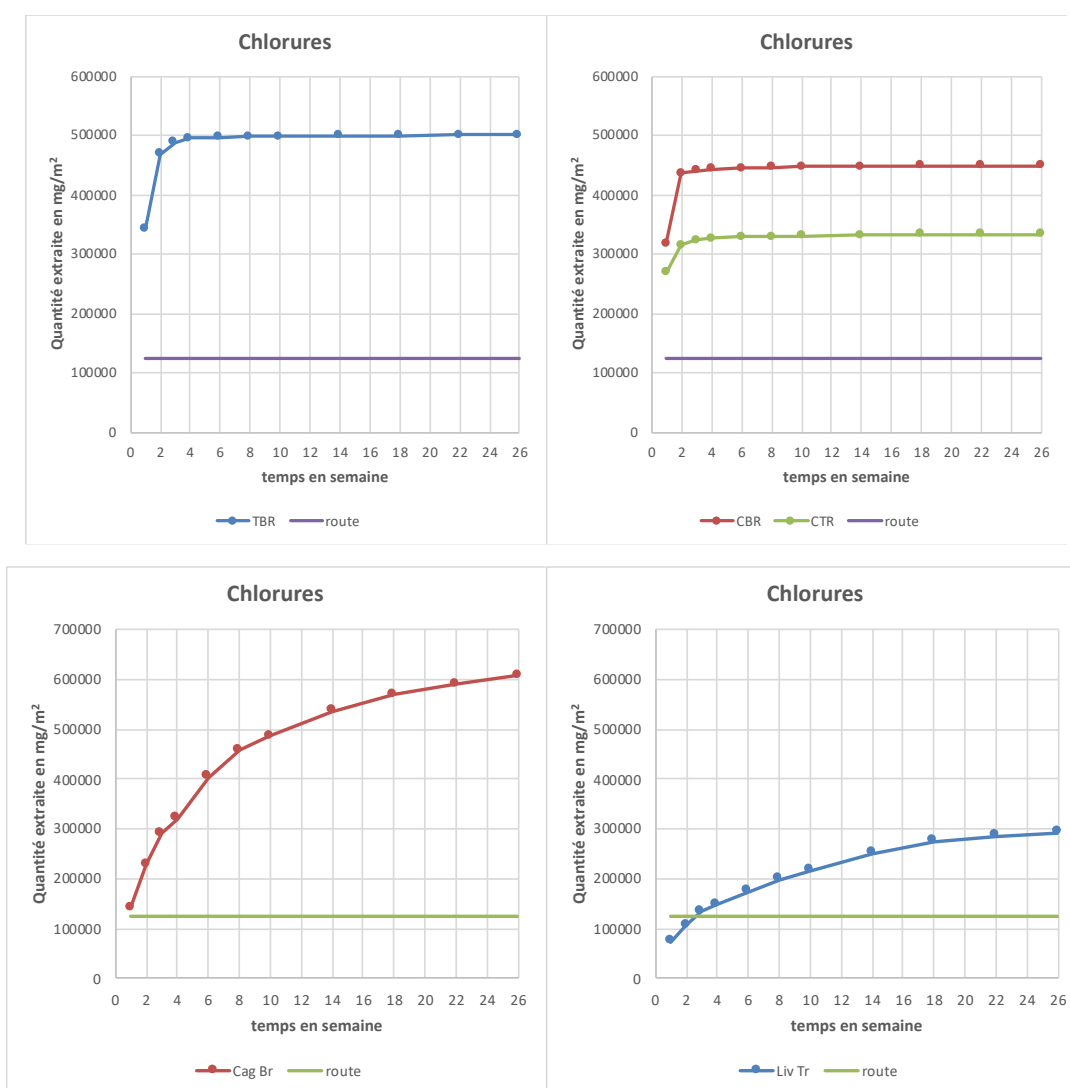


Figure 36 – Évolution du relargage surfacique cumulé en chlorures dans les éluats de lysimètre des différents sédiments testés

Chacun des sédiments testés présente un dépassement de la valeur limite de quantité surfacique relarguée cumulée pour les sulfates. Ce dépassement est observé dès le premier éluats pour les sédiments de Toulon et Centuri, ou à partir du deuxième éluat pour le sédiment de Cagliari et de Livourne.

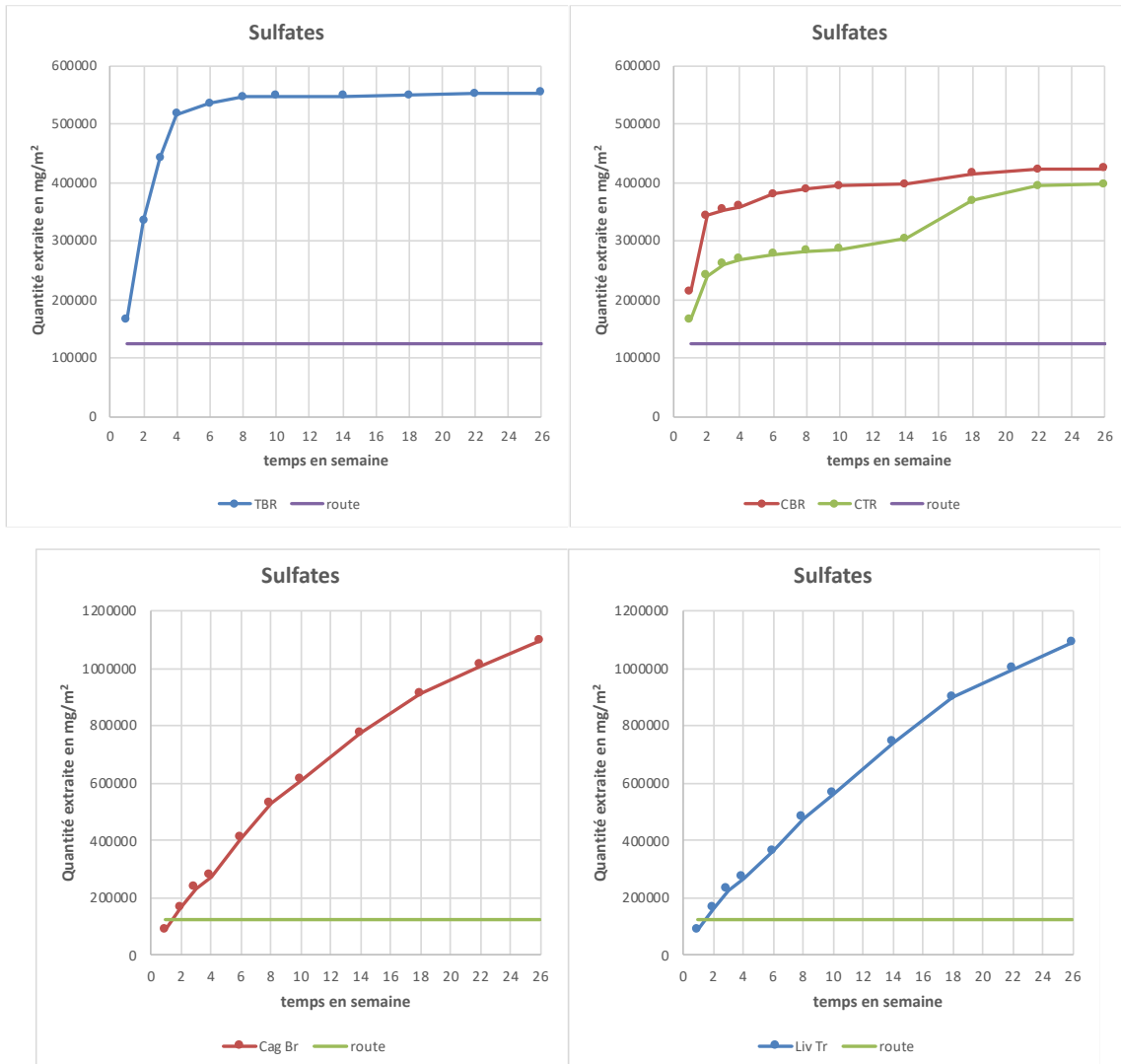


Figure 37 – Evolution du relargage surfacique cumulé en sulfates dans les éluats de lysimètre des différents sédiments testés

5.3.3. Suivi des éléments métalliques

➤ Résultats exprimés en concentration

Les concentrations en métaux dans les éluats des lysimètres sont très inférieures aux valeurs limites. Leur représentation graphique est placée en annexe.

➤ Résultats exprimés en relargage surfacique cumulé

Le sédiment de Cagliari présente un relargage surfacique cumulé en molybdène supérieur à la valeur limite acceptable pour un usage routier. Ce dépassement intervient au-delà de la 10^{ème} semaine de suivi. Les autres sédiments testés ne présentent pas de dépassement pour le molybdène.

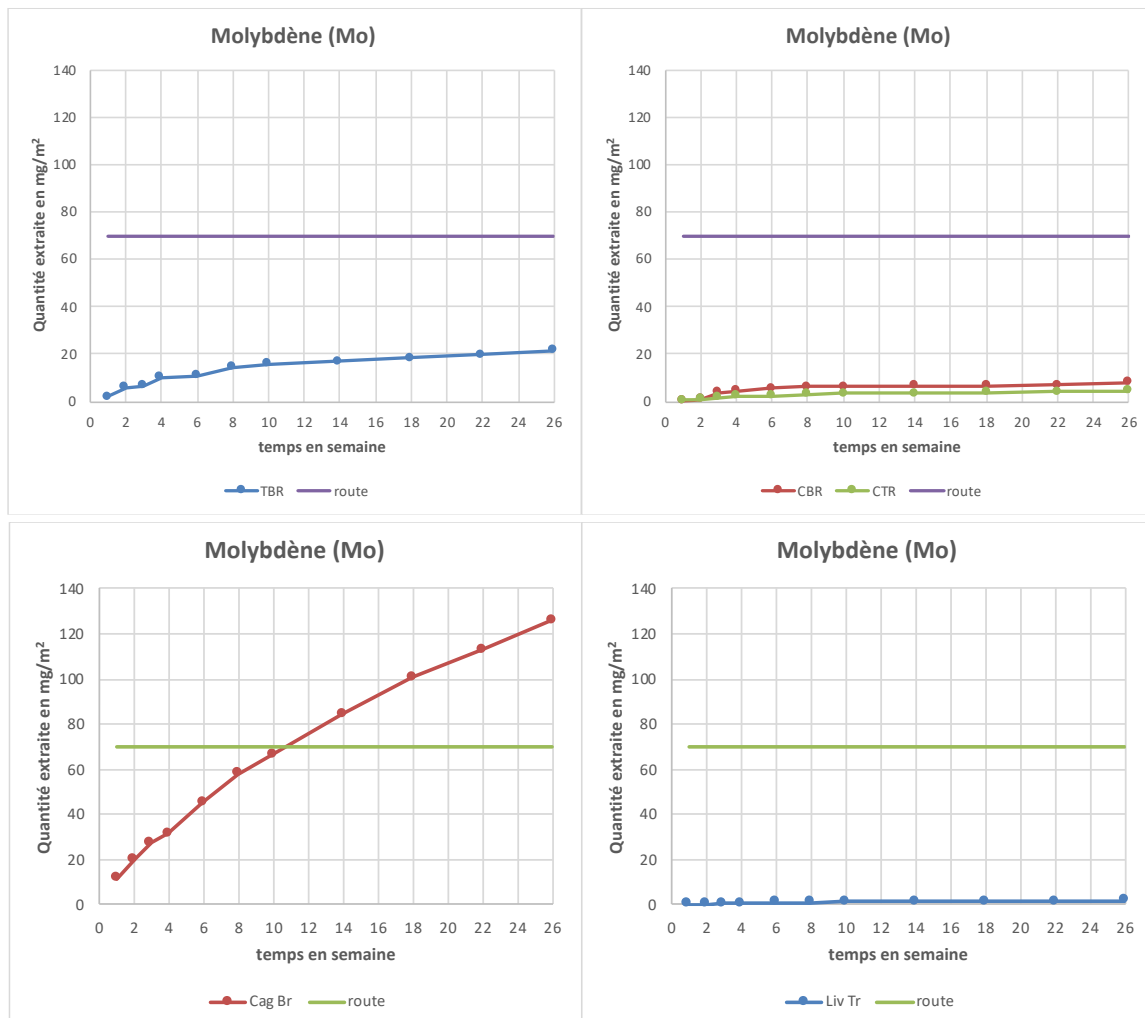


Figure 38 – Evolution du relargage surfacique cumulé en molybdène dans les éluats de lysimètre des différents sédiments testés

5.3.4. Suivi écotoxicologique

Le suivi de la CE20 dans les éluats des lysimètres permet d'observer l'évolution de la toxicité éventuelle de ces percolats avec l'avancement de l'exposition à l'infiltration des eaux.

Pour la lecture de ces résultats il faut retenir que la toxicité est d'autant plus importante que la valeur de CE20 est faible puisqu'il s'agit de la concentration d'éluat déclenchant l'inhibition de la reproduction de 20% de la population de *Brachionus calyciflorus* testée.

Tableau 58 – Résultats de détermination de la CE20 d'inhibition de la reproduction de *Brachionus calyciflorus* dans les 3 éluats de suivi écotoxicologique

CE20	P2 (semaine 2)	P7 (semaines 9-10)	P11 (semaines 23 à 26)
Toulon Brut	7,7%	>90%	>90%
Centuri Brut	13%	>90%	>90%
Centuri Traité	23,6%	>90%	>90%
Cagliari Brut	>90%	>90%	>90%
Livourne Brut	>90%	>90%	>90%

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

La toxicité des éluats disparaît dans les prélèvements suivants.

On notera que, pour des raisons administratives, les éluats de lysimètre des sédiments de Cagliari et de Livourne ont du être stockés à +4°C pendant un temps dépassant largement 48h. Ceci doit conduire à considérer ces résultats avec prudence.

5.3.5. Synthèse des résultats des essais en lysimètre

Les paramètres susceptibles de rendre les ouvrages non conformes aux conditions acceptables d'un point de vue environnemental pour une valorisation en technique routière sont :

- Les chlorures
- Les sulfates
- Le molybdène dans le seul cas du sédiment de Cagliari

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

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

5.4. Résultats du suivi des dalles pilotes

L'évaluation des émissions de substances dans l'eau à partir des matériaux formulés à base de sédiments exposés sous forme de dalles a été effectuée par comparaison des concentrations d'une part et de la masse relarguée cumulée rapportée à l'unité de surface, avec les valeurs d'émission observées à partir de matériaux réalisés selon les mêmes formulations sans sédiments et exposés dans les mêmes conditions.

Les résultats sont présentés en regroupant les données en fonction de l'origine du sédiment. Ainsi :

- Pour Toulon : il s'agit des dalles béton du sédiment Toulon brut et Toulon traité ainsi que des dalles mortier du sédiment Toulon brut et Toulon traité
- Pour Centuri : il s'agit des dalles mortier du sédiment Centuri brut et du sédiment Centuri traité
- Pour Cagliari : il s'agit des dalles mortier du sédiment Cagliari brut et du sédiment Cagliari traité
- Pour Livourne : il s'agit des dalles béton du sédiment Livourne brut et du sédiment Livourne traité.

L'ensemble des résultats figure sous la forme de tableaux de données et de graphes rassemblés en annexe.

La notation abrégée des différents matériaux testés est la suivante :

Béton Témoin (BTT)

Mortier Témoin (MTT)

Toulon Brut Béton (Tou BR B)

Toulon Brut Mortier (Tou BR M)

Toulon Traité Béton (Tou TR B)

Toulon Traité Mortier (Tou TR M)

Centuri Brut Mortier (Cor BR M)

Centuri Traité Mortier (Cor TR M)

Cagliari Brut Mortier (Cag Br M)

Cagliari Traité Mortier (Cag TR M)

Livourne Brut Béton (Liv Br B)

Livourne Traité Béton (Liv TR B)

5.4.1. Suivi du pH et de la conductivité

La valeur du pH a été mesurée dans chacun des éluats de chaque matériau étudié. L'évolution de ces valeurs au cours du suivi est présentée ci-dessous.

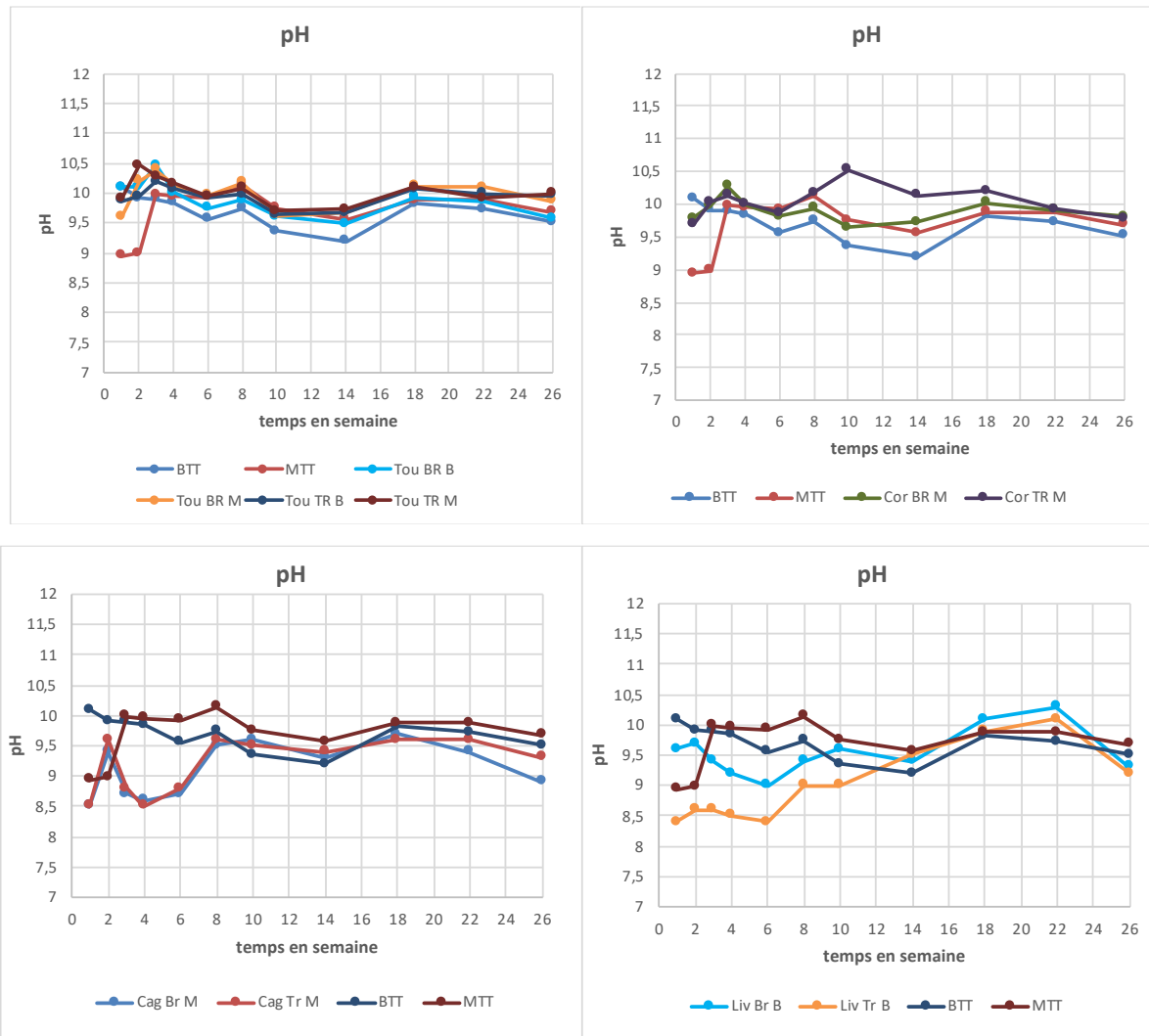


Figure 39 – Evolution du pH dans les éluats de dalles des différents matériaux testés

Les éluats des dalles pilotes présentent tous un pH basique compris entre 9 et 10,5 pour Toulon et Centuri et entre 8,5 et 10,5 pour Cagliari et Livourne. Ce niveau de pH correspond à celui observé pour les matériaux témoins. Il correspond à l'effet de la matrice qui contient un excès d'éléments alcalins solubles.

Bien que les conditions d'exposition en alternance d'humidification et de séchage étaient favorables à la carbonatation, l'évolution du pH des éluats ne présente pas de signe évident de carbonatation (diminution du pH) sur la période de suivi.

La valeur de la conductivité électrique a été mesurée dans chacun des éluats de chaque matériau étudié. L'évolution de ces valeurs au cours du suivi est présentée ci-dessous.



Figure 40 – Evolution de la conductivité dans les éluats de dalles des différents matériaux testés

Les éluats des dalles pilotes présentent des niveaux de conductivité électrique différents les uns des autres : Les matériaux témoins sont ceux qui présentent le plus faible niveau de conductivité avec les matériaux à base des sédiments de Cagliari et de Livourne.

En revanche les matériaux mortier et béton à base du sédiment Toulon traité présentent une conductivité significativement élevée par rapport aux témoins. Les matériaux Mortier à base de sédiment Toulon Brut, Centuri Brut et Centuri Traité présentent un niveau de conductivité intermédiaire.

Ces valeurs sont à corrélérer avec les niveaux de concentration en sels des éluats de ces matériaux.

On rappellera ici que les formulations à base de sédiment traité contiennent une proportion plus importante de sédiment que les formulations à base de sédiment brut.

5.4.2. Suivi des chlorures et sulfates

➤ Résultats exprimés en concentrations

L'évolution de la concentration en chlorures reflète celle de la conductivité. En effet, les éluats du mortier et du béton du sédiment Toulon Traité, identifiés comme ceux qui présentent la conductivité la plus élevée sont aussi ceux qui contiennent les plus importantes concentrations en chlorures.



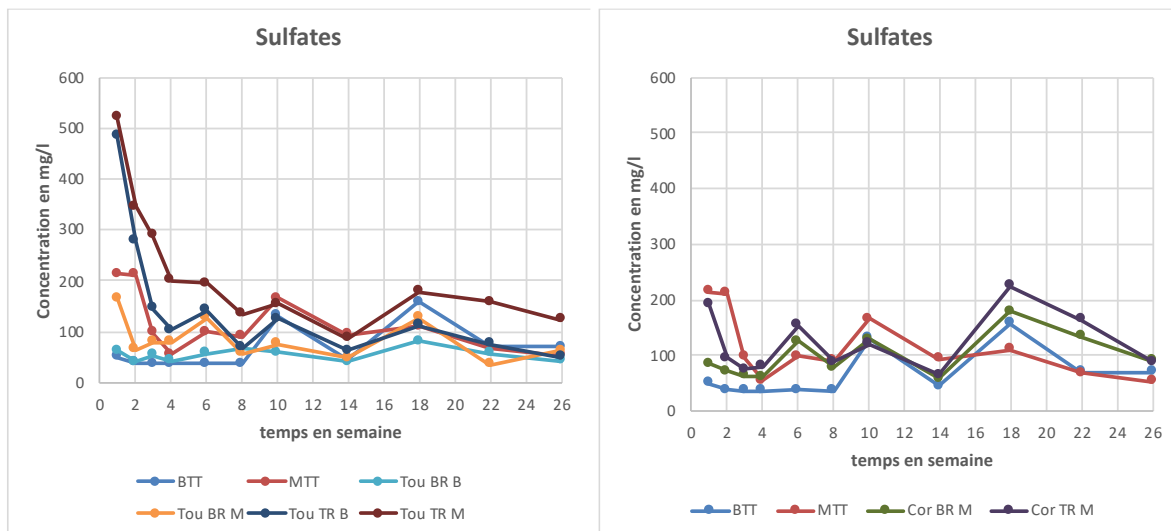
Figure 41 – Évolution de la concentration en chlorures dans les éluats de dalles des différents matériaux testés

Le sédiment de Toulon présente une texture particulièrement fine par rapport aux autres sédiments ce qui peut être à l'origine d'une rétention plus importante de chlorures par adsorption que les autres sédiments. Les matériaux mortier et béton retiennent peu ces anions.

La différence entre le relargage des formulations Toulon Brut et Toulon Traité peut provenir du fait que le sédiment Toulon traité n'a pas été laguné. Il a été traité directement après son prélèvement dans le milieu marin. Le sédiment Toulon Brut a été laguné puis stocké à terre et exposé au rinçage par l'eau de pluie. On retiendra également le fait que le mortier de sédiment traité contient une proportion plus importante de sédiment (42%) que le mortier de sédiment brut (29%).

Les concentrations en sulfates des éluats des dalles de matériaux contenant les sédiments sont relativement proches de celles des éluats des dalles témoin à l'exception des premiers points de suivi des dalles de Mortier et Béton du sédiment Toulon Traité.

Les hypothèses formulées pour expliquer le relargage de chlorures de ces mêmes matériaux peuvent également expliquer ce niveau supérieur de relargage en sulfates.



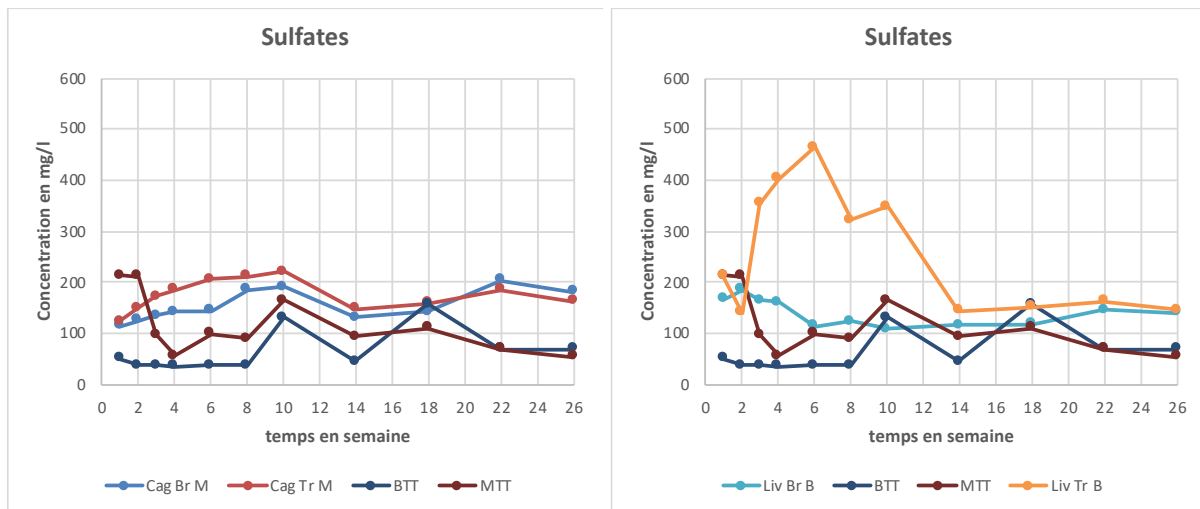


Figure 42 – Evolution de la concentration en sulfates dans les éluats de dalles des différents matériaux testés

Dans le cas des bétons à base de sédiment Livourne traité, un relargage de sulfates significativement supérieur à celui des témoins est observé entre les semaines 2 et 14. Ce phénomène n'est pas observé avec la formulation mortier. Il peut s'agir de l'effet de l'hétérogénéité du sédiment (effet pépité) ou d'une réaction particulière au cours du processus de maturation du béton. Le niveau de relargage en sulfates du béton du sédiment Livourne Traité rejoint un niveau proche de celui des témoins à partir de 14 semaines d'exposition.

➤ Résultats exprimés en relargage surfacique cumulé

Chacun des matériaux à base de sédiments testés présente un relargage surfacique cumulé en chlorures supérieur à celui des matériaux témoins. Parmi eux, les matériaux Mortier et Béton du sédiment de Toulon traité sont ceux qui présentent les niveaux de relargage les plus élevés.

Pour la suite de la présentation des résultats, et par soucis de lisibilité, nous avons fait le choix de cibler l'interprétation sur les résultats de relargage des matériaux réalisés à base du sédiment de Toulon (traité et brut).

Le relargage en chlorures du Mortier et du Béton du sédiment Toulon traité est supérieur aux matériaux à base de sédiment Toulon brut et aux matériaux témoins.

La formulation Mortier présente un niveau de relargage surfacique en chlorures plus élevé que la formulation béton.

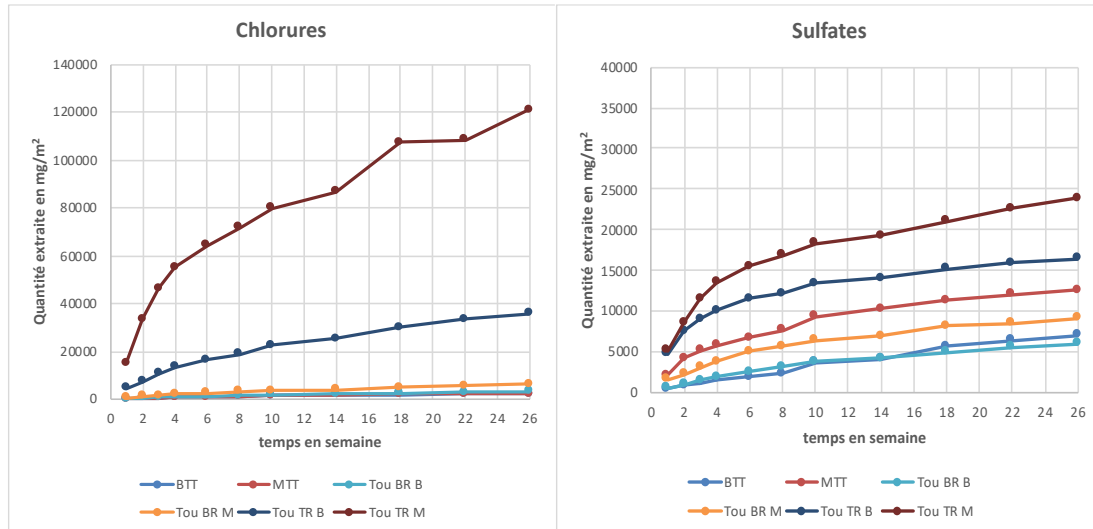


Figure 43 – Évolution du relargage surfacique cumulé en chlorures et sulfates dans les éluats de dalles des différents matériaux à base des sédiments de Toulon

5.4.3. Suivi des éléments métalliques

➤ Résultats exprimés en concentration

Dans l'ensemble, les concentrations en métaux dans les éluats des dalles de matériaux à base de sédiment sont très faibles et proches des concentrations en métaux dans les éluats des dalles de matériaux témoins. Leur représentation graphique est placée en annexe.

On observe toutefois, dans le cas de l'arsenic, pour les matériaux réalisés avec le sédiment de Toulon Brut et le sédiment de Toulon Traité, des concentrations supérieures à celles des matériaux témoins.

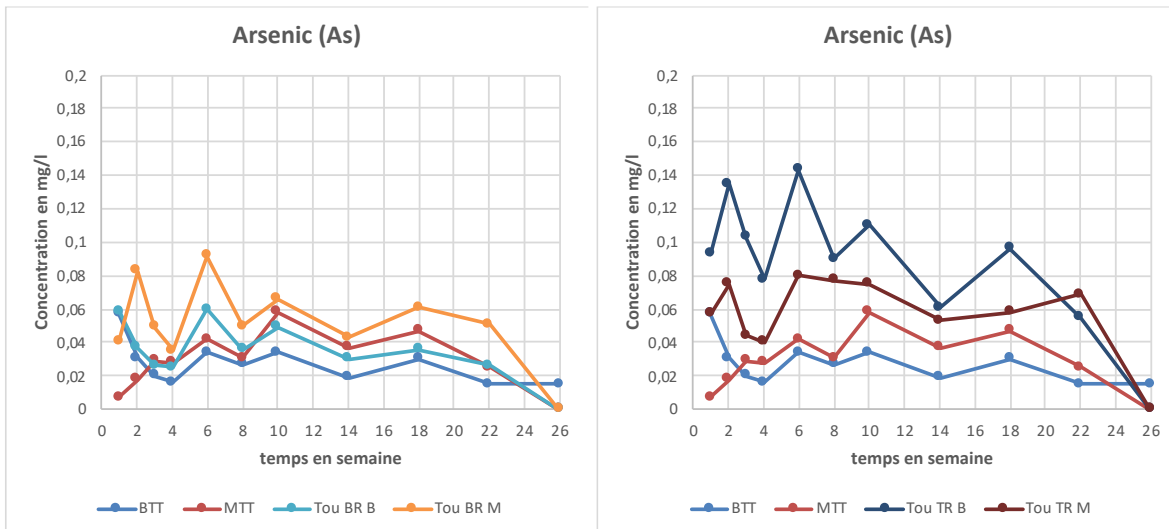


Figure 44 – Evolution de la concentration en arsenic dans les éluats de dalles des matériaux à base des sédiments de Toulon Brut (gauche) et de Toulon Traité (droite)

L'essai de caractérisation de la capacité de neutralisation acido-basique et de l'influence du pH sur le comportement à la lixiviation des sédiments, réalisée dans le cadre des caractérisations préliminaires, montre que le sédiment de Toulon présente une faible capacité de neutralisation basique et que la solubilité de l'arsenic peut atteindre de l'ordre de 0,1 mg/l à pH11.

Le pH de la solution porale du mortier et du béton étant de l'ordre de 12,5, ce niveau de concentration peut donc être dépassé.

La formulation mortier paraît mieux stabiliser l'arsenic que la formulation béton.

Le même phénomène a été observé pour le molybdène pour les mêmes matériaux.

➤ Résultats exprimés en relargage surfacique cumulé

L'expression du relargage en quantité surfacique cumulée permet de mettre en évidence de manière plus nette encore ces différences de relargage de l'arsenic

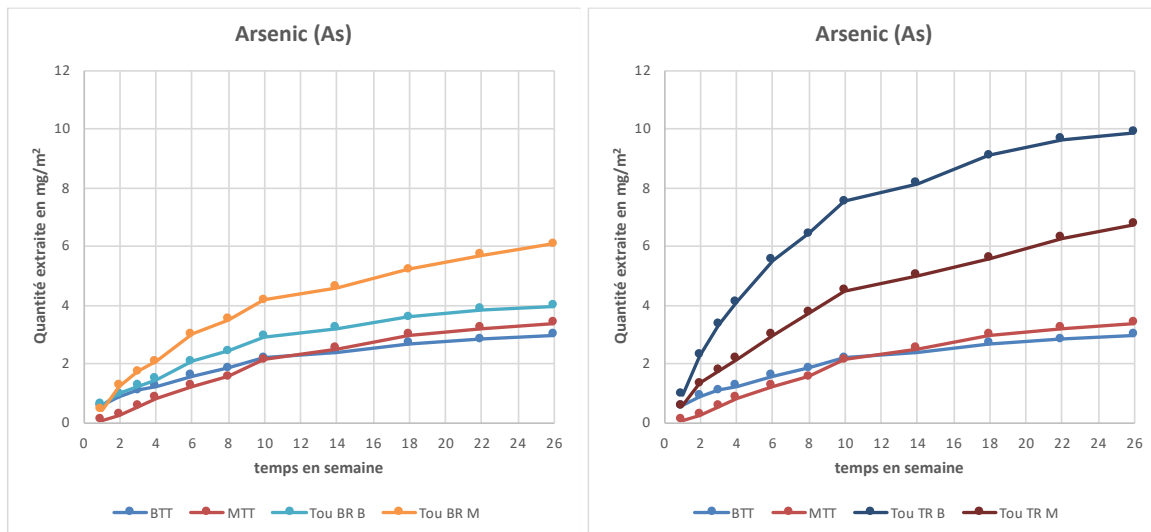


Figure 45 – Evolution du relargage surfacique cumulé en arsenic dans les éluats de dalles des matériaux à base des sédiments de Toulon Brut (gauche) et de Toulon Traité (droite)

Ces résultats présentent la même tendance que celle observée pour les chlorures et les sulfates avec un niveau de relargage supérieur pour les matériaux à base de sédiment traité par rapport aux matériaux à base de sédiment brut.

5.4.4. Suivi écotoxicologique

Le suivi de la CE20 dans les éluats des dalles de matériaux à base de sédiments et de matériaux témoins permet d'observer l'évolution de la toxicité éventuelle de ces percolats avec l'avancement de l'exposition à l'eau.

Pour la lecture de ces résultats il faut retenir que la toxicité est d'autant plus importante que la valeur de CE20 est faible puisqu'il s'agit de la concentration d'éluat déclenchant l'inhibition de la reproduction de 20% de la population de *Brachionus calyciflorus* testée.

Tableau 59 – Résultats de détermination de la CE20 d'inhibition de la reproduction de *Brachionus calyciflorus* dans les 3 éluats de suivi écotoxicologique

CE20	P2 (semaine 2)	P7 (semaines 9-10)	P11 (semaines 23 à 26)
Témoin Béton	>90%	18,1%	>90%
Témoin Mortier	>90%	24,1%	>90%
Toulon Brut Béton	>90%	40,3%	>90%
Toulon Brut Mortier	>90%	23%	>90%
Toulon Traité Béton	>90%	16,9%	>90%
Toulon Traité Mortier	>90%	11,2%	18,2%
Corse Brut Mortier	>90%	22,3%	>90%
Corse Traité Mortier	>90%	20,8%	41,9%
Cagliari brut mortier	>90%	>90%	>90%
Cagliari traité mortier	>90%	>90%	>90%
Livourne brut béton	>90%	>90%	>90%
Livourne traité béton	>90%	>90%	>90%

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

Les niveaux de toxicité observés dans le prélèvement intermédiaire sont peu différents entre les matériaux à base de sédiments et les matériaux témoin. Il s'agit donc, pour une part au moins, d'un effet de la matrice cimentaire. Nous retiendrons néanmoins que, le cas du matériau Mortier et du Béton à base de sédiment de Toulon Traité, identifié par ailleurs comme ceux qui présentent un niveau de relargage plus important en chlorures, sulfates, arsenic et molybdène, se distingue des autres matériaux par un niveau de toxicité supérieur et prolongé dans le temps (cas du Mortier Toulon Traité).

On notera que, pour des raisons administratives, les éluats de lysimètre des sédiments de Cagliari et de Livourne ont du être stockés à +4°C pendant un temps dépassant largement 48h. Ceci doit conduire à considérer ces résultats avec prudence.

5.4.5. Synthèse des résultats des essais en dalles

Les paramètres susceptibles de rendre les ouvrages non conformes aux conditions acceptables d'un point de vue environnemental pour une valorisation en matériaux de type béton ou mortier :

- Les chlorures
- L'arsenic et le molybdène dans le cas du sédiment de Toulon Traité, en particulier dans la formulation Mortier.

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

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

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- La valorisation en technique routière continentale
- La valorisation en ouvrages côtiers ou maritimes
- La valorisation en matériaux monolithiques continentaux
- La valorisation en matériaux monolithiques côtiers ou maritimes

- Le rechargement de plages
- L'immersion en zone marine non côtière
- L'immersion en vasque maritime

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

DELIVERABLE T2.4.7 : SINTESI DI TRATTAMENTI PILOTA E VALORIZZAZIONE

INTRODUZIONE

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

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

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

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

1. PROCEDURE DI VALUTAZIONE DEI SEDIMENTI NELL'AMBITO DELLA GESTIONE POST DRAGAGGIO

Le caratteristiche ambientali dei materiali da dragare ne influenzano le modalità di gestione. Se i livelli di contaminazione restano al di sotto delle soglie N1 e N2 (soglie GEODE definite nel decreto interministeriale francese del 14 giugno 2000, modificato dai decreti del 9 agosto 2006, 23 dicembre 2009, 8 febbraio 2013 e 17 luglio 2014), i sedimenti potranno essere orientati verso una gestione marina (immersione o rigetto in mare o in estuario). In caso contrario e salvo deroghe delle autorità competenti (basate su indagini complementari, in funzione del progetto preso in considerazione e del grado di superamento della soglia N1), qualora un solo valore superi il livello N2, i sedimenti di dragaggio dovranno essere indirizzati verso una gestione terrestre (stoccaggio o recupero) e assumono di fatto lo status di rifiuti.

Infatti, l'articolo L41-4-1 del Codice dell'Ambiente francese definisce il campo di applicazione delle disposizioni relative alla prevenzione e alla gestione dei rifiuti secondo questi termini, ripresi dalla direttiva europea 2008/98/CE:

« sono esclusi dall'ambito di applicazione della presente direttiva i sedimenti spostati all'interno di acque superficiali ai fini della gestione delle acque e dei corsi d'acqua o della prevenzione di inondazioni o della riduzione degli effetti di inondazioni o siccità o ripristino dei suoli, se è provato che i sedimenti non sono pericolosi. »

Di fatto, tale definizione suggerisce che i sedimenti spostati a terra rientrano nel campo d'applicazione del capitolo relativo alla gestione dei rifiuti.

1.1. PROCEDURA FRANCESE

1.1.1. Carattere pericoloso dei sedimenti

I sedimenti di dragaggio sono elencati nella lista dei rifiuti inclusa nella decisione della Commissione europea del 3 maggio 2000 sotto i seguenti codici :

- 17 05 05*: Fanghi di dragaggio contenenti sostanze pericolose
- 17 05 06: Fanghi di dragaggio diversi da quelli previsti alla rubrica 17 05 05

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

Poiché si tratta di una «voce a specchio» («entrée miroir », termine utilizzato per caratterizzare un rifiuto presente sotto due forme possibili nell'elenco europeo dei rifiuti, una a carattere pericoloso e l'altra a carattere non pericoloso) la verifica del carattere pericoloso del rifiuto deve basarsi sull'analisi delle 15 caratteristiche di pericolo, da HP1 a HP15, elencate nell'allegato III della Direttiva 2008/98/CE. Tra queste 15 caratteristiche di pericolo, alcune riguardano in particolare rifiuti soggetti a rischi specifici come quello esplosivo (HP1), comburente (HP2), infiammabile (HP3), infettivo (HP9) o di emissione di gas tossici in presenza d'acqua o di un acido (HP12). Alcune caratteristiche di pericolo possono essere considerate dunque in molti casi non pertinenti.

L'INERIS e il Cerema hanno lavorato insieme all'elaborazione di una procedura semplificata di valutazione della pericolosità dei sedimenti (per le caratteristiche HP 4, HP 5, HP 6, HP 7, HP 8, HP10, HP 11 e HP 13) rispetto alla procedura completa di valutazione descritta nella guida INERIS (Rapporto INERIS-DRC-15-149793- 06416A).

La procedura semplificata, specifica per la valutazione della pericolosità dei sedimenti, è stata oggetto di una pubblicazione dell'INERIS e del CEREMA con riferimento INERIS-DRC-16-149793-00431B.

Nel caso della caratteristica di pericolo « Ecotossico » HP14, il BRGM ha elaborato un protocollo ecotossicologico per la valutazione della caratteristica di pericolo (HP14) dei sedimenti destinati alla gestione terrestre. Il protocollo è stato pubblicato dal BRGM, sotto il codice BRGM/RP-61420-FR, e successivamente dall'INERIS nella sua guida INERIS-DRC-15-149793-06416A.

1.1.2. Accettabilità ambientale dei materiali alternativi nelle tecniche stradali

Il Ministero dell'Ambiente francese ha sviluppato una metodologia per la valutazione delle caratteristiche ambientali dei materiali alternativi destinati all'impiego nelle tecniche stradali, pubblicata a marzo del 2011 dal CEREMA con il codice SKU1841125457, acquistabile sul sito (<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/acceptabilite-materiaux-alternatifs-technique-routiere>).

La guida metodologica è declinata in guide applicative e operative, per i depositi di materiali alternativi i cui risultati sperimentali sono probanti. Una guida applicativa simile è stata dedicata ai sedimenti di dragaggio ed è attualmente in corso di elaborazione.

In attesa di un simile quadro di valutazione specifico per i sedimenti, occorre far riferimento alla guida metodologica generale che definisce tre livelli di caratterizzazione ambientale dei materiali alternativi e dei materiali stradali, allo scopo di modulare lo sforzo di dimostrazione in base al rischio che i materiali interessati presentano per l'ambiente.

- Caratterizzazione ambientale di primo livello : l'obiettivo di questa fase è quello di fornire informazioni sulla variabilità e di giustificare l'accettabilità dell'uso dei materiali alternativi nelle tecniche stradali sulla base di prove di lisciviazione e di analisi dei contenuti totali.

- Caratterizzazione ambientale di secondo livello : l'obiettivo di questa fase è quello di giustificare l'accettabilità dell'uso dei materiali alternativi nelle tecniche stradali sulla base di saggi di percolazione.
- Caratterizzazione ambientale di terzo livello : nell'ipotesi in cui i livelli di caratterizzazione ambientale precedenti non permettano di giustificare l'accettabilità dell'uso di un materiale alternativo nelle tecniche stradali, o se le procedure o i saggi associati non sembrano adeguati alla natura o al comportamento di tali materiali, la guida metodologica lascia la possibilità di attuare uno studio specifico per giustificare i suddetti utilizzi.

Tale studio specifico viene elaborato su iniziativa delle principali federazioni professionali interessate (o, in mancanza di queste, sfruttando un impianto classificato per l'ambiente) e successivamente validato dal ministero incaricato dello sviluppo sostenibile, con l'eventuale appoggio delle istituzioni pubbliche della sua rete scientifica e tecnica o sotto la sua tutela, e di concerto con i rappresentanti della gestione e delle associazioni per la tutela dell'ambiente.

1.2. PROCEDURA ITALIANA

In Italia, le operazioni di dragaggio sono regolamentate in base alla zona in cui i sedimenti da dragare sono situati, a seconda che si tratti di una zona SIN (Siti di Interesse Nazionale) o fuori SIN. Le zone SIN sono aree portuali o zone marino costiere che necessitano di «bonifica» per via di un'eccessiva contaminazione a cui occorre porre rimedio, oppure in ragione di un particolare interesse ecologico da preservare. Le zone fuori SIN sono aree portuali o marino costiere che si trovano al di fuori dei siti di interesse nazionale.

Le operazioni di dragaggio effettuate all'interno dei SIN sono regolamentate dall'articolo 5-bis della Legge N° 84/1994 (e relative modifiche e integrazioni) e dal decreto ministeriale (D.M.) 172/2016 («Regolamento recante la disciplina delle modalità e delle norme tecniche per le operazioni di dragaggio nei siti di interesse nazionale») sulla base dei risultati delle analisi fisico-chimiche, microbiologiche ed ecotossicologiche, ai sensi del D.M. del 7 novembre 2008 e relative modifiche e integrazioni.

Le operazioni di dragaggio effettuate all'esterno dei SIN sono regolate invece dal D.M. N° 173/2016 («Regolamento recante modalità e criteri tecnici per l'autorizzazione all'immersione in mare dei materiali di escavo di fondali marini») e dal D.M. del 24 gennaio 1996, sulla base dei risultati delle analisi fisico-chimiche, microbiologiche ed ecotossicologiche definite nei suddetti decreti.

I sedimenti di dragaggio in Italia sono orientati quasi esclusivamente verso una gestione marina. La gestione terrestre riguarda soltanto i sedimenti di dragaggio sottoposti a divieto di immersione in mare (es. sedimenti pericolosi), la cui destinazione sarà lo stoccaggio in discarica, e quelli dragati all'interno dei SIN che rispettano alcune condizioni restrittive (cfr. punto 3) che ne consentono il riutilizzo a terra tal quali, o in seguito a trattamenti di desalinizzazione o di eliminazione delle sostanze inquinanti.

1.2.1. Sedimenti dragati in zone SIN

Come accennato in precedenza, le metodologie e i criteri di esecuzione delle attività di caratterizzazione dei sedimenti da dragare all'interno dei SIN sono definite dal D.M. del 7 novembre 2008 (modificato dal D.M. del 04 agosto 2010). Il piano di campionamento previsto per la caratterizzazione dei sedimenti da dragare deve permettere di formulare un'ipotesi affidabile sulla ripartizione nello spazio della contaminazione. L'analisi geostatistica deve essere lo strumento da prediligere, per quanto possibile. In assenza dell'elaborazione geostatistica, deve essere applicato il principio di precauzione per calcolare e caratterizzare i volumi da gestire.

Per quanto riguarda la gestione dei sedimenti di dragaggio all'interno dei SIN, in base alle esigenze qualitative specifiche, definite secondo le loro caratteristiche chimiche, fisiche, microbiologiche ed ecotossicologiche, sono state identificate le seguenti opzioni :

- 1) Immissione o refluento nel corpo idrico di provenienza o reimpiego per il rifacimento degli arenili, per la formazione di terreni costieri, per il miglioramento dello stato dei fondali attraverso attività di «capping»: questa opzione di gestione marina riguarda i sedimenti dragati all'interno dei SIN, che presentano naturalmente, o in seguito a trattamenti destinati esclusivamente all'eliminazione delle sostanze inquinanti (eccetto quelli con l'obiettivo di immobilizzare le sostanze inquinanti per solidificazione o stabilizzazione), caratteristiche fisiche, chimiche e microbiologiche simili a quelle del sito di destinazione e che non presentano risultati positivi ai test ecotossicologici.
- 2) Confinamento all'interno di casse di colmata, vasche di raccolta o strutture di contenimento, realizzate applicando le migliori tecniche a disposizione (in conformità con i criteri di concezione formulati dalle norme tecniche internazionali accreditate e adottate negli Stati membri dell'Unione Europea).

I sedimenti interessati da questa modalità di gestione devono presentare delle caratteristiche che garantiscano l'assenza di rischi per la salute umana e per l'ambiente, in relazione con l'obbligo di non deteriorare la qualità delle matrici ecologiche, del suolo, del sottosuolo, delle acque sotterranee o di superficie, di quelle marine e di transizione. Questo reimpiego è autorizzato se i sedimenti sono considerati non pericolosi in origine o in seguito a trattamenti destinati esclusivamente all'eliminazione delle sostanze inquinanti (eccetto quelli con l'obiettivo di immobilizzare le sostanze inquinanti per solidificazione o stabilizzazione).

- 3) Impiego dei sedimenti a terra, a condizione che essi non presentino, di natura o in seguito a trattamenti di desalinizzazione o di eliminazione delle sostanze inquinanti (eccetto quelli con l'obiettivo di immobilizzare le sostanze inquinanti per solidificazione o stabilizzazione), livelli di contaminazione superiori rispetto a quelli indicati alle colonne A e B della Tabella 1 dell'Allegato 5 - Sezione IV del D. Lgs. N° 152/2006, in funzione della destinazione d'uso, e che siano conformi alle condizioni di trasferimento previste dal D.M. del 05 febbraio 1998 per la gestione terrestre, modificato dall'articolo 252 del D. Lgs. N° 152/2006 (a sua volta integrato dal D.M. N° 172/2016 che tratta la gestione ambientale delle fasi di deposito). Inoltre, nel caso dell'impiego a terra dei sedimenti in aree con falda naturalmente salinizzata, è possibile ottenere una deroga ai limiti di contenuti lisciviabili (su eluito) definiti nell'allegato 3 del D.M. del 5 febbraio 1998 per i solfati e i cloruri, a condizione che, di concerto con l'autorità territorialmente competente dell'ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente), qualunque trasformazione delle caratteristiche del suolo di destinazione sia evitata.

Per queste tre principali opzioni, il D.M. 172/2016 offre, per ciascuna fase di gestione dei sedimenti (dal dragaggio al deposito, passando per il trasporto, conformemente agli usi previsti al paragrafo 2 dell'articolo 5 bis della Legge N° 84/1994), la descrizione delle procedure applicabili, le misure di mitigazione e i criteri di predisposizione e di realizzazione delle attività di monitoraggio. Sono escluse dal campo di applicazione del decreto, le operazioni di deposito, trasporto e trattamento dei materiali che non rispettano i requisiti di qualità stabiliti per l'utilizzo ai sensi dell'articolo 5 bis della Legge N° 84/1994 (che restano soggette al regime dei rifiuti, di cui alla Parte IV del d.lgs. 152/2006), così come le operazioni inerenti i materiali provenienti da operazioni di dragaggio all'interno dei SIN, ma destinati ad essere gestiti al di fuori di detti siti (regolate in applicazione del D.M. N° 173/2016 - specificate qui di seguito).

1.2.2. Sedimenti dragati al di fuori delle zone SIN

Come detto in precedenza, le operazioni di dragaggio svolte al di fuori dei SIN sono soggette alle disposizioni del D.M. N° 173/2016, che definisce le modalità di rilascio dell'autorizzazione dell'immersione volontaria in mare dei materiali di cui all'articolo 109, paragrafo a), comma 2 del decreto legislativo 3 aprile 2006, N° 152 (materiale derivante da attività di escavo dei fondali marini o salmastri o di terreni litoranei emersi), al fine di garantire la protezione dell'ambiente marino.

Tale normativa determina altresì :

- I criteri omogenei per tutto il territorio nazionale inerenti l'utilizzo dei materiali di dragaggio ai fini di attività di colmata o nell'ambiente circostante. Si tratta di criteri di caratterizzazione, di classificazione e di accettabilità dei materiali allo scopo di poter raggiungere o mantenere gli obiettivi di qualità ambientale delle acque marino costiere, ai quali le regioni devono adeguarsi.
- La gestione dei materiali di dragaggio provenienti dalle aree portuali e marino costiere non comprese nella perimetrazione dei SIN.
- La gestione, al di fuori dei SIN, dei materiali provenienti da attività di dragaggio realizzate nei porti costieri e nei litorali all'interno della perimetrazione dei SIN.

L'allegato tecnico del D.M. N° 173/2016 disciplina l'insieme del processo di caratterizzazione e gestione dei sedimenti da movimentare, compresa la pianificazione e la realizzazione del campionamento, le analisi di laboratorio (fisiche, chimiche, ecotossicologiche, biologiche e microbiologiche) e la classificazione della qualità dei sedimenti, fino alla formulazione di ipotesi di gestione che rispettino l'ambiente e all'elaborazione di piani di monitoraggio delle attività.

Alcuni nuovi criteri di valutazione integrata e ponderata sono stati introdotti dal D.M. N° 173/2016 per completare e rafforzare la valutazione basata soltanto sui criteri di valutazione tabellare utilizzati. Per la classificazione chimica : il confronto dei risultati con i livelli nazionali di riferimento (L1 e L2) ; per la classificazione ecotossicologica : i risultati della batteria di saggi biologici utilizzati.

I criteri di integrazione ponderata applicati alle analisi chimiche prendono in considerazione il tipo di parametro, il numero di contaminanti superiori alle soglie stabilite e il grado di superamento di tali soglie, la tossicità potenziale degli elementi, a seconda che essi figurino nell'elenco delle sostanze «prioritarie» o in quello delle sostanze «pericolose e prioritarie», o che siano citati nella Convenzione di Stoccolma in quanto inquinanti organici persistenti (POP) e si fondano sull'elaborazione di un quoziente di rischio chimico (HQc) che consente di ponderare i sedimenti in base alla loro classificazione da «rischio assente» a «rischio molto elevato». I criteri di integrazione ponderata applicati alle analisi ecotossicologiche prendono in considerazione le particolari caratteristiche dei saggi biologici inclusi nella batteria impiegata, tra cui : l'importanza statistica della differenza d'effetto tra il campione e il controllo, la gravità dell'effetto, il tipo di esposizione (acuta o cronica) e la rappresentatività ambientale della matrice testata. La classificazione ecotossicologica ponderata si fonda dunque su un criterio di rischio ecotossicologico che può andare da « assente » a «molto elevato», elaborato a partire dall'integrazione ponderata dei risultati di tutti i componenti dell'insieme delle batterie di saggi biologici utilizzate.

La categoria qualitativa dei sedimenti risulta dunque dall'integrazione della classificazione chimica ed ecotossicologica attraverso l'applicazione dei criteri tabellari e dei criteri d'integrazione ponderata. Sono state così definite cinque categorie di qualità dei sedimenti (A, B, C, D, E), che vanno da rischio « assente » a «molto elevato ».

Le 5 categorie di appartenenza del materiale definiscono nel dettaglio le opzioni di gestione disponibili.

Categoria A :

- ✓ Ripascimento della spiaggia emersa con frazione fine (fango + argilla ; $<63\mu\text{m}$) $\leq 10 \%$ o altro valore stabilito su base regionale
- ✓ Ripascimento della spiaggia sommersa con frazione sabbiosa prevalente
- ✓ Immersione deliberata in aree marine non costiere (oltre le 3 miglia nautiche dalla costa)
- ✓ Immersione in ambiente conterminato marino-costiero

N.B. : Per ogni opzione deve essere prevista e realizzata una graduale attività di monitoraggio ambientale.

Categoria B :

- ✓ Immersione deliberata in aree marine non costiere (oltre le 3 miglia nautiche dalla costa) con monitoraggio ambientale
- ✓ Immersione in ambiente conterminato in ambito portuale, incluse operazioni di capping, con monitoraggio ambientale

Categoria C :

- ✓ Immersione in ambiente conterminato, in ambito portuale in grado di trattenere tutte le frazioni granulometriche del sedimento, incluse le operazioni di capping all'interno di aree portuali, con idonee misure di monitoraggio ambientale.

Categoria D :

- ✓ Immersione in ambiente conterminato impermeabilizzato, con idonee misure di monitoraggio ambientale.

Categoria E :

- ✓ Eventuale rimozione in sicurezza dall'ambiente marino dopo valutazione del rischio, secondo quanto previsto dalla normativa vigente.

Oltre ai nuovi criteri di valutazione integrata e ponderata, che permettono di rivedere le classi di qualità dei sedimenti e le opzioni di gestione, il D.M. N° 173/2016 introduce anche altri elementi importanti, come la «Scheda di inquadramento dell'area di escavo» per la raccolta e la valorizzazione delle informazioni precedenti alle fasi successive, la possibilità di adattare il livello di caratterizzazione dei sedimenti in base a tipo di ambiente (Percorso I: Caratterizzazione completa per le aree portuali interne e per le aree portuali esterne all'imboccatura dei porti e/o passo di accesso al porto per un volume complessivo annuale ≥ 40000 m³ / Percorso II: Caratterizzazione semplificata per le zone costiere non portuali, le aree di foce fluviale non portuali, aree interne a porti esclusivamente turistici; aree portuali esterne all'imboccatura e/o passo di accesso al porto per un volume complessivo annuo < 40000 m³). In base ai dati già disponibili ; la priorità va accordata ai risultati della caratterizzazione ecotossicologica rispetto a quelli dell'analisi chimica.

2. CARATTERIZZAZIONE DEI SEDIMENTI STUDIATI

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

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

2.1. CARATTERIZZAZIONE DEI SEDIMENTI SECONDO LA PROCEDURA FRANCESE

2.1.1. Valutazione delle caratteristiche di pericolo dei sedimenti

- **Analisi delle caratteristiche di pericolo da HP4 a HP8, HP10, HP11 e HP13 dei sedimenti**

L'analisi della composizione dei sedimenti permette di verificare la loro posizione rispetto ai valori limite che garantiscono il carattere non pericoloso di un sedimento in base alle caratteristiche di pericolo da HP4 a HP8, HP10, HP11 e HP13, secondo la procedura semplificata proposta dal gruppo di lavoro condotto dall'INERIS e dal CEREMA (Rapporto INERIS-DRC-15-149793-06416A).

La composizione dei quattro sedimenti studiati è confrontata con le soglie riportate nella seguente tabella.

Tabella 1 - Composizione dei quattro sedimenti e valori limite che garantiscono il carattere non pericoloso rispetto alle caratteristiche di pericolo da HP4 a HP8, HP10, HP11 e HP13

Paramètre	Seuils INERIS – CEREMA (mg/kg MS)	Sédiment Centuri (mg/kg MS)	Sédiment Toulon (mg/kg MS)	Sédiment Cagliari (mg/kg MS)	Sédiment Livourne (mg/kg MS)
Arsenic	330	4,43	7,94	29	14,3
Cadmium	530	<0,40	<0,40	2,52	<0,40
Chrome VI	250	159 (Cr T)	10,9 (Cr T)	14,5	45,2
Cuivre	4000	51,2	14	63,5	27,3
Mercure	500	<0,1	0,33	0,9	<0,1
Nickel	130	125	9,2	9,64	43,5
Plomb	1000	25,6	45,7	175	16,6
Zinc	7230	83,6	57,9	358	68,2
PCB (7 congénères)	50	0,001	0,024	0,012	<0,001
HAP (16 US- EPA)	500	0,26	<0,002	0,006	1,83
Tributylétain	3000	0,134	0,005	0,015	0,007

I risultati mostrano che i quattro sedimenti non presentano una composizione caratteristica dei sedimenti pericolosi secondo la procedura semplificata INERIS – CEREMA.

➤ **Analisi della caratteristica di pericolo HP14 dei sedimenti**

La caratterizzazione ecotossicologica dei sedimenti è stata eseguita applicando la procedura di valutazione della caratteristica HP14 come definita dal rapporto INERIS-DRC-15-149793-06416A.

Questa procedura si basa su una batteria di saggi di tossicità acuta e cronica con organismi acquatici e terrestri di diversi livelli trofici, in conformità con il protocollo in vigore in Francia, descritto nella parte dedicata ai sedimenti del rapporto INERIS-DRC-15-149793-06416A1. I valori di riferimento che permettono di distinguere un sedimento pericoloso da uno non pericoloso sono :

- ✓ per i saggi di tossicità acuta (organismi acquatici e terrestri) il valore di riferimento è $EC50 \leq 10\%$, ciò significa che un sedimento è considerato pericoloso se la concentrazione che provoca il 50% d'inibizione con un saggio di tossicità acuta è minore o uguale al 10%. Quindi, quando il saggio è eseguito con la soglia di concentrazione del 10%, il sedimento è classificato come pericoloso se l'inibizione osservata è uguale o maggiore del 50%.
- ✓ per i saggi di tossicità cronica (organismi acquatici): $EC20 \leq 1\%$, ciò significa che un sedimento è considerato pericoloso se la concentrazione che provoca il 20% di inibizione con uno dei saggi tossicità cronica è minore o uguale all'1%. Quindi, quando il saggio è realizzato soltanto con la soglia di concentrazione dell'1% il sedimento è classificato pericoloso se l'inibizione osservata è maggiore o uguale al 20%.

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

N.B. Si segnala che devono essere presi in considerazione i risultati di tutti i saggi della batteria. Questo significa che un solo risultato positivo ("tossico"), per uno solo degli organismi, è sufficiente per attribuire al sedimento il carattere pericoloso.

a. Preparazione dei campioni

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

I biosaggi sono stati realizzati a partire da sottocampioni primari omogeneizzati. I sedimenti, di aspetto globalmente omogeneo, non sono stati setacciati. Soltanto eventuali sassi, frammenti di conchiglie e agglomerati di Posidonia sono stati eliminati manualmente.

In conformità con il protocollo citato in precedenza, i sedimenti sono stati centrifugati per 30 minuti a 8150 G (cioè circa 3000 rpm) in modo da eliminare il sale marino, per natura tossico per gli organismi continentali ma considerato non pericoloso secondo la normativa.

Per ciascun sedimento è stato ottenuto un eluito, mediante il saggio di lisciviazione standardizzato di cui alla norma NF EN 12457-2 (proporzione 100 g di equivalente secco/litro d'acqua, 24 ore di agitazione), senza aggiustamenti del pH e filtrato a 0,45 µm, come stabilito nel protocollo della guida INERIS 2016. La conduttività degli eluiti per i saggi è stata misurata dopo la loro filtrazione.

Gli eluiti sono stati poi conservati al buio a +4°C e i biosaggi sono stati effettuati entro le 48 ore.

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

Il saggio permette di valutare la tossicità acuta di un eluito di sedimento dopo la filtrazione a 0,45 µm. È eseguito nelle condizioni definite dalla norma NF EN ISO 11348-2 (NF T 90-320) e realizzato con batteri luminescenti liofilizzati disponibili in commercio. Si svolge all'interno di una camera climatizzata a +15°C. Durante il saggio alle soglie, i batteri sono messi in contatto con l'eluito diluito al 10% per 30 minuti (due repliche sono realizzate in parallelo). La luminescenza delle sospensioni batteriche è misurata, con l'ausilio di un fotomoltiplicatore, prima e dopo il contatto con l'eluito diluito. Le diluizioni sono realizzate con l'ambiente di riferimento (acqua distillata salata a 20 g di NaCl/L) utilizzata anche per i lotti di controllo senza eluito. Al termine del saggio, si stabilisce la percentuale di inibizione della luminescenza batterica provocata da 30 minuti di contatto con l'eluito al 10%, confrontando i dati con il lotto di controllo.

Con questo saggio, secondo i valori di riferimento per i saggi di tossicità acuta, un sedimento sarà considerato pericoloso se la EC50 è minore o uguale al 10%, ossia, nel caso del saggio "alle soglie", se l'inibizione della luminescenza osservata per l'eluito diluito al 10% è maggiore o uguale al 50%.

c. Saggio di inibizione della riproduzione del rotifero *Brachionus calyciflorus*

Questo test permette di valutare la tossicità cronica di un eluito rispetto ad un organismo acquatico animale partenogenetico. Viene effettuato secondo le modalità definite dalla norma NF ISO 20666 ed è realizzato con organismi disponibili in commercio (Rotokit®) esposti individualmente all'eluito diluito all'1% (concentrazione massima) per 48 ore. Il saggio è eseguito su micropiastre (con pozzetti da 1 ml). Comprende 8 repliche per eluito e un lotto di controllo senza eluiti. In principio di saggio, un solo organismo con 2 ore di vita viene introdotto in ciascun pozzetto della micropiastre. L'incubazione di fa 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. Dopo 48 ore d'incubazione, gli organismi presenti in ciascun pozzo vengono contati. L'inibizione della riproduzione degli organismi è calcolata per ciascun eluito (media delle 8 repliche) rispetto al lotto di controllo senza eluiti.

Con questo saggio di tossicità cronica, un sedimento sarà considerato pericoloso se la EC20 del suo eluito è minore o uguale all'1%, cioè, nel caso del saggio "alle soglie", se l'eluito diluito all'1% provoca un'inibizione della riproduzione di *B. calyciflorus* maggiore o uguale al 20% rispetto al lotto di controllo.

d. Saggio d'inibizione della germinazione e della crescita fogliare di vegetali - saggio in vaso

Il saggio d'inibizione della germinazione e della crescita fogliare di semenze vegetali permette di valutare la tossicità acuta sui vegetali terrestri. Questo saggio è effettuato in vaso, nelle condizioni definite dalla norma ISO 11269-2. Il supporto di coltura di controllo e di diluizione è il substrato di riferimento ISO² umidificato con acqua di rete dechlorata per aerazione. Le semenze sono esposte ai sedimenti diluiti al 10% nel substrato ISO. Si realizzano 4 repliche di 10 semenze per lotto. Le semenze sono disposte sulla superficie di substrato della coltura. Per tutta la durata del saggio, l'umidità è mantenuta costante. Nessun concime è stato dato né al lotto di controllo, né ai sedimenti. La specie vegetale utilizzata è l'avena (*Avena sativa*), raccomandata dal protocollo sedimenti. Dopo una settimana di esposizione, si contano le semenze che hanno germinato in ciascuna replica.

Il saggio viene poi portato avanti per 3 settimane. Al termine del saggio, le parti fogliari delle piante sono raccolte (selezionate al colletto) e messe ad essiccare in forno a 80°C. La massa secca delle piante coltivate a contatto dei sedimenti è comparata alla massa secca delle piante del lotto di controllo.

Con questo saggio di tossicità acuta, secondo i valori di riferimento descritti in precedenza, un sedimento sarà considerato pericoloso se la EC50 è minore o uguale al 19%, cioè, nel caso del saggio "alle soglie", se l'inibizione della germinazione o della crescita fogliare osservata per il sedimento diluito al 10% nel substrato di riferimento è maggiore o uguale al 50%. Il pH e la conduttività delle miscele di sedimenti al 10% nel substrato di riferimento sono stati misurati.

e. Risultati

Il lotto di sedimenti prelevati per le prove pilota per Centuri e Tolone presenta le seguenti caratteristiche ecotossicologiche :

- I sedimenti di Tolone e Livorno utilizzati per le prove pilota provengono dallo stesso lotto di quelli esaminati nell'ambito della caratterizzazione preliminare (cfr. elaborato T2.1.1). Le loro caratteristiche ecotossicologiche, ottenute mediante l'applicazione della procedura detta "alle soglie", sono ricapitolate qui di seguito.

Tabella 2 - Sintesi dei risultati della batteria completa di saggi HP14 effettuati sui sedimenti di Tolone e Livorno e conclusioni (valori di riferimento INERIS 2016)

Sédiment	Conductivité (µS/cm à 20°C)	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 germination de <i>A. sativa</i> à 10%	Inhibition de la croissance de <i>A. sativa</i> à 10%	Conclusions HP14
Valeur limite supérieure	-	50%	20%	50	50	-
Toulon	2 575	0 %	15,7 % - 3,1 %	0 %	0 % ^(f)	non dangereux
Livourne	2 181	0 %	25,6 % - 31,3 %	2,8 %	0 % ^(f)	dangereux

(f): effetto fertilizzante - la crescita delle piante (espressa in massa secca fogliare) è superiore a quella dei lotti di controllo.

- I sedimenti di Centuri e Cagliari utilizzati per le prove pilota sono stati invece oggetto di un nuovo prelievo. Le loro caratteristiche ecotossicologiche, ottenute mediante l'applicazione del protocollo HP14 completo, sono ricapitolate qui sotto.

Tabella 3 - Sintesi dei risultati della batteria completa di saggi HP14 effettuati sui sedimenti di Centuri e Cagliari e conclusioni (valori di riferimento INERIS 2016)

Sédiment	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C)	CE50 - Inhibition de la luminescence de <i>V. fischeri</i>	CE20 - Inhibition de la reproduction de <i>B. calyciflorus</i>	CE50 - Inhibition de la germination de <i>A. sativa</i>	CE50 - Inhibition de la croissance de <i>A. sativa</i>	Conclusions HP14
Valeur limite inférieure	-	10%	1%	10%	10%	-
Centuri	4 195	>80 %	>90 %	26,3 %	30 %	non dangereux
Cagliari	3 430	>80 %	>90 %	23,7 %	27,4 %	non dangereux

Per ciascun sedimento, il carattere "pericoloso / non pericoloso" è attribuito secondo i valori di riferimento della procedura (non regolamentare) attualmente in vigore in Francia, così come descritta nella guida INERIS 2016.

I risultati mostrano che tra i 4 sedimenti studiati a livello sperimentale, soltanto quello di Livorno presenterebbe un carattere pericoloso per le sue proprietà ecotossiche. Nel quadro della procedura francese, questo sedimento non potrà essere recuperato al suo stato attuale.

2.1.2. Caratterizzazione ambientale di primo livello

L'analisi della frazione lisciviabile dei sedimenti permette di verificare la loro posizione rispetto ai valori limite di lisciviazione che consentono di giustificare tutti gli utilizzi nelle tecniche stradali previsti dalla guida SETRA « Acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale ».

La frazione lisciviabile dei quattro sedimenti studiati è confrontata con le soglie riportate nella seguente tabella.

Tabella 4 - Frazione solubile dei quattro sedimenti e limiti massimi di lisciviazione per tutti gli impieghi previsti dalla guida SETRA « Acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale »

Paramètre	Ensemble de valeurs à respecter par au moins 80% des échantillons (mg/kg MS)	Centuri (mg/kg MS)	Toulon (mg/kg MS)	Cagliari (mg/kg MS)	Livourne (mg/kg MS)
As	0,5	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Ba	20	<0,10	<0,10	0,44	0,29
Cd	0,04	<0,002	<0,002	0,003	<0,002
Cr total	0,5	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Cu	2	0,25	<0,20	0,52	<0,20
Hg	0,01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Mo	0,5	0,62	1,27	1,02	0,19
Ni	0,4	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Pb	0,5	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Sb	0,06	0,012	0,033	0,079	<0,005
Se	0,1	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Zn	4	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Fluorures	10	7,64	9,52	8,46	5,88
Chlorures	800	16500	9350	5970	4360
Sulfates	1000	3790	1980	5600	5370
Fraction soluble	4000	39300	21200	23400	16900

Questi risultati non permettono di validare l'accettabilità ambientale dei quattro sedimenti studiati. Infatti, ciascun sedimento presenta almeno un superamento delle soglie elencate nella tabella 4.

La frazione lisciviabile dei quattro sedimenti studiati è confrontata con i valori limite da non superare per un potenziale reimpiego nelle tecniche stradali, riportati nella seguente tabella.

Tabella 5 - Frazione solubile dei quattro sedimenti e valori limite da non superare per un potenziale utilizzo nelle tecniche stradali

Paramètre	Quantité relarguée à L/S=10 (mg/kg MS)	Centuri (mg/kg MS)	Toulon (mg/kg MS)	Cagliari (mg/kg MS)	Livourne (mg/kg MS)
As	2	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Ba	100	<0,10	<0,10	0,44	0,29
Cd	1	<0,002	<0,002	0,003	<0,002
Cr total	10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Cu	50	0,25	<0,20	0,52	<0,20
Hg	0,2	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Mo	10	0,62	1,27	1,02	0,19
Ni	10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Pb	10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Sb	0,7	0,012	0,033	0,079	<0,005
Se	0,5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Zn	50	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Fluorures	150	7,64	9,52	8,46	5,88
Chlorures(*)	15000	16500	9350	5970	4360
Sulfates(*)	20000	3790	1980	5600	5370
Fraction soluble(*)	60000	39300	21200	23400	16900

(*) Per quanto riguarda i cloruri, i solfati e la frazione solubile, ai fini del giudizio di conformità del sedimento, questo deve rispettare i valori associati ai cloruri e ai solfati oppure quelli associati alla frazione solubile.

I risultati mostrano che, con riserva di verifica della loro variabilità, i sedimenti studiati possono candidarsi al reimpiego nelle tecniche stradali, ma è necessario prevedere la realizzazione di una caratterizzazione ambientale di secondo o terzo livello.

2.1.3. Caratterizzazione ambientale di secondo livello

La norma NF EN/TS 14405 rappresenta il protocollo di riferimento impiegato in Francia per la caratterizzazione ambientale di secondo livello dei materiali alternativi utilizzati nelle tecniche stradali (guida SETRA 2011).

Il saggio di percolazione in colonna EN TS 14405 è stato effettuato su ciascuno dei quattro sedimenti. I risultati sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 6 - Caratterizzazione del comportamento alla percolazione dei quattro sedimenti e valori limite per determinati utilizzi nelle tecniche stradali

Paramètre	Quantité relarguée à L/S=10 (mg/kg MS) – (essai de percolation NF EN/TS 14405)					
	Scénario « Sous-couche de chaussée ou d'accotement revêtu »	Scénario « Remblai technique ou accotement recouverts »	Centuri (mg/kg MS)	Toulon (mg/kg MS)	Cagliari (mg/kg MS)	Livourne (mg/kg MS)
As	0,8	0,5	0,041	0,024	0,033	0,008
Ba	56	28	0,162	0,114	0,209	0,119
Cd	0,32	0,16	0,002	0,004	0,015	0,001
Cr total	4	2	0,007	0,004	0,003	0,003
Cu	50	50	0,039	0,045	0,068	0,030
Hg	0,08	0,04	0,001	0,001	0,001	0,013
Mo	5,6	2,8	0,81	1,45	2,38	0,16
Ni	1,6	0,8	0,054	0,023	0,052	0,014
Pb	0,8	0,5	0,012	0,005	0,004	0,003
Sb	0,4	0,2	0,012	0,028	0,148	0,005
Se	0,5	0,4	0,005	0,016	0,004	0,006
Zn	50	50	0,145	0,155	0,452	0,025
Fluorures	60	30	16,5	6,24	16,6	5,83
Chlorures	10 000	5 000	13 124	33 839	7 754	4 250
Sulfates	10 000	5 000	5 259	9 313	17 230	6 563

Questi risultati, confrontati con le soglie di accettabilità per l'uso nelle tecniche stradali dimostrano che:

- Nessuno dei sedimenti, allo stato attuale, può essere reimpiegato in terrapieni ricoperti soltanto dal uno strato di 30 cm di materiali naturali (di cui terra vegetale), per via del superamento dei valori limite di emissione nell'acqua di cloruri e solfati
- Soltanto il sedimento di Livorno presenterebbe delle caratteristiche di comportamento alla percolazione conformi alle condizioni richieste il secondo livello di caratterizzazione ambientale della guida SETRA, per un reimpiego in substrato di carreggiata o di corsia d'emergenza rivestita da uno strato superficiale considerato poco permeabile.

La guida SETRA lascia comunque la possibilità di giustificare l'accettabilità dei sedimenti nelle tecniche stradali con uno studio specifico che richiede la realizzazione di lisimetri o di piattaforme di prova. Tali prove in lisimetro sono state effettuate sui quattro sedimenti e sono presentate nel capitolo 5 del presente documento.

2.2. CARATTERIZZAZIONE DEI SEDIMENTI SECONDO LA PROCEDURA ITALIANA

2.2.1. Valutazione ecotossicologica dei sedimenti prelevati nelle vasche di stoccaggio dei porti di Cagliari e Livorno

Al momento della valutazione della tossicità di un sedimento e dei contaminanti ad esso associati vengono solitamente prese in considerazione le seguenti matrici: il sedimento in quanto tale, l'acqua interstiziale e l'eluito.

Sebbene i sedimenti in quanto tali rappresentino lo scenario d'esposizione più realista, la realizzazione dei saggi biologici su questa matrice può richiedere un consistente investimento in termini di risorse umane, di materiale e di tempo. Contrariamente al sedimento di per sé, l'acqua interstiziale è una matrice che può rappresentare una via d'esposizione diretta per numerose specie. Tuttavia non sempre e per tutti i tipi di sedimento (principalmente per i campioni sabbiosi) è possibile estrarre una quantità di acqua interstiziale utile per eseguire una batteria di saggi e la metodologia d'estrazione può provocare alterazioni fisico-chimiche (in particolare del pH e potenziale ossidoriduzione) della matrice stessa che possono compromettere la reale biodisponibilità dei contaminanti presenti.

Tra le matrici, l'eluito rappresenta quella più facilmente estraibile dal sedimento e trova un'ampia applicazione in una vasta gamma di saggi biologici con specie appartenenti a diversi livelli trofici. Per questo motivo è molto utilizzata per effettuare alcuni esami preliminari rapidi e/o di routine, in particolare quando non è possibile utilizzare certi parametri sul sedimento tal quale.

I saggi effettuati sugli elutriati (o eluiti) simulano l'esposizione a sedimenti rimessi in sospensione, miscelando il sedimento con dell'acqua di mare, e sono destinati a fornire indicazioni inerenti il rigetto dei contaminanti nella colonna d'acqua in seguito al versamento dei sedimenti in mare, il rigetto dei sedimenti in mare e la risospensione dei sedimenti in ambienti contaminati, come le vasche di colmata (CDF), e la risospensione dei sedimenti nelle zone dragate.

Per la valutazione della tossicità potenziale dei materiali prelevati nelle vasche di colmata di Livorno e Cagliari, è stata utilizzata una batteria di saggi composta da: il batterio *Vibrio fischeri* (test in fase solida), l'alga *Phaeodactylum tricornutum*, l'echinoderma *Paracentrotus lividus* e, al fine di valutare il potenziale riutilizzo a terra dei sedimenti prelevati, l'ostracoda *Heterocypris incongruens*. Dopo il lavaggio, le diverse frazioni granulometriche dei sedimenti ottenuti sono state testate nuovamente con *H. incongruens* per valutarne la tossicità residua dopo il trattamento.

➤ **Preparazione delle matrici da testare**

L'elutriato (o eluito) è la matrice acquosa nella quale si trova la porzione solubile delle sostanze estraibili dal sedimento (ASTM 1994) e costituisce la simulazione più vicina alle movimentazioni dei fondali e ai dragaggi (USEPA/USACE, 1991; Onorati et Volpi Ghirardini, 2001), attività recentemente standardizzata in Italia nel quadro dell'Allegato tecnico del D.M. 173/2016.

Nella letteratura esistono diversi metodi di preparazione degli elutriati (USEPA/USACE, 1991 ; USEPA, 2001) a seconda della natura dell'ambiente (Volpi Ghirardini et al., 2005 ; Arizzi Novelli et al., 2006, 2007) e dello scopo dell'utilizzo (USACE, 2003; allegato tecnico del D.M. 173/2016).

Nel presente studio gli eluiti sono stati preparati secondo il metodo indicato nel protocollo ASTM E1367- 03(2014) combinando quattro volumi d'acqua di mare filtrata (o acqua di mare artificiale) con una porzione di sedimento (in peso secco). La sospensione così ottenuta è stata agitata per 1 ora a 400 giri/minuto; la fase liquida è stata in seguito raccolta e centrifugata a 4 °C per 20 minuti a 1200 x g.

➤ **Saggio biologico con *Vibrio fischeri***

Vibrio fischeri è un batterio marino gram-negativo ed eterotrofo appartenente alla famiglia delle Vibrionaceae. È cosmopolita, benché maggiormente diffuso nelle zone temperate e subtropicali.

Il sistema Microtox® è un test biologico di tossicità acuta basato sull'utilizzo della bioluminescenza naturale di questa specie. Poiché l'emissione di luce da parte di *V. fischeri* diminuisce in presenza di contaminanti, la misura dell'eventuale inibizione della bioluminescenza, a seguito dell'esposizione del batterio a una sostanza nota o a un campione ambientale di acqua o sedimento, consente di valutare il grado di tossicità della sostanza o della matrice testata.

Il sistema di misura è abbastanza versatile, in quanto applicabile alle matrici naturali, in particolare a quelle marine, liquide (acqua interstiziale, elutriato, etc.) e solide (fanghi, sedimenti), ma anche alle soluzioni acquose di sostanze tossiche pure sia organiche, sia inorganiche.

La fase solida è stata preparata semplicemente mediante centrifuga refrigerata (3500 giri/minuto a 4°C per 30') eliminando in seguito l'acqua interstiziale sovrantante.

Protocolli di riferimento e procedura adottata :

L'emissione della bioluminescenza è stata misurata all'interno del luminometro 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 conformi al protocollo ISO 11348. Per i campioni di sedimenti centrifugati è stato applicato il protocollo Solid Phase Test (SPT) con la procedura Large Sample Method (Azur Environmental, 1995), 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 e una seconda fase di ulteriori 10 minuti in cui la risospensione batterica viene incubata nel luminometro.

La relazione dose-risposta, ovvero tra concentrazione del campione e inibizione della bioluminescenza, è stata elaborata mediante un software dedicato (Microtox Omni™ v. 1.16), che consente di individuare l'EC50.

Il valore EC50 ottenuto è stato elaborato in seguito, espresso talvolta come TU (Toxic Units = 100/EC50), allo scopo di ottenere una relazione diretta tra la tossicità e la riduzione della bioluminescenza, o come Sediment Toxicity Index (S.T.I.), che consente di esprimere la tossicità acuta reale del campione rispetto alla tossicità "naturale" di un campione di riferimento con le stesse caratteristiche granulometriche (Onorati et al.,1999). Per esprimere il risultato del test sulla scala S.T.I., dato che il test in fase solida è di fatto applicato sulla frazione granulometrica < 1 mm e che la componente ambientale della tossicità si basa sulla frazione fine (pelitica), è stata eseguita anche l'analisi granulometrica, allo scopo di identificare la proporzione tra le due frazioni, il che risulta essere essenziale per la valutazione del reale livello di tossicità acuta. I metodi utilizzati per identificare le suddette frazioni granulometriche sono suddivisi in tre tappe :

1. Trattamento del campione con una soluzione di H2O2 per facilitare la separazione e la disintegrazione del sedimento
2. Setacciamento sotto un getto d'acqua distillata con il vaglio ASTM 63 µm e 1 mm
3. Recupero delle frazioni ottenute ed essiccazione in forno, eliminando la frazione > 1 mm.

La matrice solida (centrifugata) è stata giudicata tossica poiché il valore S.T.I. era superiore a 1. La scala adottata per la quantificazione della tossicità è data nella tabella 4 (ICRAM-APAT, 2007).

Tabella 7 - Scala di tossicità acuta utilizzata nel saggio biologico con *V. fischeri*

Matrice	Toxicité absente/négligeable	Toxicité présente	Toxicité haute	Toxicité très élevée
Phase solide	S.T.I. ≤ 3	3 < S.T.I. ≤ 6	6 < S.T.I. ≤ 12	S.T.I. > 12

➤ **Saggio biologico con *Paracentrotus lividus***

L'attendibilità del riccio di mare come bioindicatore è riconosciuta in tutto il mondo e, a partire dagli anni Ottanta, i saggi di fecondazione e sviluppo embrionale sono inclusi nella lista ICES (1997) dei test biologici più attendibili per il monitoraggio dell'inquinamento marino.

Alcune procedure standard per i saggi di fecondazione e sviluppo embrionale sono state messe a punto per le specie della costa orientale (*Arbacia punctulata*, *Strongylocentrotus droebachiensis*) e di quella occidentale (*Strongylocentrotus purpuratus*, *Strongylocentrotus droebachiensis*, *Dendraster excentricus*) degli Stati Uniti (USEPA, 1994; ASTM, 1995) e del Canada (Environnement Canada, 1992). In Italia, la specie autoctona *Paracentrotus lividus*, ha trovato larga applicazione in campo ecotossicologico, in particolare nello studio degli effetti di sostanze pure e di effluenti sulla fecondazione e lo sviluppo embrionale (difetti nello sviluppo e aberrazioni cromosomiche). Il saggio biologico con *P. lividus* può essere utilizzato allo stesso tempo per stimare la tossicità delle sostanze o delle preparazioni solubili nell'acqua di mare e per valutare la qualità delle matrici saline dell'ambiente marino, come l'acqua interstiziale e l'elutriato.

Procedura da seguire per l'esecuzione del test di embriotossicità :

L'obiettivo del saggio biologico di sviluppo embrionale del riccio di mare è lo sviluppo della larva di *P. lividus* fino allo stadio di pluteo a 4 braccia (P4). Il test con *P. lividus* è stato effettuato nel rispetto delle metodologie descritte nel quaderno di ecotossicologia dell'ISPRA n. 11/2017 (ISPRA, Quaderni - Ricerca Marina n° 11/2017) riportate in breve qui di seguito.

Gli organismi utilizzati per questo lavoro sono stati prelevati nell'impianto di stabulazione a circuito chiuso (RAS) dei laboratori dell'ISPRA di Livorno, nel quale gli organismi sono stati allevati e mantenuti in condizioni di maturità sessuale attraverso un regime alimentare ad hoc.

Una volta recuperati dai bacini di riproduzione, gli organismi sono stati portati a rilasciare i gameti mediante iniezione attraverso la membrana peristomale di 0,5 ml di KCl 0,5 M con una siringa per insulina.

Le uova sono state recuperate in beakers di vetro da 100 ml riempiti con acqua di mare, posizionando la femmina con il poro genitale rivolto verso l'acqua (Fig. 1A).

Lo sperma è stato recuperato "a secco" direttamente dai gonopori dell'animale (Fig. 1B) mediante aspirazione con una pipetta Pasteur di vetro e conservato a 4 °C in un tubo da 1,5 ml (tipo Eppendorf®).

Figura 1 - Recupero dei gameti di *P. lividus*: emissione di ovuli (a) e di spermatozoi (b)



Le uova sono state preliminarmente osservate al microscopio per valutarne la qualità (obiettivi 4x e 10x), quelle vacuolate, irregolari o piccole sono state scartate.

Le uova risultate idonee sono state invece trasferite in un beaker di vetro da 500 ml contenente acqua di mare filtrata (FSW) mediante pipette Pasteur di plastica. La sospensione di uova è stata diluita fino al raggiungimento di una densità di 1.000 uova/ml e poi fertilizzata con l'aggiunta di alcuni μ l di sperma. Trascorsi 20 minuti si è verificato che tutte le uova fossero state effettivamente fecondate. Il test di embriotossicità è stato realizzato esponendo 1 ml di diluzione di uova fecondate per 72 ore in 10 ml dell'elutriato da testare. L'elutriato è stato testato tal quale (100%) e diluito con dell'acqua di mare filtrata fino a 0,45 μ m a delle concentrazioni finali pari al 25% e 50%.

Parallelamente, allo scopo di valutare la sensibilità dei gameti, sono stati realizzati un controllo negativo e uno positivo. Il primo consiste nell'esposizione delle uova fecondate a dell'acqua di mare filtrata (FSW) a 0,45 μ m, il secondo nell'esposizione alla sostanza tossica di riferimento, il nitrato di rame ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \times 3\text{H}_2\text{O}$).

In condizioni normali gli zigoti si sviluppano e raggiungono lo stadio larvale in 48 h; tuttavia il periodo di esposizione di 72 h scelto per il test garantisce il raggiungimento dello stadio di pluteo da parte di tutti gli zigoti presenti nel controllo negativo. Il test viene concluso fissando il campione con alcune gocce di Lugol forte. Al termine del test si è stabilita la percentuale di larve che si sono sviluppate normalmente.

Per ottenere una stima più accurata degli effetti embriotossici sono state identificate diverse categorie di anomalie dello sviluppo distinguendo tra plutei malformati, cioè larve sviluppate ma che presentano malformazioni scheletriche e/o dell'apparato digerente, e fasi pre-larvali di blastula, gastrula, prisma e pluteo precoce, bloccate prima del raggiungimento del completo sviluppo.

Le percentuali di embrioni malformati identificate nei campioni degli elutriati testati e nei controlli positivi sono state utilizzate per il calcolo della EC20 e della EC50, rispettivamente per il Tox Calc 5.0 (analisi Probit) e il Trimmed Spearman-Karber (Hamilton et al.,1978). La scala adottata per la quantificazione della tossicità è data nella tabella XX (ICRAM-APAT, 2007).

Tabella 8 - Scala di tossicità del saggio con *P. lividus*.

CE20/CE50	Toxicité
CE20 ≥ 90%	Absents/ Négligeable
CE20 < 90% e CE50 > 100%	Moyenne
40% ≤ CE50 ≤ 100%	Haute
CE50 < 40%	Très élevée

➤ **Saggio biologico con *Phaeodactylum tricornutum***

I primi metodi internazionali di riferimento per l'utilizzo di alghe monocellulari nei test di inibizione della crescita algale, ai fini dello studio della contaminazione delle acque marine e costiere, risalgono agli anni Settanta (IRSA 1978). La metodologia per l'esecuzione del saggio algale con organismi marini è stata recentemente aggiornata con la norma UNI EN ISO 10253 (2006), la quale prevede l'utilizzo di *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin e *Skeletonema costatum*. Secondo tale protocollo, le due alghe possono essere utilizzate per saggi con elutriati o estratti di sedimenti interi, oltre che con acqua sovrantante o interstiziale.

I test sulle microalghe sono tra quelli più comunemente utilizzati per via della loro facilità e dell'economicità della loro cura in laboratorio, nonché della loro rapida reazione alla qualità dell'ambiente (Kraynukova 1988 ; Lewis 1995).

Phaeodactylum tricornutum è una diatomea appartenente alla famiglia delle Bacillariophyceae, ampiamente diffusa negli estuari e nelle aree costiere. Il suo utilizzo nell'ambito dell'ecotossicologia per la valutazione delle acque, dei sedimenti e delle acque reflue industriali è stato riportato da diversi autori (dos Santos et al. 2002 ; Nash et al. 2005 ; Zhuravel et al. 2009 ; Morreno Garrido et al. 2007 ; Morelli et al. 2009 ; Okay et al. 1994).

I principali indici presi in considerazione da questi documenti sono la densità cellulare (Okay et al. 1994 ; Morreno Garrido et al. 2002 ; Morreno-Garrido et al. 2007 ; Zhuravel et al. 2009), ma anche le risposte fisiologiche e biochimiche, come il contenuto di clorofilla e le dimensioni delle cellule (Zhuravel et al. 2009), la concentrazione di fitochelatine e di peptidi intracellulari correlati all'assorbimento dei metalli (Morelli et al. 2009) e la fluorescenza ritardata (Nash et al. 2005).

La valutazione del tasso di crescita è una procedura facile da realizzare e sensibile: l'aumento o la riduzione della crescita delle cellule di microalghe rispetto al controllo può essere dovuta alla contaminazione delle matrici acquose (Khristoforova et al. 2001 ; Aizdaicher et al. 1999).

Caratteristiche generali del test :

Il principio del test è quello di esporre una coltura di alghe pure, in fase di crescita esponenziale da diverse generazioni, a determinate concentrazioni di campioni, in condizioni fisico-chimiche standardizzate e con un apporto nutritivo definito ed omogeneo. Al termine del periodo di incubazione, la crescita delle alghe nel campione è confrontata a quella del controllo.

Il test biologico è stato realizzato secondo i protocolli ISO 10253 (2016) e ARPAT (1998; Draft, 2003), con alcune modifiche specifiche.

Cura della coltura dell'alga madre e fasi di preparazione :

Le colture di cellule madri sono state mantenute in un ambiente di crescita appropriato a una salinità di 35 ± 3 g/Kg, periodicamente rinfrescata per mantenere la crescita esponenziale. A partire dalla coltura madre, tra i 2 e i 4 giorni antecedenti all'inizio del test è stata preparata una "precoltura" con una densità cellulare compresa tra 2×10^3 e 10^4 cellule/ml, che è stata incubata nelle stesse condizioni.

La densità cellulare ottenuta dalla precoltura è stata in seguito valutata, immediatamente prima di essere utilizzata per la preparazione della coltura dell'inoculo a una densità cellulare definita.

Metodologia di esecuzione dei test :

Un'aliquota della coltura dell'inoculo è stata aggiunta alla soluzione di prova e a una quantità appropriata di ambiente di coltura concentrato. La soluzione così ottenuta, con una densità cellulare compresa tra 8×10^3 e $1,2 \times 10^4$ cellule/ml, è stata poi distribuita in triplice esemplare in piastre sterili usa e getta dotate di 24 pozzetti (ARPAT IRSA-CNR, 2003 ; ISO 10253:2016) e collocata per 72 h in una camera termostatica a $20 \pm 2^\circ\text{C}$, a regime costante di luce bianca fredda di intensità compresa tra 7000 e 8000 lux.

Dell'acqua di mare filtrata e sterilizzata con un flusso di salinità del 30‰, con l'aggiunta della stessa quantità di ambiente di coltura e d'inoculo di quella utilizzata per i campioni, è stata considerata come controllo negativo. Allo stesso tempo, è stato effettuato anche un controllo positivo, utilizzando il bicromato di potassio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) come composto tossico di riferimento per controllare la procedura e la sensibilità del test.

Al termine del periodo di incubazione prestabilito, è stata determinata la densità delle alghe di ciascuna replica, in seguito alla risospensione della soluzione contenuta in ciascun pozzetto.

Tutte le valutazioni della densità algale sono state effettuate mediante la conta al microscopio invertito delle cellule Thoma.

Analisi dei risultati :

Le densità cellulari registrate al termine del saggio sono state confrontate con quella iniziale e si è stabilito :

Fattore di crescita (FC) = C_f/C_i

Tasso di crescita (TC) = $(\ln C_f - \ln C_i)/3$

Coefficiente di variazione (CV) = deviazione standard dei valori del tasso di crescita delle repliche uniche/media dei tassi di crescita delle repliche * 100

con:

C_f = concentrazione finale (cellule/ml)

C_i = concentrazione iniziale (cellule/ml)

Affinché il test sia considerato valido, il controllo negativo (SW) deve rispondere ai seguenti criteri di validazione : $FC \geq 16$; $TC \geq 0,9 \text{ d}^{-1}$; $CV \leq 5 \%$.

Un altro criterio di validazione del saggio è stato la determinazione del valore della EC50 registrata con il bicromato di potassio (K₂Cr₂O₇), successivamente confrontato con la gamma di riferimento del protocollo ISO 10253 (2016) (CE50 K₂Cr₂O₇ = 14,8 - 25,4 mg/L, n = 7).

Il tasso d'inibizione (I) è stato calcolato per ciascun campione testato :

$$I = (TC \text{ Campione X} - TC \text{ Controllo}) / TC \text{ Controllo} * 100$$

Per il giudizio di tossicità è stata utilizzata la scala di valutazione presentata nella Tabella 9, che si basa sulla percentuale d'inibizione riscontrata al momento del saggio sull'elutriato al 100%.

Tabella 9 - Scala di tossicità acuta utilizzata nel saggio biologico con *Phaeodactylum tricornutum*

Valore di Inibizione	Évaluation de la toxicité
$I \leq -50\%$	Biostimulation
$-50\% < I < 20\%$	Absente / négligeable
$20\% \leq I \leq 50\%$	Modérée
$50\% \leq I \leq 80\%$	Haute
$80\% < I \leq 100\%$	Très élevée

➤ **Test di tossicità con l'ostracoda *Heterocypris incongruens***

Gli ostracodi sono organismi bentici che si trovano prevalentemente all'interfaccia tra l'acqua e il sedimento e sono particolarmente sensibili alla tossicità emessa dal substrato, poiché si nutrono di particelle solide. La specie *Heterocypris incongruens* è considerata particolarmente adatta per i test di tossicità del suolo poiché è sensibile ai contaminanti sia organici che inorganici. Il test con *H. incongruens* su matrice solida dura 6 giorni e valuta due parametri diversi: la mortalità (effetto acuto) e l'inibizione della crescita (effetto cronico) rispetto a un controllo. Il test è stato eseguito su neonati ottenuti dalla schiusa di uova durature (cisti), conservati al buio a una temperatura di 4 °C.

Per il controllo è stato utilizzato il terreno artificiale definito dall'OCSE (1984). Prima del saggio, le cisti di *H. incongruens* sono state schiuse all'interno di una piastra di Petri (\varnothing 5 cm) con 10 ml di acqua dolce standard (SF) per 52 h sotto una luce costante 39 (3000 - 4000 lux) a una temperatura di 25 ± 2 °C. La composizione dell'acqua dolce standard è la seguente :

- MgSO_4 60 mg l⁻¹
- NaHCO_3 96 mg l⁻¹
- KCl 4 mg l⁻¹
- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 60 mg l⁻¹

La SF deve essere conservata al buio a 4°C e deve essere aerata e portata a temperatura ambiente prima dell'utilizzo. A 48 h dall'inizio della schiusa delle cisti, è stato effettuato un prearico con delle alghe *Spirulina* sp. e l'incubazione è continuata per ulteriori 4 ore. Il saggio è stato realizzato su una piastra a sei pozzetti (\varnothing 4 cm) con organismi neonati di una lunghezza iniziale compresa tra 200 e 250 μ . La procedura (Chial e Persoone, 2003 mod.) prevedeva l'aggiunta, in ogni pozzetto, di una quantità di terra fresca equivalente a 400 mg di terra secca, 4 ml d'acqua dolce standard e una sospensione di alghe di una popolazione di *S. capricornutum* con una concentrazione finale di 1,5.10⁷ cellule.ml⁻¹. La sospensione è stata agitata e decantata per 20 minuti. 10 ostracodi sono stati trasferiti in ciascun pozzetto, le piastre sono state chiuse con parafilm e un coperchio e incubate al buio a 25 ± 2 °C per 6 giorni. Al termine del test, gli organismi sopravvissuti sono stati trasferiti su una piastra dotata di diversi pozzetti per il conteggio e la misura della lunghezza dei corpi. Le misure allo stereomicroscopio (Zeiss Stemi 2000-C) sono state effettuate con l'ausilio di una scala graduata di 50 μ m in seguito all'immobilizzazione degli ostracodi con una goccia di soluzione fissante (Lugol). I risultati sono stati espressi in percentuale di mortalità (effetto acuto) e di inibizione (effetto cronico) rispetto al controllo.

La scala adottata per la classificazione ecotossicologica è la seguente :

Tabella 10 - Scala di tossicità per il saggio di 6 giorni con *H. incongruens*

Mortalité corrigée avec Abbott	Toxicité
$M \leq 15\%$	ABSENTE / NÉGLIGEABLE
$15\% < M \leq 30\%$	MOYENNE
$30\% < M \leq 60\%$	HAUTE
$M > 60\%$	TRÈS ÉLEVÉE

2.2.2. Risultati

➤ Risultati del test con *P. tricornutum*

I parametri di validazione del test con *P. Tricornutum*, effettuato al termine del periodo d'incubazione (72h), hanno soddisfatto i criteri di accettabilità del test e il valore EC50, calcolato con il tossico di riferimento $K_2Cr_2O_7$ rientrava nell'intervallo stabilito dal protocollo ISO 10253 (2006) (Tabella 11).

Tabella 11 - Parametri di validazione del test

Paramètres de validation du test	Paramètre	Résultat requis	Résultat constaté
Contrôle négatif (SW)	FC (facteur de croissance après 72h)	> 16	79,35
	TC (taux de croissance après 72h) (d-1)	> 0,9	1,46
	CV (Coefficient de variation) (%)	< 5	0,59
$K_2Cr_2O_7$	CE50 (mg/L) 72h	14,8 – 25,4 mg/L	19,78 (17,19 - 22,37)

La tabella 12 indica i valori di concentrazione delle alghe (cellule/ml) e di inibizione della crescita (%) ottenuti dal controllo di acqua di mare filtrata (FSW) per ciascun campione testato.

Tabella 12 - Risultati dei saggi con *P. tricornutum* basati sui valori percentuali di inibizione della crescita algale (I) a 72 ore.

	Conc. algale 72h (cells/mL)		Inhibition de la croissance (%)		verdict de Toxicité
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	
FSW	829167	21311	0,00	0,59	-
Cagliari TQ	949583	61794	-3,58	1,73	Absent / négligeable
Livorno TQ	1048750	38689	-6,26	1,00	Absent / négligeable

I valori percentuali d'inibizione (I) erano compresi tra -50% e 20%, il che corrisponde, secondo la tabella di riferimento, a un effetto assente o trascurabile.

➤ **Risultati del test con P. lividus**

I parametri di validazione e i risultati del saggio per insilamento di embrioni realizzato con P. lividus sono presentati qui di seguito (Tabella 13 e 14).

Tabella 13 - Parametri di validazione dei test con P. lividus

Paramètres de validation du test	Paramètre	Résultat requis	Résultat obtenu
Contrôle négatif (FSW)	% plutei (P4) normoformé	> 80 %	89%
Contrôle positif Cu(NO ₃) ₂ *3H ₂ O	CE ₅₀ (µg L ⁻¹)	22,60 - 68,34	29,13 (26.57- 31.28)

Tabella 14 - Risultati del test di embriotossicità con P. lividus. La tabella indica la media (\bar{x}) dei plutei malformati, la deviazione standard (σ) e il valore della EC20/EC50 stabilito dall'analisi Probit

Échantillon	Dilution	P4 Normoformés (répliques)	Moyenne Malformés (\bar{x})	σ	CE20/CE50	Jugement Toxicité
Controllo	-	87 91 89	11,00	2,00	-	-
Cagliari TQ	100	32 30 35	67,67	2,52	CE50 = 71,98 (60.30 - 85.49)	Toxicité élevée
	50	59 62 60	39,67	1,53		
	25	83 85 85	15,67	1,15		
Livorno TQ	100	60 58 63	60,33	2,52	CE20= 45,32 (39,31- 51,63); CE50>100	Toxicité élevée
	50	62 63 6	64,33	3,21		
	25	80 78 7	78,00	2,00		

I risultati dell'analisi con *P. lividus* hanno mostrato una tossicità elevata per entrambi i campioni testati.

➤ **Risultati del test con *V. fischeri***

I risultati dei test effettuati in fase solida con *V. fischeri* sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 15 - Risultati del test con il batterio bioluminescente *V. fischeri*

Échantillon	Sable <1mm (%)	Fines (%)	Seuil de toxicité Naturelle (TU)	Tox Mesurée (TU)	Intervalle de confiance à 95%. (TU)	R2 (%)	S.T.I.	Jugement Toxicité
Cagliari TQ	75,11	24,89	103	21,128	17,630 - 25,314	98,90	0,20	Absente / négligeable
Livorno TQ	52,20	47,80	175	272,595	184,629 - 402,397	96,01	1,56	Absente / négligeable

I risultati del saggio mostrano che non è stata riscontrata alcuna tossicità per i campioni testati.

➤ **Risultati del test con *H. incongruens***

La tabella qui sotto illustra i risultati ottenuti sul sedimento tal quale (TQ) e sulle diverse frazioni granulometriche ottenute in seguito al trattamento di soil washing.

Tabella 16 - Risultati del saggio con *H. incongruens*

Échantillon	Mortalité (%)	σ	Jugement Toxicité
Témoin Cagliari	5	0,55	-
Cagliari TQ	3,33	0,82	Absente / négligeable
Cagliari SG	13,33	1,21	Absente / négligeable
Cagliari SF	11,67	1,47	Absente / négligeable
Cagliari PE	20,00	1,90	Moyenne
Témoin Livorno	5	0,84	-
Livorno TQ	26,67	2,07	Moyenne
Livorno SG	11,67	1,60	Absente / négligeable
Livorno SF	18,33	1,33	Absente / négligeable
Livorno PE	45,00	2,81	Haute

I risultati ottenuti mostrano una lieve criticità per la frazione fine del sedimento di Cagliari. Tale risultato è probabilmente dovuto alla concentrazione di contaminanti (organici e inorganici) nella frazione fine dopo il soil washing, come già evidenziato nell' "ELABORATO T2.3.3: TRATTAMENTO DI SEPARAZIONE GRANULOMETRICA DEI SEDIMENTI E SOIL WASHING".

2.2.3. Discussione

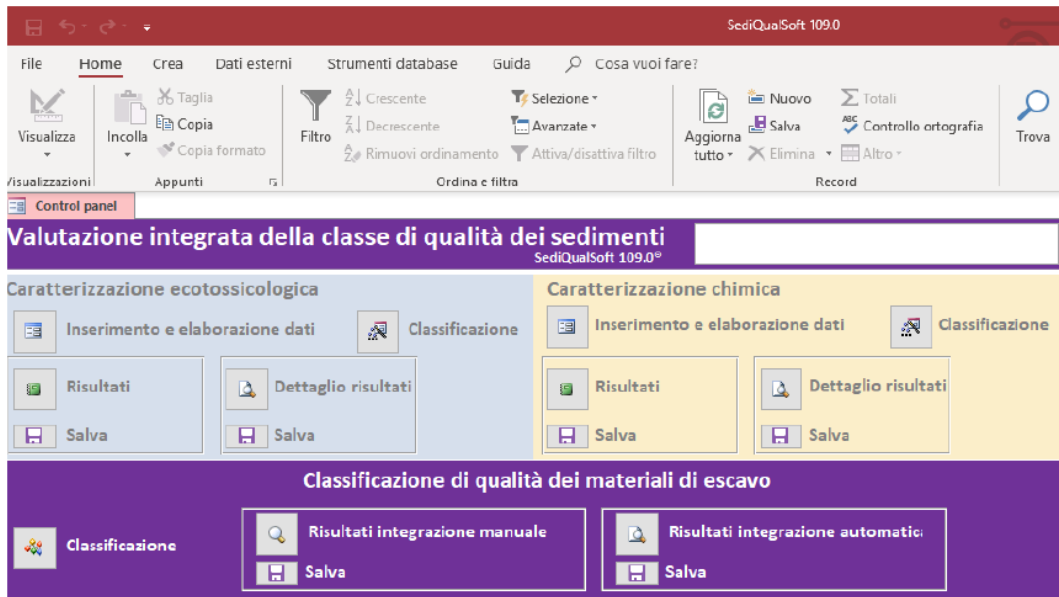
I sedimenti di Cagliari presentano una contaminazione prevalentemente legata alla presenza di Pb, Cd, Zn e idrocarburi C_{>12}. Se per le specie testate *V. fischeri*, *P. tricornutum* e *H. incongruens*, la contaminazione iniziale non provoca effetti tossici, il test di embriotossicità con *P. lividus* ha rivelato un tasso di tossicità elevato. Questo risulta plausibile, se si tiene conto della grande sensibilità delle larve di questa specie ai contaminanti, sia organici, sia inorganici, come evidenziano diversi studi scientifici nella letteratura (ICES1997; Arizzi Novelli et al, 2002, 2003a,b; Russo et al, 2003; Losso et al, 2004; Angelini et al, 2005, Schröder et al, 2005; Gaion et al, 2013; Sartori et al, 2016; Pagano et al, 2017).

I sedimenti prelevati nella vasca di contenimento di Livorno sono lievemente contaminati da composti organostannici, Ni e Zn, e le concentrazioni di idrocarburi superano il valore L2 stabilito dal D.M. N° 173/2016. Come nel saggio con il riccio di mare *P. lividus*, il test effettuato sul sedimento con l'ostracoda *H. incongruens* ha rivelato una tossicità moderata del sedimento tal quale (TQ). Altrettanto significativa è la tossicità rivelata dal test nella frazione fine ottenuta in seguito al soil washing, nella quale i contaminanti inorganici (Ni, Cu, Zn) e organici (organostannici e idrocarburi) superano ampiamente i livelli di concentrazione L2 indicati nel D.M. N° 173/2016 (si veda "ELABORATO T2.3.3 : TRATTAMENTO DI SEPARAZIONE GRANULOMETRICA DEI SEDIMENTI E SOIL WASHING").

2.2.4. Integrazione con il software Sediqualsoft®

Per l'integrazione ponderata dei dati ecotossicologici e chimici e per la classificazione della qualità dei sedimenti è stato utilizzato il software SediQualSoft 109.0®. Questo sistema, sviluppato dall'Università Politecnica delle Marche (Dipartimento di Scienze della Vita e dell'Ambiente di Ancona) in collaborazione con l'ISPRA, è stato adottato nella classificazione della qualità dei sedimenti marini e salmastri ai sensi del D.M. N° 173 del 15 luglio 2016.

Figura 2 - Schermata principale del software SediQualSoft® 109.0



Il software è organizzato in 3 moduli (Figura 2) e i dati analitici sono importati da un foglio Excel (Figura 3) e trattati mediante algoritmi e organigrammi specifici.

Figura 3 - Inserimento dei dati ecotossicologici sul software SediQualSoft® 109.0



I primi due moduli, relativi alla caratterizzazione ecotossicologica e a quella chimica, forniscono il quoziente di rischio (HQ: Hazard Quotient) che corrisponde a una classe di rischio (da "Assente" a "Molto elevato"); il terzo modulo integra i due precedenti e assegna ai sedimenti una classe qualitativa.

➤ Integrazione dei dati ecotossicologici

I criteri per l'integrazione ponderata dei risultati ecotossicologici, con lo scopo di fornire l'indice di pericolo HQb, prendono in considerazione 5 caratteristiche specifiche dei saggi biologici inclusi nella batteria dell'indagine ecotossicologica (Appendice 2B - Allegato tecnico del D.M. n. 173/2016):

- la significatività statistica della differenza di effetto tra campione e controllo
- la misura dell'effetto rispetto alla variazione minima ritenuta biologicamente significativa per ciascuna condizione sperimentale (valore di soglia definito per ciascun saggio)
- la severità dell'effetto (inteso come gravità del danno misurato dall'endpoint)
- la tipologia di esposizione (acuta o cronica)
- la rappresentatività della matrice testata.

A ciascuna caratteristica individuale vengono attribuiti dei pesi.

A seguito dell'inserimento dei dati, il software applica il criterio di integrazione ponderata ai risultati ecotossicologici (appendice 2B - Allegato tecnico del D.M. n. 173/2016) tenendo conto dei seguenti aspetti :

- ✓ verifica dell'esattezza dei dati individuali
- ✓ calcolo dell'effetto (Ei), inteso come variazione percentuale dell'endpoint, misurato e compensato tramite la correzione di Abbott, rispetto alle variazioni osservate nel controllo
- ✓ calcolo del coefficiente Z: questo parametro ha un valore pari a 1 quando il campione risulta significativamente diverso dal controllo, esso decresce con il diminuire
- ✓ della significatività. Questa correzione riduce progressivamente il peso complessivo di un saggio non statisticamente significativo
- ✓ calcolo dell'effetto corretto (Eiw): ciascun effetto Ei moltiplicato per il suo coefficiente Z, viene rapportato con la "soglia" specifica per quel saggio. L'effetto corretto (Eiw) indica di quante volte la variazione misurata in un saggio supera quella ritenuta biologicamente rilevante

- ✓ calcolo del HQb: l'indice di pericolo complessivo della batteria di saggi ecotossicologici viene calcolato come sommatoria degli effetti pesati (Eiw) dei singoli saggi, che corrisponde al prodotto dei pesi assegnati in funzione delle 5 caratteristiche riportate nella tabella qui sotto
- ✓ la normalizzazione del HQb su una scala compresa tra 0 e 10 (figura 3)

Figura 4 - Classi di pericolo ecotossicologico rispetto ai valori di HQ (Hazard Quozient) della batteria di saggi (Tabella A3 del D.M. n. 173/2016)

HQ BATTERIA DI SAGGI	CLASSE DI PERICOLO
< 1	Assente
≥1 – 1.5	Basso
≥ 1.5 – 3.0	Medio
≥ 3.0 – 6.0	Alto
≥6.0 – 10.0	Molto alto

I dati HQb definitivi normalizzati permettono di individuare le classi di pericolo per i campioni testati (indicate inoltre con diversi colori, come mostra la figura 4).

➤ Integrazione dei dati chimici

I criteri di integrazione ponderata dei dati chimici per l'individuazione dell'indice di pericolo HQc considerano la tipologia dei parametri, il numero dei contaminanti che eccedono il riferimento specifico, nonché l'entità di tali sforamenti. Tutti i parametri chimici sono inclusi in diverse liste di pericolo e di priorità, sulla base delle quali vengono ponderati, allo scopo di conferire maggiore rilevanza ai contaminanti con tossicità più elevata, maggiore tendenza al bioaccumulo e maggiore persistenza nell'ambiente. Per quanto riguarda l'integrazione ponderata dei risultati ecotossicologici, anche per il trattamento dei dati chimici, l'allegato tecnico del decreto ministeriale N° 173 del 15 luglio 2016 introduce una sequenza di calcoli da eseguire :

1. verifica dell'esattezza dei dati
2. verifica della presenza dei valori di riferimento L1 e L2 o dei valori di riferimento locali (secondo la normativa vigente nella zona d'indagine) per tutti i parametri chimici analizzati
3. calcolo della Ratio to Reference (RTR): variazione tra ciascun parametro e il proprio valore limite di riferimento

4. calcolo della RTR corretta (RTRw): ciascuna RTR è moltiplicata per il peso attribuito alla classe chimica del contaminante
5. calcolo del HQc: l'indice di pericolo quantitativo è calcolato addizionando la media dei parametri chimici con un peso <1 e la somma di quelli con un peso >1
6. normalizzazione del HQc a una classe di pericolo con scala tra 0 e 13 (Figura 5)

Figura 5 - Classi di pericolo chimico rispetto ai valori di HQc (Tabella C.2 del D.M. 173/2016)

HQc	CLASSE DI PERICOLO
0 – < 0.7	Assente
0.7 – < 1.3	Trascurabile
1.3 – < 2.6	Basso
2.6 – < 6.5	Medio
6.5 – < 13.0	Alto
≥13.0	Molto Alto

Come per la batteria di saggi ecotossicologici, i dati definitivi dell'integrazione chimica HQc normalizzati, consentono di attribuire una classe di pericolo al campione.

➤ **Attribuzione di una classe qualitativa ai materiali di escavo**

L'attribuzione di una classe qualitativa ai materiali di escavo risulta dall'integrazione della classificazione chimica ed ecotossicologica ottenuta mediante l'applicazione dei criteri d'integrazione ponderati (appendice 2C - Allegato tecnico del D.M. n. 173/2016).

Infine, l'integrazione dei due quozienti di rischio (HQb e HQc) eseguita tramite il software, consente di individuare la classe qualitativa del materiale, come riassunto nella figura 5, alla quale corrispondono i diversi utilizzi indicati nell'allegato tecnico del D.M. N° 173/2016 (figura 6).

Figura 6 - Classificazione della qualità dei sedimenti secondo i criteri di integrazione ponderata (Tabella 2.7 dell'Allegato tecnico del D.M. 173/2016)

Classe di pericolo ecotossicologico elaborato per l'intera batteria (HQ _{Batteria})	Classificazione chimica	Classe di Qualità del materiale
Assente	HQ _C (L2) ≤ Trascurabile	A
	Basso ≤ HQ _C (L2) ≤ Medio	B
	HQ _C (L2) = Alto	C
	HQ _C (L2) > Alto	D
Basso	HQ _C (L1) ≤ Basso	A
	HQ _C (L1) ≥ Medio e HQ _C (L2) ≤ Basso	B
	Medio ≤ HQ _C (L2) ≤ Alto	C
	HQ _C (L2) > Alto	D
Medio	HQ _C (L2) ≤ Basso	C
	HQ _C (L2) ≥ Medio	D
≥ Alto	HQ _C (L2) ≤ Basso	D
	HQ _C (L2) ≥ Medio	E

Figura 7 - Opzioni di gestione compatibili con la classificazione della qualità dei materiali da dragare.



2.2.5. Integrazione dei dati chimici ed ecotossicologici dei campioni di sedimenti di Cagliari e Livorno con SediQualSoft® 109.0.

L'integrazione ponderata dei dati chimici con l'ausilio di SediQualSoft® 109.0 ha rivelato, per i campioni di Cagliari, un rischio chimico elevato (HQc), prevalentemente per via delle alte concentrazioni di Pb e de TBT. Per i sedimenti prelevati a Livorno, invece, il rischio chimico associato è quasi assente (Figura 8).

Figura 8 - Resoconto dell'integrazione dei risultati della caratterizzazione chimica dei sedimenti con SediQualSoft® 109.0

Caratterizzazione chimica dei sedimenti

Ente: **ISPRA**

Latitudine:
 Longitudine:
 Area:
 Sito:
 Data:
 Cod. campionamento:
 Cod. carota:
 Livello:
 Cod. campione: **Cagliari 1**
 % Pelite: **22,41379**

Note:

Liste parametri standard non complete (Tabella 2.4, Allegato tecnico)

	L1	L2
Indice HQc	26,555	6,87
Max % contr a HQc	27,7% (TBT)	38,5% (Pb)
N° param. non conformi	7	3
N° param. con riferimento	23	18
N° param. analizzati	37	37
Classe di gravità del pericolo	MOLTO ALTO	ALTO

Caratterizzazione chimica dei sedimenti				Ente: ISPRA
Cod. Campionamento	Cod. Campione	L1	L2	Note
		ND	ND	Liste parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)
		ND	ND	Liste parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)
		ND	ND	Liste parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)
		ND	ND	Liste parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)
	Cagliari 1	MOLTO ALTO	ALTO	Liste parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)
	Livorno 1	BASSO	ASSENTE	Liste parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)
N. campioni	6			

L'integrazione ponderata dei risultati ecotossicologici con il software SediQualSoft® 109.0 non ha rivelato alcun rischio ecotossicologico (HQ batteria) per i due sedimenti analizzati (Figura 9).

Figura 9 - Resoconto dell'integrazione dei risultati della caratterizzazione ecotossicologica SediQualSoft® 109.0

Caratterizzazione ecotossicologica dei sedimenti								Ente: ISPRA	
Area	Sito	Cod. campione	Campionamento	Specie	HQ (specifico)	HQ Batteria	Classe di gravità del pericolo ecotossicologico		
		Cagliari 1				0	ASSENTE		
				Vibrio_fischeri	0				
				Paracentrotus_lividus	0				
				Phaeodactylum_tricornutum	0				
		Livorno 1				0,53	ASSENTE		
				Vibrio_fischeri	0,65				
				Paracentrotus_lividus	1,68				
				Phaeodactylum_tricornutum	0				

L'integrazione della classificazione chimica ed ecotossicologica ha condotto all'identificazione delle seguenti classi qualitative per i sedimenti di Cagliari e Livorno (Figura 9).

Figura 10 - Identificazione della classe di qualità dei sedimenti di Cagliari e Livorno con l'ausilio di SediQualSoft® 109.0

Classificazione di qualità dei materiali di escavo								Ente: ISPRA	
Cod. Campione	cod. Campionamento	Sito	Classe di pericolo ecotossicologico	Contributo % elutriato	Classe di pericolo chimico	% Pelite	Classe di qualità del materiale	Note	
Cagliari 1			ASSENTE	0	HQc(L2) = Alto	22,41379	C		
					Lista parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)				
Livorno 1			ASSENTE	72,1	HQc(L2) <= Trascurabile	38,46154	A	Pelite superiore a quanto indicato per ripascimento emerso (Allegato tecnico, Figura 7)	
					Lista parametri standard non completa (Tabella 2.4, Allegato tecnico)				
N. classificazione ecotossicologica:			2						
N. classificazione chimica:			2						
N. classe di qualità dei materiali:			2						

Sulla base della classificazione ottenuta, i sedimenti della vasca di stoccaggio di Livorno sono stati giudicati idonei (classe A) per le opzioni di ripascimento di litorali e di immersione deliberata in mare.

La classe qualitativa attribuita ai sedimenti di Cagliari, invece, è risultata la C. Per i materiali appartenenti a questa categoria, le opzioni di gestione possibili sono lo stoccaggio in ambienti chiusi, come le vasche di contenimento e l'eventuale recupero all'interno di aree portuali.

3. TRATTAMENTO DEI SEDIMENTI E FORMULAZIONE DI MATERIALI

Tra le opzioni di recupero, il Comitato di pilotaggio del programma ha voluto orientare l'utilizzo dei sedimenti o delle loro frazioni sabbiose verso l'elaborazione di materiali di uso comune nei cantieri stradali, capaci di impiegare notevoli quantità di sedimenti di dragaggio.

È stato così affidato al LERM (in subappalto dell'INSA di Lione) uno studio di formulazione, con l'obiettivo di incorporare nella formulazione di malta per il riempimento di trincee e di calcestruzzo comune, i sedimenti marini dragati, trattati o meno mediante separazione con vagli di diverse misure.

3.1. CAMPIONI TESTATI E PROGRAMMA DI SPERIMENTAZIONE

Il presente studio è stato condotto sui sedimenti di Tolone, Cagliari e Livorno. I risultati ottenuti permettono la realizzazione di una formulazione con i sedimenti di Centuri. Soltanto i sedimenti di Cagliari e Livorno sono stati sottoposti al saggio di formulazione prima e dopo il trattamento di vagliatura in laboratorio.

Le prove realizzate in laboratorio sono le seguenti:

- ✓ preparazione di due sedimenti mediante omogeneizzazione e suddivisione in quarti per ottenere 2 lotti
- ✓ eliminazione dello scarto a 4 mm, al fine di ottenere una sabbia 0/4 mm (tre sedimenti non trattati)
- ✓ trattamento di due dei tre sedimenti con eliminazione dello scarto a 2 mm e del passante a 0,063 mm al fine di ottenere una sabbia 0,063/2 mm (due sedimenti trattati)

- ✓ analisi granulometrica per vagliatura secondo la norma NF EN 933-1
- ✓ misura delle masse volumiche e del coefficiente d'assorbimento dell'acqua secondo la norma NF EN 1097-6 per i sedimenti trattati e secondo l'allegato G della stessa norma per i sedimenti non trattati (conservazione della frazione fine 0/0,063 mm)
- ✓ determinazione del contenuto di cloruri dopo l'estrazione dell'acqua secondo la norma NF EN 1744-1§ 7
- ✓ determinazione del contenuto di solfati solubili nell'acqua secondo la norma NF EN 1744-1§ 10.2
- ✓ messa a punto di formulazioni di malta per il riempimento di trincee (osservazione delle proprietà allo stato fresco e confezionamento di 4 provette cilindriche)
- ✓ messa a punto di formulazioni di calcestruzzo comune (osservazione delle proprietà allo stato fresco e confezionamento di 4 provette cilindriche)
- ✓ confezionamento di corpi di prova destinati alla caratterizzazione ambientale e meccanica
- ✓ misura della resistenza meccanica a compressione dopo 28 giorni secondo la norma NF NE 12390.-3

I campioni testati, così come i materiali e i reagenti impiegati sono raccolti nella seguente tabella :

Tabella 17 – Identificazione dei campioni testati, dei materiali e dei reagenti impiegati

Réf. LERM	Réf. INSA	Caractéristiques
43604-1A	CAGLIARI	Elimination du refus à 4 mm <i>Sédiments non traités</i>
43604-1B		Elimination du refus à 2 mm et du passant à 0,063 mm <i>Sédiments traités</i>
43604-2A	LIVORNO PUNTO 1	Elimination du refus à 4 mm <i>Sédiments non traités</i>
43604-2B		Elimination du refus à 2 mm et du passant à 0,063 mm <i>Sédiments traités</i>
43604-3	TOULON	Elimination du refus à 4 mm <i>Sédiments non traités 0,040/4 mm</i>
43604-4	-	Sable 0/4 mm SCL Alluvions du Gardon Carrière de Montfrin - GSM
43604-5	-	Gravillon 6,3/16 mm RL Alluvions du Gardon Carrière de Montfrin - GSM
43604-6	-	Ciment CEM I 52,5 N CE CP2 NF Ciments Calcia – Usine de Beaucaire
43604-7	-	CHRYSO®Fluid Optima 206 Superplastifiant Haut réducteur d'eau

Il trattamento dei campioni di sedimento sottoposti alle prove di formulazione è stato eseguito mediante separazione della frazione superiore a 2mm da quella inferiore a 0,063 µm. Queste separazioni sono state effettuate per vagliatura a secco in laboratorio.

3.2. CARATTERIZZAZIONE PRELIMINARE

3.2.1. Caratterizzazione chimica dei sedimenti

Il contenuto di cloruri è stato determinato dopo l'estrazione dell'acqua ai sensi della norma NF EN 1744-1§ 7, quello di solfati solubili dell'acqua secondo la norma NF EN 1744-1§ 10.2.

I risultati sono presentati nella Tabella 18.

Tabella 18 - Risultati delle analisi chimiche dei sedimenti

Réf. LERM	Réf. INSA	Teneur en sulfates (% massique)	Teneur en chlorures (% massique)
43604-1A	CAGLIARI <i>Sédiments non traités</i>	0,20	0,61
43604-1B	CAGLIARI <i>Sédiments traités</i>	0,18	0,01
43604-2A	LIVORNO PUNTO 1 <i>Sédiments non traités</i>	0,17	0,13
43604-2B	LIVORNO PUNTO 1 <i>Sédiments traités</i>	0,14	< 0,01
43604-3	TOULON <i>Sédiments non traités</i>	0,09	< 0,02

3.2.2. Caratterizzazione fisica dei sedimenti

Le analisi granulometriche mediante vagliatura sono state realizzate nel rispetto della norma NF EN 933-1. I risultati sono presentati nella tabella 19 e illustrati dalla figura 11.

Le misure delle masse volumiche e del coefficiente di assorbimento dell'acqua per i sedimenti trattati sono state eseguite in conformità alla norma NF EN 1097-6 e all'allegato G della stessa per i sedimenti non trattati (conservazione della frazione fine 0/0,063 mm).

I risultati sono riassunti nella tabella 20.

Tabella 19 - Risultati delle analisi granulometriche

Réf. LERM	43604-1A	43604-1B	43604-2A	43604-2B	43604-3
Réf. INSA	CAGLIARI <i>Sédiments non traités</i>	CAGLIARI <i>Sédiments traités</i>	LIVORNO PUNTO 1 <i>Sédiments non</i>	LIVORNO PUNTO 1 <i>Sédiments traités</i>	TOULON <i>Sédiments non traités</i>
Ouverture du tamis (mm)	Pourcentage de tamisats cumulés				
4	100	100	100	100	100
2	100	100	100	100	100
1	98	98	99	99	97
0,63	95	95	96	97	95
0,25	77	67	38	26	86
0,125	37	15	18	6	64
0,063	24	1	14	0	30
0,040	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré	14

Figura 11 – Risultati delle analisi granulometriche

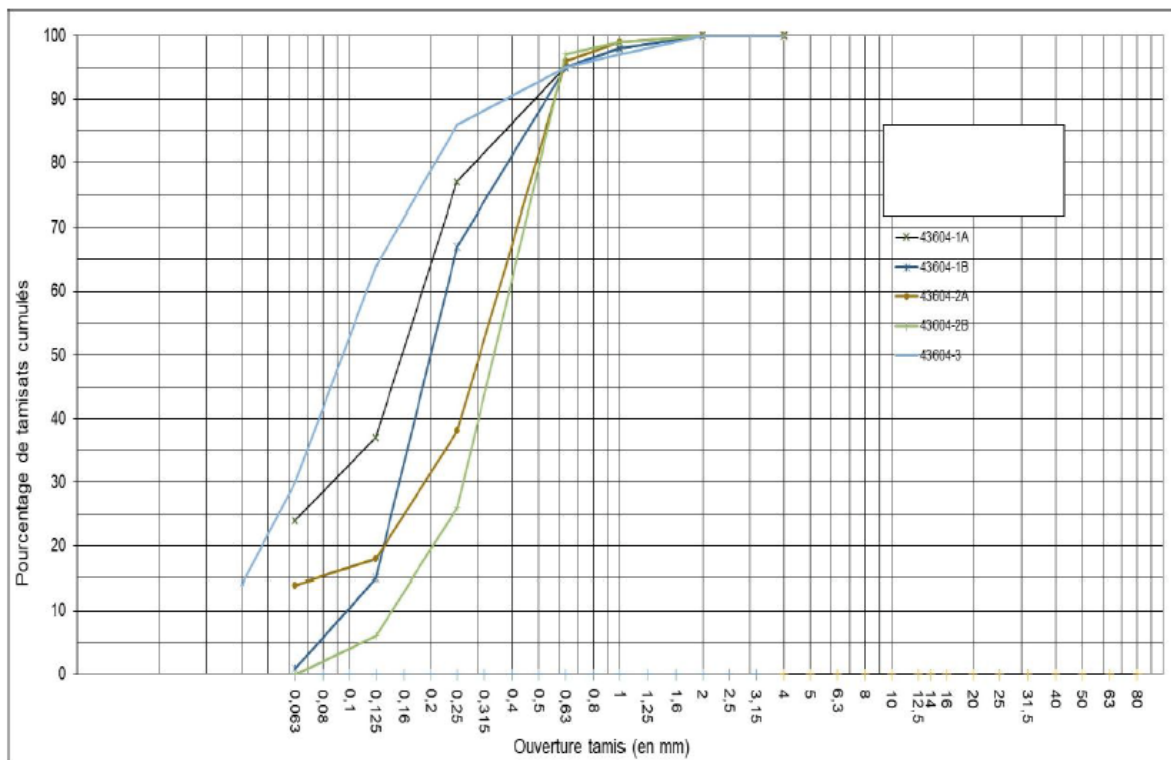


Tabella 20 - Risultati delle masse volumiche e assorbimento dell'acqua

Réf. LERM	Réf. INSA	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Absorption d'eau (%)
43604-1A	CAGLIARI <i>Sédiments non traités</i>	2700	1,2
43604-1B	CAGLIARI <i>Sédiments traités</i>	2640	0,2
43604-2A	LIVORNO PUNTO 1 <i>Sédiments non traités</i>	2680	0,4
43604-2B	LIVORNO PUNTO 1 <i>Sédiments traités</i>	2680	0,4
43604-3	TOULON <i>Sédiments non traités</i>	2680	0,9

3.3. FORMULAZIONE DI MALTE PER IL RIEMPIMENTO DI TRINCEE

La tabella 21 mostra le composizioni massiche delle diverse malte formulate con i 5 lotti di sedimenti. La tabella 22 mostra la consistenza allo stato fresco, le principali informazioni di formulazione e le resistenze meccaniche medie a compressione allo scadere dei 28 giorni.

Le consistenze ottenute per ogni malta sono illustrate nelle figure da 12 a 16 rispettivamente per le malte indicate con la referenza 43604-A, -B, -C, -D e -I.

Tabella 21 - Composizione delle malte per il riempimento di trincee

Réf. LERM	43604-A	43604-B	43604-C	43604-D	43604-I
Sédiments 43064-1A Cagliari non traité	5600 g	-	-	-	-
Sédiments 43604-2A Livorno Punto 1 non traité	-	5600 g	-	-	-
Sédiments 43064-1B Cagliari traité	-	-	5600 g	-	-
Sédiments 43604-2B Livorno Punto 1 traité	-	-	-	5600 g	-
Sédiments 43604-3 Toulon non traité	-	-	-	-	16000 g
Sable 0/4 mm SCL Alluvions du Gardon Carrière de Montfrin - GSM	10400 g	10400 g	10400 g	10400 g	-
Ciment CEM I 52,5 N Usine de Beaucaire - Calcia	3000 g	3000 g	3000 g	3000 g	3000 g
Adjuvant haut réducteur d'eau Optima 206 - Chryso	30 g	30 g	30 g	30 g	30 g
Eau efficace	4082 g	3567 g	3138 g	2947 g	5756 g

Tabella 22 - Proprietà allo stato fresco e principali parametri di formulazione delle malte per il riempimento di trincee*: Valutazione dell'abbassamento al cono di Abrams e non dello spandimento

Réf. LERM	43604-A	43604-B	43604-C	43604-D	43604-I
Etalement au cône d'Abrams (cm)	60	46	40	41	13*
% massique de sédiments dans le granulat	35	35	35	35	100
% massique de sédiments dans le mortier	24	25	25	25	64
Rapport massique Eau efficace / Ciment	1,36	1,19	1,05	0,98	1,92
Résistance mécanique moyenne à la compression à 28 jours (MPa)	7,7	9,7	10,5	10,3	4,0

Figura 12 – Malta 43604-A allo stato fresco / Figura 13 – Malta 43604-B allo stato fresco



Figura 14 – Malta 43604-C allo stato fresco / Figura 15 – Malta 43604-D allo stato fresco

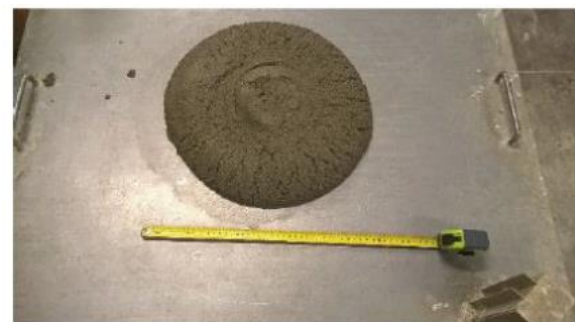


Figura 16 – Malta 43604-I allo stato fresco



3.4. FORMULAZIONE DI CALCESTRUZZI COMUNI

La Tabella 23 raccoglie le composizioni dei vari calcestruzzi formulati con i 5 lotti di sedimenti. La Tabella 24 mostra la consistenza allo stato fresco, le principali informazioni di formulazione e le resistenze meccaniche medie a compressione alla scadenza dei 28 giorni.

Le consistenze ottenute per ciascun calcestruzzo sono illustrate nelle figure da 17 a 21, rispettivamente per i calcestruzzi con riferimento 43604-E, -F, -G, -H e -J.

Tabella 23 - Composizione dei calcestruzzi comuni

Réf. LERM	43604-E	43604-F	43604-G	43604-H	43604-J
Sédiments 43064-1A Cagliari non traité	4350 g	-	-	-	-
Sédiments 43604-2A Livorno Punto 1 non traité	-	4350 g	-	-	-
Sédiments 43064-1B Cagliari traité	-	-	4350 g	-	-
Sédiments 43604-2B Livorno Punto 1 traité	-	-	-	4350 g	-
Sédiments 43604-3 Toulon non traité	-	-	-	-	6090 g
Sable 0/4 mm SCL Alluvions du Gardon Carrière de Montfrin - GSM	4350 g	4350 g	4350 g	4350 g	2610 g
Gravillon 6,3/16 mm RL Alluvions du Gardon Carrière de Montfrin - GSM	9500 g	9500 g	9500 g	9500 g	9500 g
Ciment CEM I 52,5 N Usine de Beaucaire - Calcia	3300 g	3300 g	3300 g	3300 g	3300 g
Adjuvant haut réducteur d'eau Optima 206 - Chryso	46 g	46 g	46 g	46 g	46 g
Eau efficace	2406 g	2341g	1717 g	2111 g	2795 g

Tabella 24 - Proprietà allo stato fresco e principali parametri di formulazione dei calcestruzzi comuni

Réf. LERM	43604-E	43604-F	43604-G	43604-H	43604-J
Affaissement au cône d'Abrams (cm)	9	6	12	17	8
% massique de sédiments dans le granulat	24	24	24	24	33
% massique de sédiments dans le béton	18	18	19	18	25
Rapport massique Eau efficace / Ciment	0,73	0,71	0,52	0,64	0,85
Résistance mécanique moyenne à la compression à 28 jours (MPa)	23,8	28,9	28,2	31,4	25,0

Figura 17 – Calcestruzzo 43604-E allo stato fresco / Figura 18 – Calcestruzzo 43604-F allo stato fresco



Figura 19 – Calcestruzzo 43604-G allo stato fresco / Figura 20 – Calcestruzzo 43604-H allo stato fresco



Figura 21 – Calcestruzzo 43604-J allo stato fresco



3.5. SINTESI E CONCLUSIONE

L'obiettivo del presente studio era quello di incorporare nella formulazione di malta per il riempimento di trincee e di calcestruzzo comune i sedimenti di dragaggio marino, sottoposti o meno al trattamento di separazione mediante vagli con maglie di diverse dimensioni. Tale studio ha concesso di delineare i seguenti punti essenziali :

- I sedimenti non trattati hanno un contenuto di cloruri (espresso in percentuale di massa) inferiore a 0,02 % per i sedimenti di Tolone e pari a 0,13 % e 0,61 % per i sedimenti provenienti rispettivamente da Livorno e Cagliari. Il trattamento (eliminazione della frazione inferiore a 63 μ m) sui sedimenti di Livorno e Cagliari ha consentito di ridurre tali percentuali fino ad ottenere valori rispettivamente inferiori a 0,01% e pari a 0,01 %.
- I sedimenti non trattati hanno un contenuto di solfati (espresso in percentuale di massa) pari a 0,09%,0,17 % e 0,20 % rispettivamente per i sedimenti provenienti da Tolone, Livorno e Cagliari. Il trattamento (eliminazione della frazione inferiore a 63 μ m) sui sedimenti di Livorno e Cagliari ha consentito di ridurre tali percentuali fino ad ottenere valori rispettivamente pari a 0,14 % e 0,18 %.
- In definitiva, i cloruri sembrano essere molto concentrati nella particelle più fini, mentre per quanto riguarda i solfati
- Il coefficiente d'assorbimento dell'acqua dei sedimenti non trattati è pari a 0,4 %, 0,9 % e 1,2 % rispettivamente per i sedimenti di Livorno, Tolone e Cagliari.
- Il trattamento (eliminazione della frazione inferiore a 63 μ m) sul sedimento di Cagliari ha consentito di ridurre di 6 punti tale coefficiente, che resta invariato in seguito al trattamento per il sedimento di Livorno.
- I tre sedimenti possono essere assimilati alla sabbia fine di 0/0,63 mm. Il trattamento dei sedimenti di Livorno e Cagliari ha consentito di eliminare la maggior parte delle particelle inferiori a 63 μ m, ovvero rispettivamente una frazione del 14 % e del 23 % del sedimento.
- La malta per il riempimento di trincee è stata formulata con il 35 % (percentuale di massa) dello scheletro granulare e addirittura con il 100% per il sedimento di Tolone.

- Per i sedimenti non trattati, il rapporto tra la massa d'acqua efficace e quella di cemento, che permette di ottenere la consistenza desiderata, sono rispettivamente pari a 1,19; 1,36 e 1,92 per Livorno, Cagliari e Tolone. Il contenuto elevato di particelle fini del sedimento di Tolone, con il 14% di particelle inferiori a 40 µm e il 30 % di particelle inferiori a 63 µm, è certamente all'origine del maggior bisogno di acqua di formulazione evidenziato. Infatti, anche con un dosaggio molto elevato d'acqua, non è stata raggiunta la consistenza desiderata. Il trattamento dei sedimenti di Livorno e Cagliari ha consentito di abbassare questo rapporto rispettivamente a 0,98 e 1,05.
- La resistenza meccanica a compressione a 28 giorni, è rispettivamente pari a 4,0 MPa, 7,7 MPa, 9,7 MPa, per i sedimenti non trattati di Tolone, Cagliari e Livorno e a 10,3 MPa e 10,5 MPa per i sedimenti trattati di Livorno e Cagliari.
- I calcestruzzi comuni sono stati formulati sostituendo il 24% (percentuale di massa) dello scheletro granulare con i sedimenti di Livorno e Cagliari ; questo tasso raggiunge addirittura il 33 % per il sedimento di Tolone.
- Per i sedimenti non trattati, il rapporto tra la massa d'acqua efficace e quella di cemento, che permette di ottenere la consistenza desiderata, sono rispettivamente pari a 0,71; 0,73 e 0,85 per i sedimenti di Livorno, Cagliari e Tolone. L'elevato contenuto di particelle fini del sedimento di Tolone, con il 14% di particelle inferiori a 40 µm e il 30 % di particelle inferiori a 63 µm, è certamente all'origine dell'elevato bisogno di acqua di formulazione. Il trattamento dei sedimenti di Livorno e Cagliari ha consentito di abbassare questo rapporto rispettivamente a 0,64 e 0,52.
- La resistenza meccanica a compressione a 28 giorni, è pari a 23,8 MPa, 25,0 MPa e 28,9 MPa rispettivamente per i sedimenti non trattati di Cagliari, Tolone e Livorno e a 28,2 MPa e 31,4 MPa per i sedimenti trattati di Cagliari e Livorno.

In definitiva, l'incorporazione dei sedimenti di dragaggio marino all'interno di malta e calcestruzzo è possibile, ma richiede studi specifici volti a determinare la percentuale d'incorporazione adeguata alla natura di ciascun sedimento e a ciascun tipo di applicazione prevista. La percentuale di incorporazione sarà calcolata da una parte in base alla qualità iniziale dei sedimenti e al o ai trattamenti che avrà subito, dall'altra in base alle performance desiderate per il calcestruzzo o la malta. Si può quindi affermare che :

- L'eliminazione della frazione fine inferiore a 63 μm permette di ridurre il bisogno d'acqua di formulazione e dunque di ottenere migliori prestazioni meccaniche
- Il contenuto di solfati deve essere limitato per garantire la durezza del materiale e prevenirsi da una eventuale reazione solfatica interna
- Il contenuto di cloruri deve essere gestito per l'applicazione nei cementi armati

Inoltre, sarebbe opportuno completare la caratterizzazione meccanica con una caratterizzazione fisica, misurando il ritiro dovuto all'essiccamento per via dell'elevata richiesta d'acqua dei sedimenti, e anche il rigonfiamento sotto l'acqua per via della presenza di particelle argillose con tendenza a gonfiarsi.

Infine, sarebbe stato interessante poter confrontare i risultati ottenuti a delle formule di malta e calcestruzzo contenenti soltanto materiali granulari naturali, per poter vedere l'impatto della richiesta d'acqua dei sedimenti sulle prestazioni meccaniche.

Tale richiesta d'acqua potrebbe essere limitata utilizzando dosaggi maggiori di additivi superfluidificanti riduttori di acqua ad alta efficacia, ma l'impatto economico resta ancora da valutare.

4. VALUTAZIONE GEOTECNICA E MECCANICA DEI MATERIALI

4.1. PREMESSA

Il presente documento mette insieme i risultati dei saggi di caratterizzazione geotecnica realizzati dalla RAS sui sedimenti di dragaggio tal quali e la relativa idoneità di impiego nel settore delle tecniche stradali, con i risultati dei campioni ottenuti miscelando i sedimenti con altri materiali (sabbia, ghiaia, cemento) allo scopo di verificarne l'idoneità all'uso nel settore dell'ingegneria civile, come nella formulazione di calcestruzzo o malta. Per verificare l'utilizzo delle miscele di sedimenti e cemento nel settore delle tecniche stradali sono state realizzate anche altre sperimentazioni (miglioramento del valore e dell'indice di capacità portante CBR e costruzione di miscele cementizie, anche con l'aggiunta di materiali di demolizione - C&D - e di ceneri volanti).

4.2. IMPIEGO DEI SEDIMENTI DI DRAGAGGIO NELLE MISCELE DI CEMENTO PER LA PRODUZIONE DI CALCESTRUZZO

PROVADEMSE INSAVALOR (in subappalto dell'INSA di Lione) e ISPRA hanno utilizzato i sedimenti di dragaggio per fabbricare materiali destinati alle prove lisimetriche di Tolone e Livorno. In questa occasione, alcune provette sono state confezionate e spedite in Sardegna per la realizzazione di uno studio geotecnico. Il quadro normativo di riferimento per la Francia e per l'Italia è quello delle norme europee di standardizzazione (EN).

In particolare, la norma EN 206-1:2006 classifica il calcestruzzo in base a:

- consistenza
- massa volumica (o peso specifico)
- resistenza a compressione

➤ **Classificazione in base alla consistenza**

a) Struttura aperta o porosa (la curva granulometrica del materiale inerte privo della frazione fine)

b) struttura chiusa o densa (la curva granulometrica è completa): sono presenti soltanto alcune piccole fessure tra gli agglomerati

Gli esemplari realizzati con una miscela di ghiaia e sabbia, hanno una struttura chiusa.

➤ **Classificazione in base alla massa volumica**

Si distingue tra le seguenti classi (EN 206-1:2006):

- Calcestruzzo leggero : con una massa volumica minima di 800 kg/m³ e massima di 2000 kg/m³ dopo l'essiccamento in forno
- Calcestruzzo normale : con una massa volumica superiore a 2 000 kg/m³ ma che non supera 2 600 kg/m³, dopo l'essiccamento in forno
- Calcestruzzo pesante : con una massa volumica superiore a 2 600 kg/m³, dopo l'essiccamento in forno.

➤ **Classificazione in base alla resistenza a compressione**

La resistenza a compressione (N/mm² o MP) è espressa come la resistenza caratteristica di cilindri di 150 mm di diametro e 300 mm di altezza (fck,cyl) o di cubi con lati da 150 mm (fck,cube).

Il rapporto tra la resistenza caratteristica (fck) determinata su campioni cilindrici e cubici è fck,cyl = 0,83 fck,cube. In base ai valori di resistenza, si distingue in:

- Calcestruzzo non strutturale: C8/10 - C12/15
- Calcestruzzo a resistenza normale (NSC): C16/20 - C45/55
- Calcestruzzo ad alte prestazioni (HPC): C50/60 - C60/75
- Calcestruzzo ad alta resistenza (HSC): C70/85 - C100/120

Dove : C= calcestruzzo; 8= resistenza a compressione di cilindri/10= resistenza a compressione di cubi

Allo scopo di valutare i risultati ottenuti, sono stati testati alcuni campioni di controllo :

Tabella 25 - Resistenza a compressione dei calcestruzzi di controllo e classe di riferimento.

Échantillon	Résistance à la compression sur des éprouvettes cylindriques	Classe de référence
BETON TEMOIN	23,39	C20/25
BETON TEMOIN	20,53	C20/25

In base ai risultati delle prove di compressione, i campioni di controllo di calcestruzzo rientrano nella categoria del calcestruzzo comune, poiché si collocano tra le classi C16/20 e C45/55.

➤ Risultati delle prove sui campioni realizzati a Tolone e Livorno

Tabella 26 - Composizione dei calcestruzzi realizzati con i sedimenti di Tolone e Livorno

Béton Toulon et Béton Livourne	Sédiment brut	Sédiment traité
Matériaux	% sur sec total	
Sédiment	20,19	40,38
sable	20,19	0,00
gravier	44,09	44,09
ciment	15,32	15,32
réducteur	0,21	0,21
Total	100	100
Eau (% sur le total)	10,86	13,69

Tabella 27 - Caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi realizzati con il sedimento di Tolone grezzo e trattato

ÉCHANTILLON	MASSE VOLUMIQUE MOYENNE χ (kg/m ³)	CLASSE D'APPARTENANCE	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION MOYENNE σ (N/mm ²) (fck)	CLASSE	CLASSE D'UTILISATION
TOULON BRUT BETON	2.303,91	NORMALE	12,21	C12/15	NON- STRUCTURELLE
TOULON BETON TRAITE'	2.209,60	NORMALE	12,31	C12/15	NON- STRUCTURELLE

Tabella 28 - Caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi realizzati con il sedimento di Livorno grezzo e trattato

ÉCHANTILLON	MASSE VOLUMIQUE MOYENNE \bar{X} (kg/m ³)	CLASSE D'APPARTENANCE	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION MOYENNE σ (N/mm ²) (fck)	CLASSE	CLASSE D'UTILISATION
LIVORNO BRUT BETON	2.266,80	NORMALE	11,79	C8/10	NON-STRUCTURELLE
LIVORNO BETON TRAITÉ'	2.264,73	NORMALE	13,57	C12/15	NON-STRUCTURELLE

4.3. IMPIEGO DEI SEDIMENTI NELLA FABBRICAZIONE DI MALTA

La malta può essere utilizzata per fissare mattoni o per fabbricare diversi tipi di intonaco.

Per quanto riguarda la classificazione, si può fare riferimento alla norma europea, che distingue diverse classi in base alla resistenza a compressione a 28 giorni.

Tabella 29 - Le diverse classi di malta in base alla resistenza a compressione a 28 giorni

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

➤ **Campioni di controllo**

I seguenti valori di resistenza a compressione sono presentati qui di seguito per il confronto dei dati.

Tabella 30 - Valori di resistenza a compressione della malta di controllo.

Échantillon	Résistance à la compression (N/mm ²)	Classe
MORTIER TMOIN	12,38	M10
MORTIER TMOIN	14,34	M10

➤ **Risultati delle prove sui campioni realizzati a Tolone, Centuri e Cagliari**

Gli esemplari cilindrici realizzati con i sedimenti di Tolone, Centuri e Cagliari presentano le seguenti composizioni :

Tabella 31 - Composizione delle malte realizzate con i sedimenti

Composition	Sédiment brut	Sédiment traité
Matériaux	% sur sec total	
Sédiment	29,43	42,04
sable	54,65	42,04
gravier	0,00	0,00
ciment	15,76	15,76
réducteur	0,16	0,16
Total	100	100
Eau (% sur le total)	21,44	16,50

➤ **Risultati delle prove**

Tabella 32 - Caratteristiche meccaniche delle malte realizzate con il sedimento di Tolone grezzo e trattato

ÉCHANTILLON	MASSE VOLUMIQUE MOYENNE χ (kg/m ³)	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION MOYENNE σ (N/mm ²) (fck)	CLASSE D'APPARTENANCE EN 998 -2
TOULON BRUT MORTIER	2.015,85	7,17	M5
TOULON MORTIER TRAITÉ'	1.851,89	3,88	M2,5

Tabella 33 - Caratteristiche meccaniche delle malte realizzate con il sedimento di Centuri grezzo e trattato

ÉCHANTILLON	MASSE VOLUMIQUE MOYENNE χ (kg/m ³)	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION MOYENNE σ (N/mm ²) (fck)	CLASSE D'APPARTENANCE EN 998 -2
CENTURI BRUT MORTIER	2.045,92	13,89	M10
CENTURI MORTIER TRAITÉ'	2.081,81	15,44	M15

Come già anticipato, i valori di resistenza per Tolone e Cagliari sono modesti (da circa 50 a 70 kg/cm²), mentre per i campioni di Centuri, costituiti principalmente da sabbia con una percentuale di Posidonia, presentano dei valori pari a quasi il doppio dei precedenti.

Il campione di malta con il sedimento trattato di Tolone, che avrebbe dovuto fornire valori più elevati rispetto al campione realizzato con sedimento non trattato, risulta fuori dalla norma in termini di massa volumica media e di resistenza.

4.4. MISCELE DI SEDIMENTI, CEMENTO E ALTRI MATERIALI (C&D E CENERI VOLANTI) PER LE TECNICHE STRADALI

I test sperimentali sono stati eseguiti su campioni provenienti dalla "vasca di Livorno" e sui sedimenti di Centuri.

Sui campioni sono stati determinati la granulometria e i limiti di Atterberg.

➤ **Classificazione dei sedimenti**

Campione "VASCA LIVORNO" Toscana - Italia

Tabella 35 - Classificazione del sedimento di Livorno

LIMITES ET INDICES D'ATTERBERG (CNR-UNI-10014)			
Limite de liquide (%)	N.D.	INDICE DES GROUPES (CNR-UNI 10006)	0
Limite plastique (%)	N.D.	CLASSIFICATION (CNR-UNI 10006)	A 2-4
Limite de retrait (%)	N.D.	CLASSIFICATION NF P11 - 300	1 B
Indice de plasticité	N.D.	CLASSIFICATION (U.S.C.S)	SM

Campione "CENTURI" Corsica- Francia

Tabella 36 - Classificazione del sedimento di Centuri

LIMITES ET INDICES D'ATTERBERG (CNR-UNI-10014)			
Limite de liquide (%)	N.D.	INDICE DES GROUPES (CNR-UNI 10006)	0
Limite plastique (%)	N.D.	CLASSIFICATION (CNR-UNI 10006)	A 1-b
Limite de retrait (%)	N.D.	CLASSIFICATION NF P11 - 300	1 D
Indice de plasticité	N.D.	CLASSIFICATION (U.S.C.S)	SW

La prova Proctor modificata (modified AASHTO test) ha consentito di stabilire il valore di umidità ottimale, che permette di ottenere la densità massima mediante compattazione.

(ASTM D2844 AASHTO T190 CTM 301 : Prova di trasudazione dell'umidità dei terreni compattati)

➤ **Prove di compattazione A.A.S.H.T.O**

Campione "VASCA LIVORNO" Toscana - Italia

Tabella 37 - Capacità di compattazione del sedimento di Centuri

DENSITÉ MAXIMALE (kN/m ³)	17,65
HUMIDITÉ OPTIMALE (%)	10,50

Campione "Centuri" Corsica - Francia

Tabella 38 - Capacità di compattazione del sedimento di Centuri

DENSITÉ MAXIMALE (kN/m ³)	18,14
HUMIDITÉ OPTIMALE (%)	5,00

➤ **Indice CBR**

In riferimento a tali valori ottimali di umidità, sono stati predisposti alcuni campioni per determinare l'indice CBR sul sedimento tal quale e sul sedimento con aggiunta di una percentuale crescente di cemento.

Campione "VASCA LIVORNO" Toscana - Italia Valutazione del campione "TAL QUALE"

Tabella 39 - Indici CBR del sedimento di Livorno "tal quale"

INDICE C.B.R.		DENSITÉ SÈCHE	HUMIDITÉ (%)		RÉINFLECTION
a 2,5 mm	a 5 mm	kN/m ³	Initiale	Sous piston	le (%)
27,6	30,5	17,658	9,05	9,24	0,00

Campione "VASCA LIVORNO" Toscana - Italia Valutazione del campione con aggiunta del 5% di cemento

Tabella 40 - Indici CBR del sedimento di Livorno con aggiunta del 5% di cemento

INDICE C.B.R.		DENSITÉ SÈCHE	HUMIDITÉ (%)		RÉINFLECTION
a 2,5 mm	a 5 mm	kN/m ³	Initiale	Sous le piston	(%)
46,7	54,8	18,318	13,71	11,78	0,00

Campione "CENTURI" Corsica- Francia Valutazione del campione "TAL QUALE"

Tabella 41 - Indici CBR del sedimento di Centuri "tal quale"

INDICE C.B.R.		DENSITÉ SÈCHE	HUMIDITÉ (%)		RÉINFLECTION
a 2,5 mm	a 5 mm	kN/m ³	Initiale	Sous le piston	(%)
13,4	18,1	17,575	5,68	5,77	0,00

Campione "CENTURI" Corsica – Francia Valutazione del campione con aggiunta del 3% di cemento

Tabella 42 - Indici CBR del sedimento di Centuri con aggiunta del 3% di cemento

INDICE C.B.R.		DENSITÉ SÈCHE	HUMIDITÉ (%)		RÉINFLECTION
a 2,5 mm	a 5 mm	kN/m ³	Initiale	Sous le piston	(%)
53,1	49,3	17,501	10,24	8,52	0,00

Campione "CENTURI" Corsica – Francia Valutazione del campione con aggiunta del 5% di cemento

Tabella 43 - Indici CBR del sedimento di Centuri con aggiunta del 5% di cemento

INDICE C.B.R.		DENSITÉ SÈCHE	HUMIDITÉ (%)		RÉINFLECTION
a 2,5 mm	a 5 mm	kN/m ³	Initiale	Sous le piston	(%)
193,3	-----	19,388	8,94	8,86	0,00

Campione "CENTURI" Corsica – Francia Valutazione del campione con aggiunta del 10% di cemento

Tabella 44 - Indici CBR del sedimento di Centuri con aggiunta del 10% di cemento

INDICE C.B.R.		DENSITÉ SÈCHE	HUMIDITÉ (%)		RÉINFLECTION
a 2,5 mm	a 5 mm	kN/m ³	Initiale	Sous le piston	(%)
219,1	-----	19,107	13,07	11,41	0,00

L'analisi de dati, confrontata con i valori dell'indice CBR del campione non trattato, mostra che anche con una percentuale modesta di cemento, si ottiene un aumento significativo della portanza.

4.5. IMPIEGO DEI SEDIMENTI PER LA REALIZZAZIONE DI MISCELE DI CEMENTO

- **Prove su miscele cementizie (C.N.R. - B.U. n°29 del 07/11/1972) Determinazione del carico di rottura a compressione**

La miscela cementizia è un materiale ottenuto mescolando agglomerati granulari con del cemento al 2,5% - 3,5 % del peso del materiale inerte.

Alcune miscele con quantità variabili di cemento sono state testate per predisporre dei campioni da sottoporre alle prove di compressione monoassiale.

Per ciascuna miscela, è stata stabilita l'umidità ottimale attraverso delle prove A.A.S.H.T.O. modificate. Inoltre è stata testata una miscela composta da sedimenti, agglomerati di materiali di costruzione e demolizione e ceneri volanti provenienti dalla combustione del carbone nelle centrali termoelettriche, in particolare quelle provenienti dalla Carbosulcis S.p.a..

Le prove sono state effettuate esclusivamente sui sedimenti provenienti da Centuri.

Sono stati preparati alcuni campioni con l'aggiunta di percentuali diverse di cemento e altri con l'aggiunta di cemento, di rifiuti di demolizione (C&D) e di ceneri volanti provenienti dalla combustione del carbone nelle centrali termoelettriche.

I campioni così fabbricati sono stati sottoposti a una prova di rottura a compressione, dopo un periodo di maturazione di 7 giorni.

Campione "CENTURI" Corsica- Francia : Campione tal quale con aggiunta del 3% di cemento e del 10% d'acqua

Tabella 45 - Proprietà meccaniche del sedimento di Centuri con aggiunta del 3% di cemento e del 10% d'acqua

Évaluation	Poids spécifique	Rupture à la compression	
N°	kN/m ³	Kg/cm ²	MPa
1	21,73	4,4	0,43
2	21,05	6,0	0,59
Valeurs moyennes	21,39	5,2	0,51

Campione "CENTURI" Corsica - Francia : Campione tal quale con aggiunta del 5 % di cemento e del 15% d'acqua

Tabella 46 - Proprietà meccaniche del sedimento di Centuri con aggiunta del 5% di cemento e del 15% d'acqua

Évaluation	Poids spécifique	Rupture à la compression	
N°	kN/m ³	Kg/cm ²	MPa
1	20,86	7,7	0,75
2	21,29	7,1	0,70
Valeurs moyennes	21,07	7,4	0,73

Campione "CENTURI" Corsica- Francia : campione ottenuto a partire dalla miscela con 30% di sedimento "Centuri", 30% di materiali C&D 0-15 mm, 30% di materiali C&D 15-40 mm, 10% di ceneri volanti Carbosulcis, 3% di cemento e 15% d'acqua

Tabella 47 - Proprietà meccaniche della miscela con 30% di sedimento di Centuri, 30% di C&D 15-40mm, 10% di ceneri volanti Carbosulcis, 3% di cemento e 15% d'acqua

Évaluation	Poids spécifique	Rupture à la compression	
N°	kN/m ³	Kg/cm ²	MPa
1	20,30	15,4	1,51
2	20,40	15,4	1,51
Valeurs moyennes	20,35	15,4	1,51

4.6. COMMENTI SUI RISULTATI

➤ Calcestruzzo : utilizzo nel settore delle costruzioni

I risultati mostrano che l'utilizzo dei sedimenti tal quali, miscelati ad una percentuale uguale di sabbia, comporta un calo significativo della resistenza a compressione, ridotta quasi alla metà rispetto a quella dei campioni di prova.

La resistenza ottenuta permette, ad ogni modo, di far rientrare le miscele di sedimenti e cemento tra i materiali utilizzabili. In particolare, i valori di resistenza a compressione consentono di classificare i calcestruzzi come idonei ad un utilizzo non strutturale, cioè in prodotti per i quali non è richiesta una elevata resistenza a compressione.

Bisogna sottolineare che anche nei campioni costituiti interamente con sedimenti trattati, i valori di resistenza sono molto simili a quelli ottenuti con sedimenti non trattati.

➤ Malta : utilizzo nel settore delle costruzioni

Anche nel caso dei campioni di malta, i valori di resistenza dei controlli sono pari quasi al doppio di quelli riscontrati nei campioni realizzati con i sedimenti.

Per quanto riguarda la possibilità di utilizzare i sedimenti nella produzione di malta, i valori di resistenza ottenuti permettono comunque di far rientrare le miscele di sedimenti e cemento tra i materiali utilizzabili.

➤ **Miscele di sedimenti e cemento : utilizzo nelle tecniche stradali**

L'aggiunta di cemento ai sedimenti ha portato ad un miglioramento significativo della portanza.

Nel caso dei sedimenti sabbiosi contenenti limo della "Vasca Livorno", sono stati ottenuti dei buoni indici CBR sul materiale tal quale, che sono aumentati di circa 20 punti con l'aggiunta del 5% di cemento, come evidenziato dalla seguente tabella :

Tabella 48 - Indici CBR del sedimento di Centuri "tal quale" e con aggiunta del 5% di cemento

Indice CBR Vasca Livorno (Italia) tel quel		Indice CBR Vasca Livorno (Italia) + 5% ciment	
A 2,5 mm	A 5,0 mm	A 2,5 mm	A 5,0 mm
27,6	30,5	46,7	54,8

Anche i sedimenti sabbiosi di Centuri - Corsica (Francia) hanno rivelato un incremento significativo dell'indice CBR, all'aumentare della percentuale di cemento utilizzata nella miscela (si veda tabella qui sotto).

Tabella 49 - Indici CBR del sedimento di Centuri "tal quale" e con aggiunta del 3% di cemento

Indice CBR Vasca Livorno (Italia) tel quel		Indice CBR Vasca Livorno (Italia) + 3% ciment	
A 2,5 mm	A 5,0 mm	A 2,5 mm	A 5,0 mm
13,4	18,1	53,1	49,3

Tabella 50 - Indici CBR del sedimento di Centuri con aggiunta del 5% e del 10% di cemento

Indice CBR Vasca Livorno (Italia) + 5% ciment		Indice CBR Vasca Livorno (Italia) + 10% ciment	
A 2,5 mm	A 5,0 mm	A 2,5 mm	A 5,0 mm
193,3	n.d.	219,1	n.d.

➤ **Utilizzo nelle tecniche stradali : miscele per rivestimenti cementizi**

I valori di riferimento della resistenza a compressione sono compresi tra 3 e 4,5 MPa.

La seguente tabella presenta le miscele testate e i valori ottenuti.

Tabella 51 - Valori medi di peso specifico e di rottura a compressione delle miscele ottenute con il sedimento di Centuri, cemento, acqua e altri additivi

Echantillon	Poids spécifique moyen (kN/m ³)	Rupture de compression moyenne (Kg/cm ²) (MPa)	
Centuri Corse –(France) + 3% ciment et 10 % eau	21,39	5,2	0,51
Centuri Corse –(France) + 5% ciment et 15 % eau	21,07	7,4	0,73
Centuri Corse –(France) + C&d et cendres volantes + 3% ciment et 15% eau	20,35	15,4	1,51

Considerando i valori minimi prescritti dalla normativa, è necessario sottolineare che queste formulazioni non sono adatte alla produzione di miscele cementizie.

Tuttavia, utilizzando lo stesso cemento, nelle miscele in cui sono stati impiegati materiali di costruzione e di demolizione e ceneri volanti si è riscontrato un significativo miglioramento della resistenza a compressione.

5. VALUTAZIONE AMBIENTALE DEI MATERIALI IN CONDIZIONI SPERIMENTALI

5.1. CONCEZIONE E REALIZZAZIONE DI OPERE PILOTA

Quattro sedimenti sono stati utilizzati per l'esecuzione di opere pilota. Due sedimenti italiani, provenienti l'uno dal porto di Livorno e l'altro da quello di Cagliari, e due sedimenti francesi, provenienti l'uno dal porto di Centuri e l'altro da quello di Tolone.

Le opere pilota, di identica concezione, sono state realizzate in sue siti diversi :

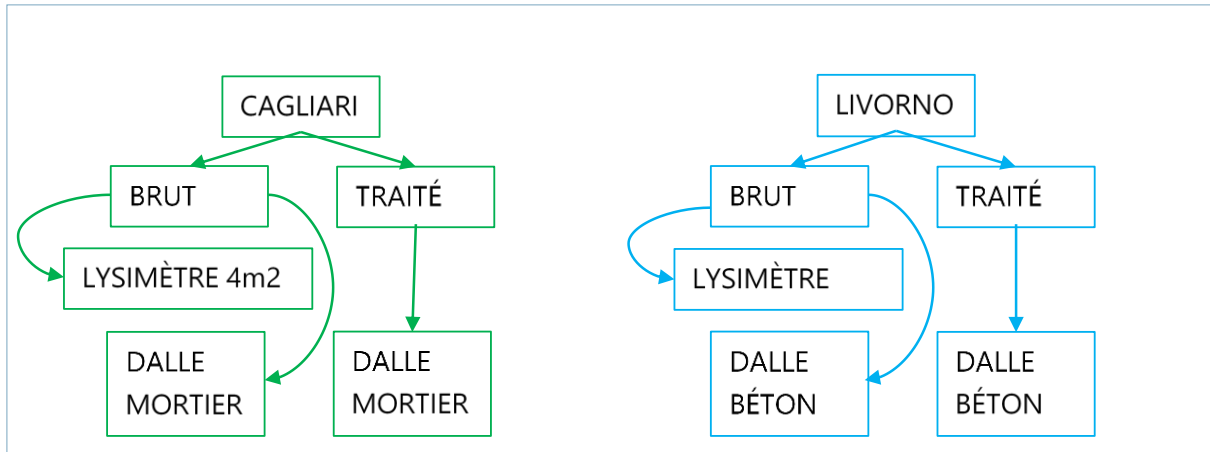
- All'interno di container termoregolati sulla piattaforma ambientale dedicata alla R&S del CPEM ENVISAN a La Seyne-Sur-Mer per le opere a base di sedimenti di Centuri e Tolone
- All'interno dei locali dell'ISPRA a Livorno per le opere a base di sedimenti di Livorno e Cagliari.

5.1.1. Opere pilota realizzate sui due sedimenti italiani

Nel caso dei sedimenti italiani, le situazioni e le tipologie di azioni pilota sono ricapitolate qui di seguito.

- Due lisimetri a simulazione di un riempimento :
 - il primo sul sedimento di Cagliari allo stato grezzo;
 - il secondo sul sedimento di Livorno trattato.
- E quattro lastre di malta o calcestruzzo :
 - due lastre di malta con i sedimenti di Livorno, una con quello grezzo e una con quello trattato
 - due lastre di calcestruzzo con i sedimenti di Cagliari, una con quello grezzo e una con quello trattato

Figura 22 – Schema riassuntivo dei test realizzati sul sito ISPRA



5.1.2. Opere pilota realizzate sui sedimenti francesi

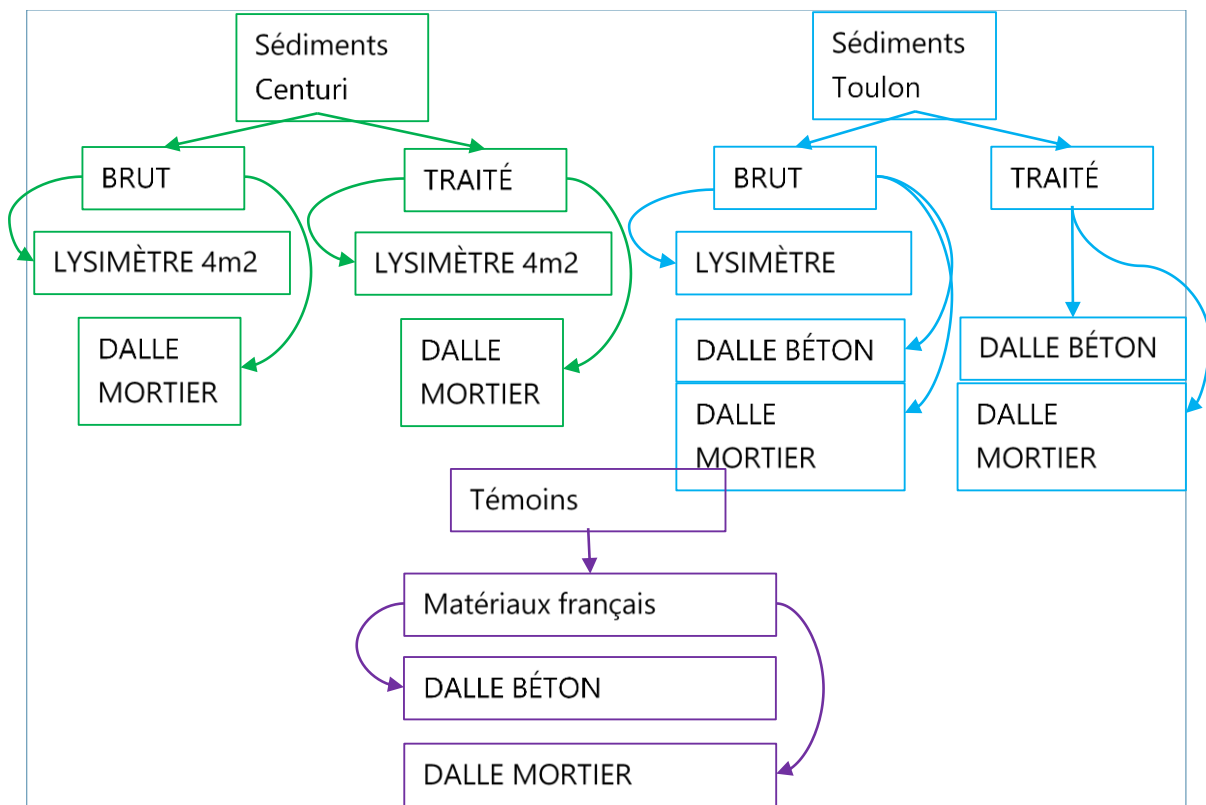
Nel caso dei sedimenti francesi, le situazioni e le tipologie di opere pilota sono ricapitolate qui di seguito.

- Tre lisimetri a simulazione di un riempimento :
 - il primo sul sedimento di Centuri allo stato grezzo
 - il secondo sul sedimento di Centuri trattato a Tolone dall'équipe dell'ISPRA in uno dei suoi impianti pilota
 - il terzo sul sedimento di Tolone allo stato grezzo

- 6 lastre di malta o calcestruzzo :
 - due lastre di malta con i sedimenti di Tolone, una con quello grezzo e l'altra con quello trattato
 - due lastre di calcestruzzo con i sedimenti di Tolone, una con quello grezzo e l'altra con quello trattato
 - due lastre di malta con i sedimenti di Centuri, una con quello grezzo e l'altra con quello trattato

- 2 lastre di malta e calcestruzzo di controllo :
- una lastra di malta di controllo con cemento e sabbia francesi;
- una lastra di calcestruzzo di controllo con cemento, agglomerati e sabbia francesi.

Figura 23 – Schema riassuntivo delle prove realizzate sul CPEM ENVISAN



5.1.3. Descrizione dei lisimetri pilota

- **Realizzazione di vasche di contenimento dei sedimenti**

La sperimentazione consiste nella realizzazione di vasche di 2,5 m di lunghezza per 1,75 m di larghezza e 0,83 m di altezza, per una superficie totale di 4,375 m². I pannelli laterali sono realizzati con OSB (Oriented Strand Board, letteralmente “pannelli a scaglie orientate”). I fogli OSB sono composti da diversi strati di lunghi trucioli di legno, incollati tra di loro in modo da ottenere la stessa qualità del legno massiccio.

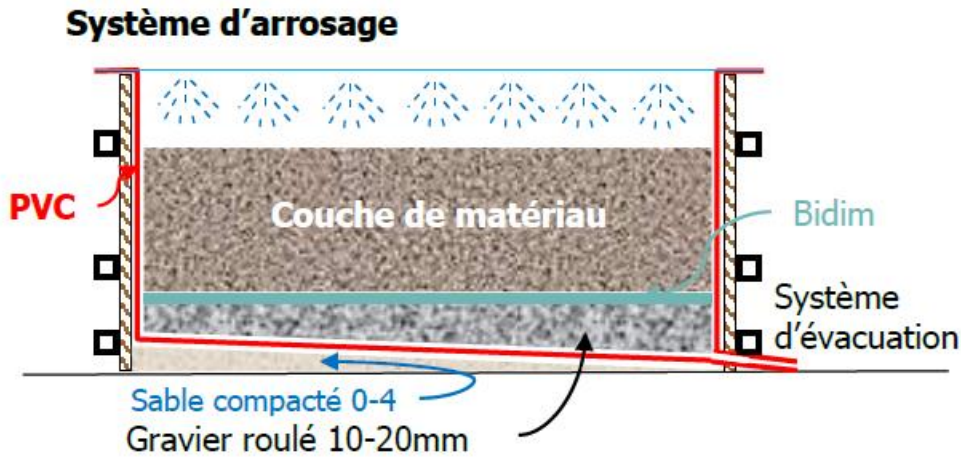


Figura 24 – Schema sezionale del lisimetro



Figura 25 – Applicazione del progetto pilota a Livorno (a sinistra) e Tolone (a destra)

➤ **Specificità delle vasche realizzate a Tolone**

Le vasche lisimetriche realizzate a Tolone sono collocate all'interno di container refrigerati. I container hanno una larghezza di 2,294 m. Se si considera lo spessore delle pareti, restano 2,26 m di larghezza utile. Si è preferito mettere le vasche in fondo ai container, in modo che 3 pareti del lisimetro siano contro quelle del container. Soltanto la quarta parete necessita di essere irrigidita e rinforzata per resistere alla spinta dei sedimenti. Le dimensioni dei lisimetri sono dunque state adattate per mantenere la stessa superficie di 2,26 x 1,94 m.

➤ **Descrizione del sistema di irrigazione**

Il sistema di irrigazione consiste in 48 ugelli nebulizzatori ripartiti su 3 reti da 16. Come possiamo vedere nello schema qui sotto, gli ugelli delle tre reti sono distribuiti in modo da irrigare tutto il lisimetro. Gli ugelli di ciascuna rete sono collegati tra di essi in modo tale che le lunghezze dei tubi che vanno dall'ugello al punto di giunzione risultino identiche. Gli ugelli sono fissati a una griglia rigida posta sui bordi della vasca. Le tre reti sono gestite da un insieme di minuteria e da 3 elettrovalvole. Sono attivate una per una, ogni 6 minuti e 40 secondi, per un'irrigazione completa ogni 20 minuti.

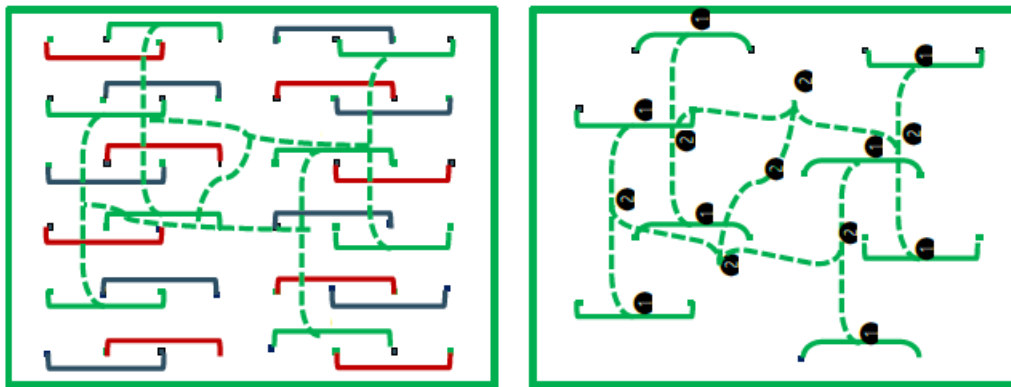


Figura 26 – Rete di ugelli ripartiti sulla superficie del lisimetro

Il primo giorno gli ugelli sono stati attivati manualmente, allo scopo di impregnare la massa, e fermate appena l'acqua ha raggiunto l'uscita (sul fondo del lisimetro)

Figura 27 – Sistema di irrigazione posto sul lisimetro



5.1.4. Descrizione delle lastre sperimentali

Le lastre di malta e calcestruzzo sono state realizzate secondo le formulazioni messe a punto nel capitolo 3. L'impasto è stato eseguito in una betoniera standard. La miscela viene versata in contenitori di PE di dimensioni pari a 555 x 355 x 235 mm (L x l x h) per una superficie totale di 0,20 m². Le lastre realizzate misurano circa 11 cm. Le formulazioni qui sotto sono derivate dallo studio effettuato dal LERM e dalle prove complementari eseguite da PROVADEMSE INSAVALOR.

Nella seguente tabella sono elencate le percentuali calcolate rispetto alla massa complessiva dei materiali e all'acqua.

➤ **Composizione delle lastre realizzate all'ISPRA**

Tabella 52 - Composizione delle malte e dei calcestruzzi realizzate con i sedimenti grezzi e trattati di Cagliari e Livorno

	Mortier avec le sédiment de Cagliari		Béton avec le sédiment de Livourne	
	brut	traité	brut	traité
Sédiment	24,23%	35,35%	18,10%	34,00%
sable	43,00%	35,35%	18,10%	0,00%
gravier	0,00%	0,00%	39,77%	38,78%
ciment	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%
réducteur	0,13%	0,14%	0,19%	0,19%
eau	17,65%	14,16%	9,80%	12,04%
total	100,02%	100,00%	100,96%	100,01%

La scelta delle percentuali impiegate nella realizzazione dei materiali si è basata sulle percentuali calcolate rispetto ai materiali sott'acqua estratte dallo studio del LERM, presentate nella tabella qui sotto :

Tabella 53 - Composizione delle malte e dei calcestruzzi derivati dalle prove di formulazione

	Masse	Sédiment	Sable	Gravier	Ciment	Réducteur	Eau	Total
Mortier	(kg)	5,6	10,4		3	0,03	4,08	19,03
	(%)	29,43%	54,65%	0,00%	15,76%	0,16%		100,00%
Béton	(kg)	4,35	4,35	9,5	3,3	0,046	2,34	21,546
	(%)	20,19%	20,19%	44,09%	15,32%	0,21%		100,00%

Il LERM ci ha fornito soltanto una formula di malta e una di calcestruzzo, entrambe dovrebbero dare risultati meccanici corretti per tutti i sedimenti. Si sono mantenute dunque queste percentuali per i sedimenti allo stato grezzo e si sono invece aumentate le proporzioni per i sedimenti trattati. Per la malta è stato utilizzato lo stesso quantitativo di sabbia e di sedimenti, per una percentuale del 42,04% ciascuno.

Per il calcestruzzo è stato sostituito l'intero quantitativo di sabbia con il sedimento. Gli stessi principi sono stati utilizzati per tutte le formulazioni realizzate. Soltanto le quantità d'acqua aggiunte sono diverse e sono adattate secondo la malleabilità della miscela.

Tabella 54 - Composizione in percentuale di massa secca delle malte e dei calcestruzzi derivati dalle prove di formulazione e realizzati per le lastre sperimentali

Matériaux (% sur sec)	Mortier Cagliari & Toulon			Béton Livourne, Toulon & Centuri		
	Réf. LERM*	brut	traité	Réf. LERM*	brut	traité
Sédiment	29,43%	29,43%	42,04%	20,19%	20,19%	40,38%
sable	54,65%	54,65%	42,04%	20,19%	20,19%	0,00%
gravier	0,00%	0,00%	0,00%	44,09%	44,09%	44,09%
ciment	15,76%	15,76%	15,76%	15,32%	15,32%	15,32%
réducteur	0,16%	0,16%	0,16%	0,21%	0,21%	0,21%
total	100%	100%	100%	100%	100%	100%

* Formulazione LERM grezzo

NB: il trattamento dei sedimenti è stato eseguito mediante lavaggio con idrociclone sotto la supervisione dell'ISPRA sul sito di Livorno (per i sedimenti di Livorno e Cagliari) e sul sito di Tolone (per i sedimenti di Tolone e Centuri) al fine di estrarne la frazione fine e i residui vegetali, in particolare le fibre di Posidonia oceanica. Di questo trattamento si parla nell'ELABORATO T2.3.3: TRATTAMENTO DI SEPARAZIONE GRANULOMETRICA DEI SEDIMENTI E SOIL WASHING.

La proporzione del sedimento all'interno della massa secca di materiale è maggiore nelle formulazioni a base di sedimenti trattati (da 40 a 42%) che in quelle a base di sedimenti allo stato grezzo (da 20 a 29%).

Le percentuali d'acqua utilizzate sono presentate nella tabella che segue.

Tabella 55 - Contenuto d'acqua delle formulazioni delle lastre sperimentali.

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

Figura 28 - Lastre sperimentali di malta e calcestruzzo realizzate a Livorno (a sinistra) e a Tolone (a destra)



Figura 29 - Dispositivo di accoglienza delle lastre sperimentali e del lisimetro all'interno di un contenitore refrigerato nel CPEM di Tolone



5.2. MONITORAGGIO DELLE PROVE PILOTA

5.2.1. Esposizione all'acqua dei lisimetri

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

I volumi dei percolati recuperati saranno uguali ai volumi irrigati, dedotta l'evaporazione che, nel nostro caso, non è trascurabile. Infatti, abbiamo optato per un'irrigazione semi continua : 180 ml ogni 30 minuti a 244 ml ogni 45 minuti. In questo caso la superficie dei lisimetri resta costantemente umida e partecipa al rilascio, ma anche all'evaporazione continua.

5.2.2. Esposizione all'acqua delle lastre

La procedura adottata per le lastre di materiale consiste nel coprirle con 10 mm d'acqua per 24 ore, una volta a settimana, per un apporto complessivo di 2 litri d'acqua a settimana per ciascuna lastra.

Il volume recuperato viene misurato per tenere il conto dell'evaporazione e dell'acqua d'infiltrazione. Questo procedimento è stato mantenuto finché le concentrazioni dei principali elementi non sono significativamente diminuite. In seguito, il tempo di contatto con l'acqua è stato aumentato a 48h ogni 15 giorni, sempre con 10 mm d'acqua, per dare il tempo alle lastre di ricaricare l'acqua dai pori e di ottenere concentrazioni misurabili degli elementi in traccia.

In questo caso, l'equivalente pluviometrico è di 150 l/m², ma tutta l'acqua resta a contatto con il materiale. Questa situazione rappresenta degli episodi di precipitazione frequente e una configurazione che consente il mantenimento di una lama d'acqua per una durata che va dalle 24 alle 48 ore. Il rilascio ottenuto è probabilmente equivalente a quello di alcuni anni in situazioni reali a seconda delle modalità di stima della pioggia efficace per una lastra.

5.2.3. Monitoraggio analitico

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

Tabella 56 - Calendario dei prelievi per le analisi chimiche

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

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

I parametri dell'analisi chimica monitorati sono:

- pH
- Conduttività
- Cloruri
- Solfati
- Fluoruri

- Antimonio (Sb)
- Arsenico (As)
- Bario (Ba)
- Cadmio (Cd)
- Cromo (Cr)
- Rame(Cu)
- Stagno (Sn)
- Mercurio (Hg)
- Molibdeno (Mo)
- Nichel (Ni)
- Piombo (Pb)
- Selenio (Se)
- Zinco (Zn)

5.2.4. Monitoraggio ecotossicologico

Gli eluti dei lisimetri e delle lastre sono stati sottoposti a un'analisi ecotossicologica su 3 prelievi durante le settimane successive :

Tabella 57 - Calendario dei prelievi per le analisi ecotossicologiche

semaines	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Essai écotoxicologique		2							mix 9 - 10					
semaines	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
Essai écotoxicologique								mix 23 à 26						

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

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

5.3. RISULTATI DEL MONITORAGGIO DEI LISIMETRI

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

In questo modo la nota informativa « Aide à la mise en œuvre du niveau 3 de caractérisation environnementale – Volet n°1 : les essais lysimétriques et plots expérimentaux » (Ausilio per l'attuazione del terzo livello di caratterizzazione ambientale - Parte prima : prove lisimetriche e plot sperimentali) ha fornito due serie di soglie, la prima espressa in concentrazioni massime e la seconda in massa complessiva rilasciata per unità di superficie.

I valori limite di concentrazione da non superare per un materiale alternativo impiegato nelle tecniche stradali, nell'ambito delle prove lisimetriche o dei plot sperimentali sono i seguenti :

Figura 30 – Valori limite di concentrazione

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

I limiti di emissione in superficie da non superare per un materiale alternativo impiegato nelle tecniche stradali nell'ambito delle prove lisimetriche o dei plot sperimentali sono i seguenti :

Figura 31 – Valori limite di emissione cumulativa in superficie

Paramètre	Quantité surfacique relarguée cumulée	
	Valeur (mg/m ²)	
As	10	} X $\min(d; \frac{P_{ef}}{P_{ref}})$
Ba	700	
Cd	4	
Cr total	50	
Cu	625	
Hg	1	
Mo	70	
Ni	20	
Pb	10	
Sb	5	
Se	6	
Zn	625	
Fluorure	750	
Chlorure	125 000	
Sulfate	125 000	

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

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

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

Nel nostro caso, la durata dell'esposizione presa come riferimento è la pluviometria annua e la pioggia efficace è quasi pari a 800 mm/anno. Il fattore correttivo è quindi 1. I limiti di emissione in superficie presentati nella tabella della figura 31 sono dunque quelli che si applicano per valutare l'accettabilità delle emissioni dei nostri lisimetri.

I risultati delle concentrazioni e delle emissioni in superficie dei diversi sedimenti testati sono presentati qui di seguito e fanno riferimento ai limiti di cui sopra. I risultati sono illustrati mettendo insieme i dati in base all'origine del sedimento. Così :

- Per Tolone : si tratta del lisimetro del sedimento di Tolone allo stato grezzo
- Per Centuri : si tratta dei lisimetri del sedimento di Centuri grezzo e trattato
- Per Cagliari : si tratta del lisimetro del sedimento di Cagliari allo stato grezzo
- Per Livorno : si tratta del lisimetro del sedimento di Livorno allo stato grezzo

Tutti i risultati sono presentati nelle tabelle e nei grafici in allegato.

Le abbreviazioni relative ai diversi sedimenti testati sono le seguenti :

Tolone grezzo lisimetro	(TBR)
Centuri grezzo lisimetro	(CBR)
Centuri trattato lisimetro	(CTR)
Cagliari grezzo lisimetro	(CagBr)
Livorno grezzo lisimetro	(Liv Br)

5.3.1. Monitoraggio del pH e della conduttività

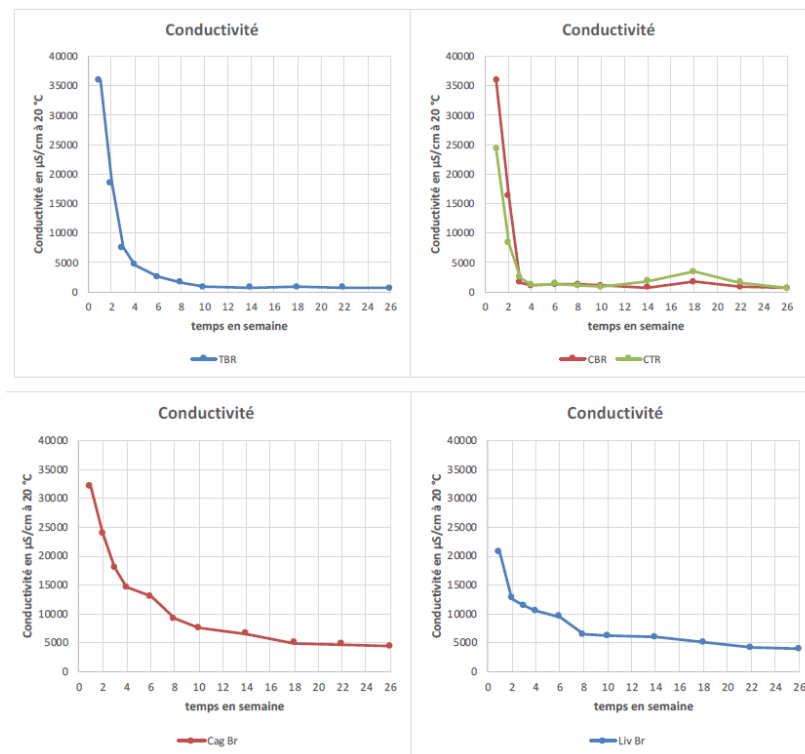
I sedimenti testati presentano tutti un pH relativamente stabile, compreso tra 7,5 e 8,5. Tra l'inizio e la fine del monitoraggio si può osservare una sensibile tendenza al rialzo. Questa tendenza indica una lenta dissoluzione dei carbonati.

Figura 32 – Evoluzione del pH degli eluti del lisimetro dei diversi sedimenti testati



Le curve di conduttività presentano un andamento simile. La conduttività diminuisce molto rapidamente già dai primi eluti dei sedimenti di Tolone e Centuri, e poi progressivamente per i sedimenti di Cagliari e Livorno.

Figura 33 – Evoluzione della conduttività degli eluti del lisimetro dei diversi sedimenti testati.



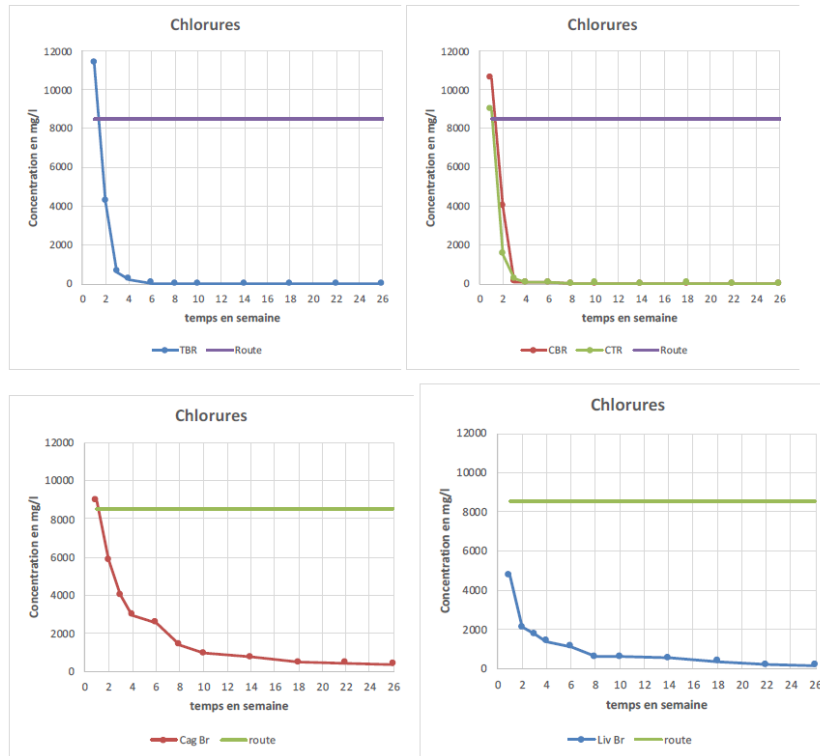
5.3.2. Controllo dei cloruri e dei solfati

➤ Risultati espressi in livelli di concentrazione

L'evoluzione delle concentrazioni di cloruri riflette quella della conduttività.

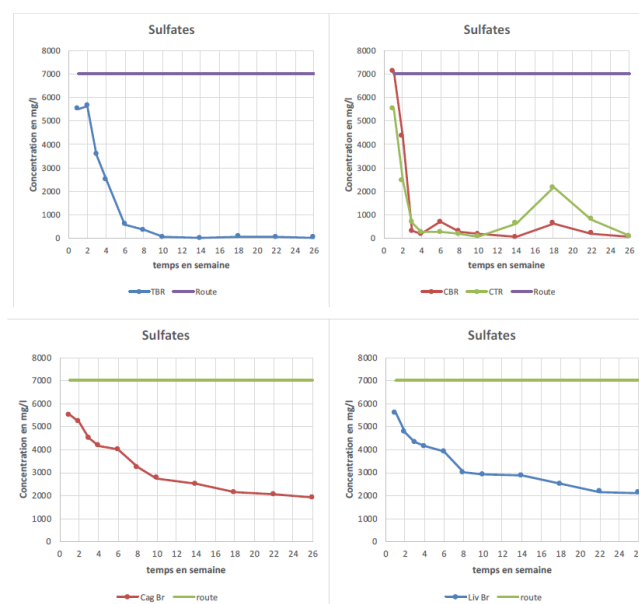
Soltanto il primo punto di prelievo dei lisimetri dei sedimenti di Tolone, Centuri grezzo, Centuri trattato e Cagliari grezzo supera i limiti consentiti per i cloruri.

Figura 34 – Evoluzione delle concentrazioni di cloruri negli eluiti del lisimetro dei diversi sedimenti testati



Soltanto il primo prelievo del lisimetri di Centuri grezzo supera la soglia di concentrazione per i solfati.

Figura 35 – Evoluzione delle concentrazioni di solfati negli eluiti del lisimetro dei diversi sedimenti testati

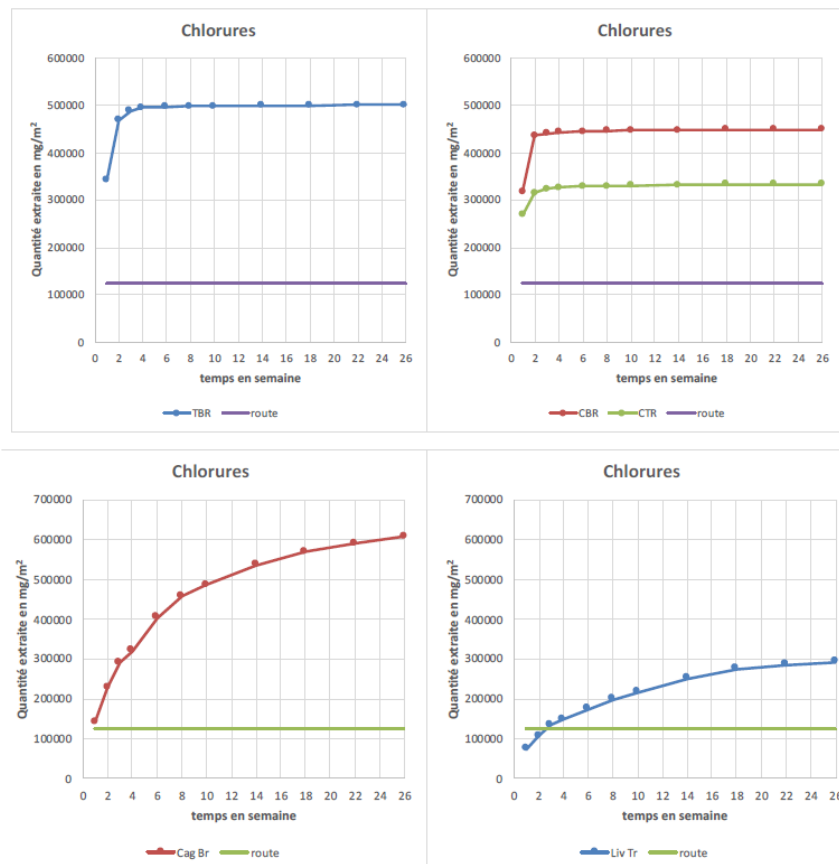


Nel caso dei sedimenti di Centuri (trattato e non trattato) e di Tolone, i lisimetri hanno subito un arresto di irrigazione tra la quattordicesima e la diciottesima settimana, il che può spiegare l'aumento delle concentrazioni di solfati negli eluiti dei sedimenti di Centuri grezzo e trattato osservato durante la diciottesima settimana.

➤ **Risultati espressi in quantità di emissioni cumulative in superficie**

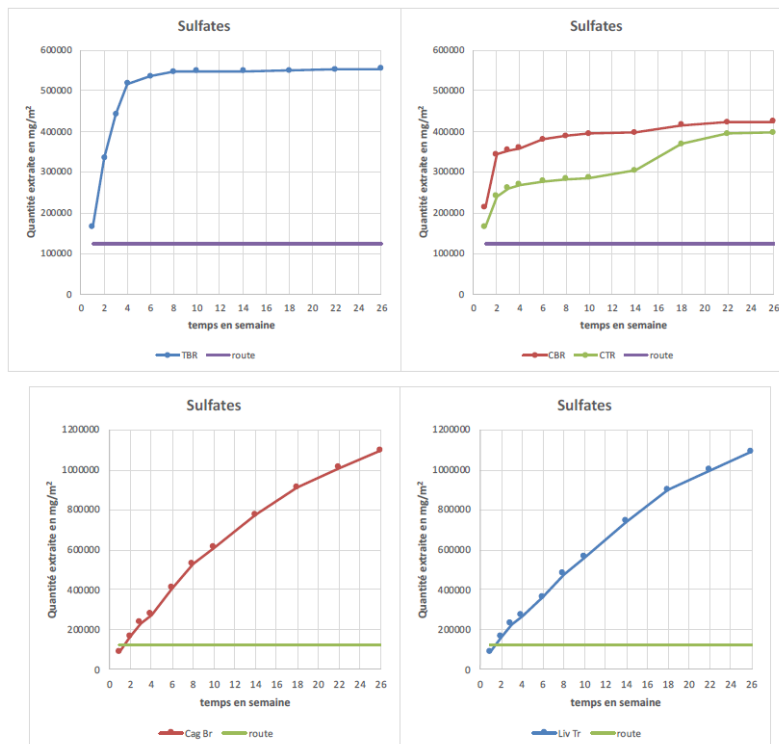
Ciascuno dei sedimenti testati presenta un superamento del valore limite di quantità di emissioni cumulative in superficie per i cloruri. Questo superamento è osservabile fin dal primo eluito per i sedimenti di Tolone, Centuri e Cagliari e a partire dal terzo eluito per il sedimento di Livorno.

Figura 36 – Evoluzione delle emissioni in superficie di cloruri negli eluiti del lisimetro dei diversi sedimenti testati



Ciascuno dei sedimenti testati presenta un superamento del valore limite di quantità di emissioni in superficie per i solfati. Tale sfioramento è osservabile fin dal primo eluito per i sedimenti di Tolone e Centuri e a partire dal secondo eluito per i sedimenti di Cagliari e Livorno.

Figura 37 – Evoluzione delle emissioni in superficie di solfati negli eluati del lisimetro dei diversi sedimenti testati



5.3.3. Monitoraggio dei metalli

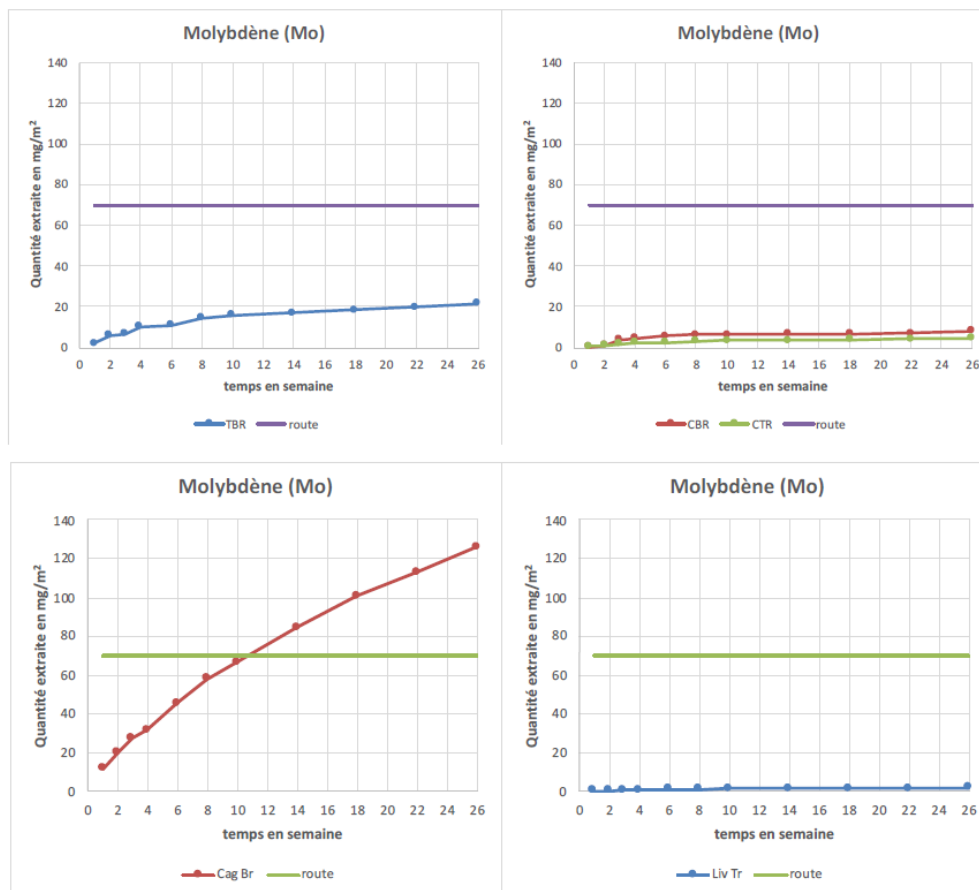
➤ Risultati espressi in concentrazioni

Le concentrazioni di metalli negli eluiti dei lisimetri sono di gran lunga inferiori ai valori limite. La rappresentazione grafica di tali concentrazioni è allegata al presente documento.

➤ **Risultati espressi in emissioni in superficie**

Il sedimento di Cagliari presenta un emissione in superficie di molibdeno superiore al valore limite di accettabilità per l'impiego nelle tecniche stradali. Tale superamento si è verificato dopo la decima settimana di monitoraggio. Gli altri sedimenti testati non presentano alcuno sfioramento per il molibdeno.

Figura 38 – Evoluzione delle emissioni in superficie di molibdeno negli eluiti del lisimetro dei diversi sedimenti testati



5.3.4. Monitoraggio ecotossicologico

Il monitoraggio della EC20 negli euiti dei lisimetri permette di osservare l'evoluzione dell'eventuale tossicità di tali percolati con l'avanzamento dell'esposizione all'infiltrazione dell'acqua.

Per la lettura di questi risultati bisogna ricordare che la tossicità è maggiore quando il valore di EC20 è basso, poiché si tratta della concentrazione di eluito che scatena l'inibizione della riproduzione del 20% della popolazione di *Brachionus calyciflorus* testata.

Tabella 58 - Risultati di determinazione della EC20 d'inibizione della riproduzione di *Brachionus calyciflorus* nei 3 eluiti di monitoraggio ecotossicologico

CE20	P2 (semaine 2)	P7 (semaines 9-10)	P11 (semaines 23 à 26)
Toulon Brut	7,7%	>90%	>90%
Centuri Brut	13%	>90%	>90%
Centuri Traité	23,6%	>90%	>90%
Cagliari Brut	>90%	>90%	>90%
Livourne Brut	>90%	>90%	>90%

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

La tossicità degli eluiti scompare nei prelievi successivi.

Bisogna evidenziare che, per ragioni amministrative, gli eluiti dei lisimetri dei sedimenti di Cagliari e Livorno sono stati conservati a +4°C per un periodo di tempo nettamente superiore alle 48h. Questo fatto deve portare a considerare i risultati con prudenza.

5.3.5. Sintesi dei risultati delle prove lisimetriche

I parametri che possono rendere le opere non conformi alle condizioni di accettabilità dal punto di vista ambientale per un reimpiego nelle tecniche stradali sono :

- I cloruri
- I solfati
- Il molibdeno (solo nel caso del sedimento di Cagliari)

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

Le condizioni specifiche d'impiego di questi materiali nelle opere marittime possono essere previste per i materiali che presentano un'emissione di cloruri superiore al livello di accettabilità per le opere terrestri. Le caratteristiche ambientali accettabili per le opere marittime restano tuttavia ancora da definire.

5.4. RISULTATI DEL MONITORAGGIO DELLE LASTRE SPERIMENTALI

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

I risultati sono presentati raggruppando i dati in base all'origine del sedimento. Così :

- per Tolone: si tratta delle lastre di calcestruzzo e di malta del sedimento Tolone grezzo e Tolone trattato
- per Centuri: si tratta delle lastre di malta del sedimento di Centuri grezzo e trattato
- per Cagliari: si tratta delle lastre di malta del sedimento di Cagliari grezzo e trattato
- per Livorno: si tratta delle lastre di calcestruzzo del sedimento di Livorno grezzo e trattato

Tutti i risultati sono presentati in allegato sotto forma di tabelle e grafici.

Le abbreviazioni dei diversi materiali testati sono le seguenti :

Calcestruzzo di controllo	(BTT)
Malta di controllo	(MTT)
Tolone grezzo calcestruzzo	(Tou BR B)
Tolone grezzo malta	(Tou BR M)
Tolone trattato calcestruzzo	(Tou TR B)
Tolone trattato malta	(Tou TR M)
Centuri grezzo malta	(Cor BR M)

- Centuri Trattato malta (Cor TR M)
- Cagliari grezzo malta (Cag Br M)
- Cagliari Trattato malta (Cag TR M)
- Livorno grezzo calcestruzzo (Liv Br B)
- Livorno trattato calcestruzzo (Liv TR B)

5.4.1. Monitoraggio del pH e della conduttività

Il pH è stato misurato in ciascun eluito di ogni materiale studiato. L'evoluzione dei valori nel corso del monitoraggio è presentata qui di seguito.

Figura 39 – Evoluzione del pH negli eluiti delle lastre dei diversi materiali testati



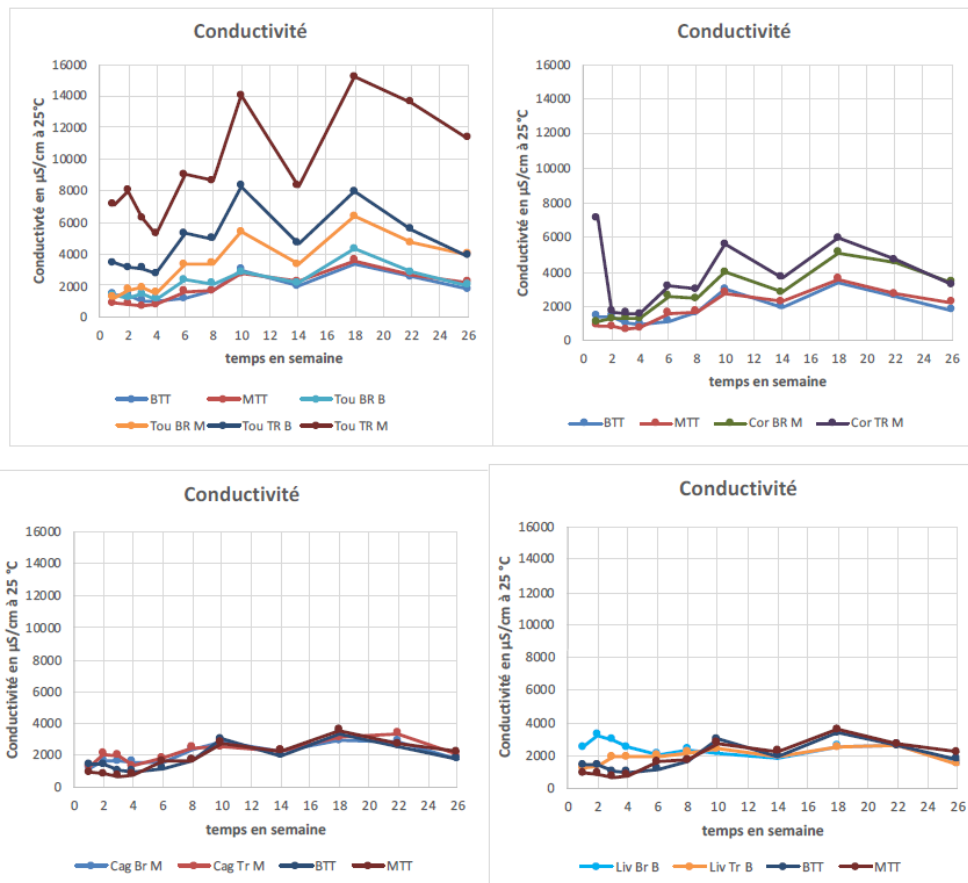
Gli eluiti delle lastre sperimentali presentano tutti un pH basico, compreso tra 9 e 10.5 per Tolone e Centuri e tra 8.5 e 10.5 per Cagliari e Livorno. Questi livelli di pH corrispondono a quelli osservati per i materiali di controllo. Rispecchiano l'effetto della matrice contenente elementi alcalini solubili in eccesso.

Benché le condizioni di esposizione con l'alternanza di umidificazione e di essiccamento fossero favorevoli alla carbonatazione, l'evoluzione del pH degli eluiti non presenta alcun segno evidente di carbonatazione (diminuzione del pH) durante il periodo di monitoraggio.

Il valore della conduttività elettrica è stato misurato in ciascuno degli eluiti di ciascun materiale studiato.

L'evoluzione di tali valori durante il periodo di monitoraggio è presentata qui sotto.

Figura 40 – Evoluzione della conduttività negli eluiti delle lastre dei diversi materiali testati



Gli eluiti delle lastre sperimentali presentano dei livelli di conduttività elettrica diversi gli uni dagli altri : i materiali di controllo sono quelli che mostrano il minor livello di conduttività, insieme a quelli realizzati con i sedimenti di Cagliari e di Livorno.

In compenso, la malta e il calcestruzzo ottenuti con il sedimento di Tolone trattato presentano una conduttività significativamente elevata rispetto ai controlli.

Le malte con sedimenti di Tolone grezzo, Centuri grezzo e Centuri trattato mostrano invece un livello di conduttività intermedio.

Tali valori sono da correlare ai livelli di concentrazione di sali negli eluiti di questi materiali.

Si ricorda che le formulazioni a base di sedimenti trattati contengono una proporzione più importante di sedimenti di quelle a base di sedimenti grezzi.

5.4.2. Monitoraggio dei cloruri e dei solfati

➤ Risultati espressi in concentrazioni

L'evoluzione delle concentrazioni di cloruri rispecchia quella della conduttività. In effetti, gli eluiti della malta e del calcestruzzo del sedimento di Tolone trattato, identificati come quelli con la conduttività più elevata sono anche quelli che contengono le maggiori concentrazioni di cloruri.

Figura 41 – Evoluzione della concentrazione di cloruri negli eluiti delle lastre dei diversi materiali testati



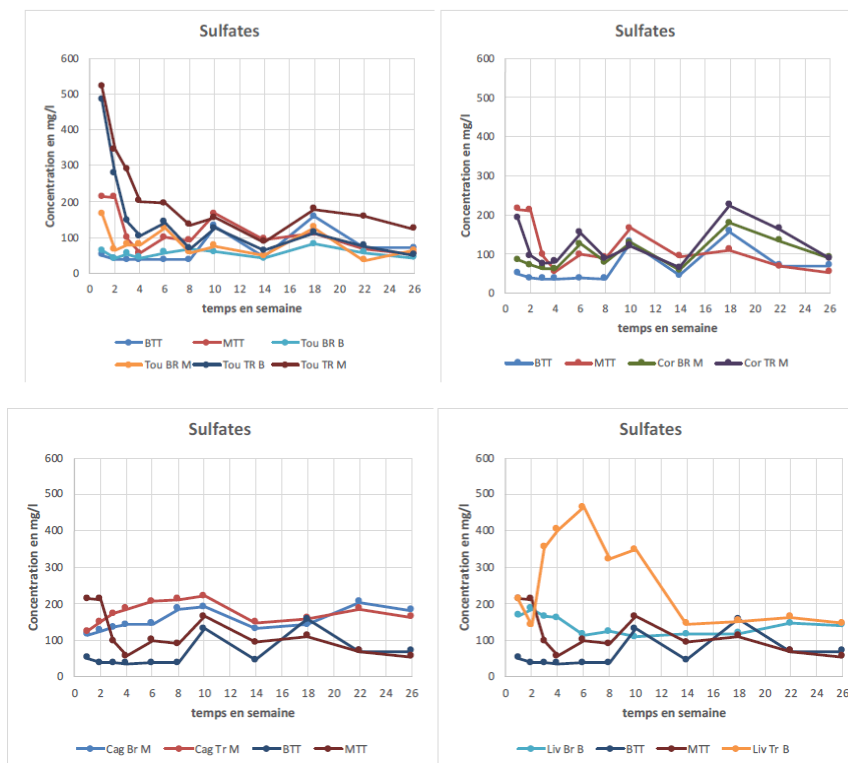
Il sedimento di Tolone presenta una texture particolarmente fine rispetto agli altri sedimenti, il che può essere all'origine di una maggiore ritenzione di cloruri per assorbimento. La malta e il calcestruzzo trattengono poco questi anioni.

La differenza tra le emissioni delle formulazioni con i sedimenti Tolone grezzo e Tolone trattato può derivare dal fatto che il sedimento Tolone trattato non è stato sottoposto a lagunaggio ed è stato trattato direttamente dopo il prelievo in ambiente marino. Il sedimento Tolone grezzo è stato invece lagunato, poi stoccato a terra e infine esposto al risciacquo con acqua piovana. La malta realizzata con sedimenti trattati contiene una proporzione maggiore di sedimento (42%) di quella realizzata con il sedimento grezzo.

Le concentrazioni di solfati degli eluiti delle lastre dei materiali contenenti sedimenti sono relativamente simili a quelle degli eluiti delle lastre di controllo, fatta eccezione dei primi punti di monitoraggio delle lastre di malta e calcestruzzo del sedimento di Tolone trattato.

Le ipotesi formulate per spiegare l'emissione di cloruri di tali materiali possono spiegare anche la quantità superiore di emissioni di solfati.

Figura 42 – Evoluzione delle concentrazioni di cloruri negli eluiti delle lastre dei diversi materiali testati



Nel caso dei calcestruzzi realizzati con il sedimento di Livorno trattato, livelli di emissione di solfati significativamente superiori a quelli dei controlli sono stati osservati tra la seconda e la quattordicesima settimana. Questo fenomeno non è osservabile nella formulazione di malta. Può trattarsi dell'effetto di eterogeneità del sedimento (effetto pepita) o di una reazione particolare nel corso del processo di maturazione del calcestruzzo. Il livello di emissioni di solfati del calcestruzzo del sedimento di Livorno trattato si avvicina a quello dei controlli a partire dalla quattordicesima settimana di esposizione.

➤ **Risultati espressi in emissioni in superficie**

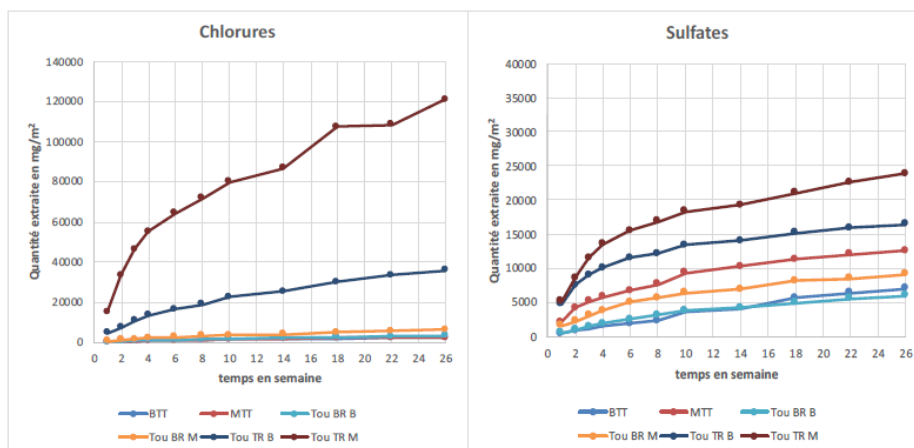
Ciascuno dei materiali a base di sedimenti testati presenta emissioni in superficie di cloruri superiori a quelle dei materiali di controllo. La malta e il calcestruzzo del sedimento di Tolone trattato sono quelli che presentano i livelli maggiori di emissione.

Per il resto della presentazione dei risultati, e per questioni di leggibilità, abbiamo scelto di orientare l'interpretazione sui risultati delle emissioni dei materiali realizzati con il sedimento di Tolone (trattato e grezzo).

L'emissione di cloruri della malta e del calcestruzzo del sedimento di Tolone trattato è superiore a quelle dei materiali a base del sedimento di Tolone grezzo e ai materiali di controllo.

La formulazione di malta presenta un livello di emissioni in superficie di cloruri più elevato di quello della formulazione di calcestruzzo.

Figura 43 – Evoluzione delle emissioni in superficie di cloruri e solfati negli eluiti delle lastre dei diversi materiali ricavati dai sedimenti di Tolone



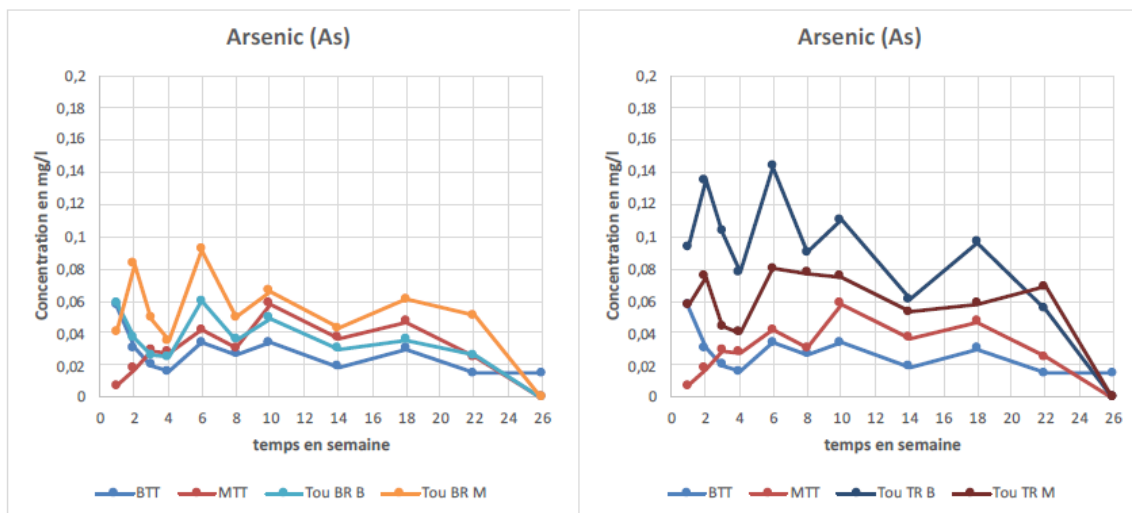
5.4.3. Monitoraggio dei metalli

➤ Risultati espressi in concentrazioni

Nel complesso, le concentrazioni di metalli negli eluiti delle lastre di materiali ricavati da sedimenti sono molto scarse e vicine a quelle degli eluiti delle lastre dei materiali di controllo. La rappresentazione grafica è allegata al presente documento.

Si osservano, tuttavia, concentrazioni superiori a quelle dei materiali di controllo, nel caso dell'arsenico, per i materiali realizzati con il sedimento di Tolone, grezzo e trattato.

Figura 44 – Evoluzione delle concentrazioni di arsenico negli eluiti delle lastre realizzate con i sedimenti di Tolone grezzo (a sinistra) e trattato (a destra)



La prova di caratterizzazione della capacità di neutralizzazione tra acidi e basi e dell'influenza del pH sul comportamento alla soglia di lisciviazione dei sedimenti, realizzata nell'ambito delle caratterizzazioni preliminari, mostra che il sedimento di Tolone presenta una scarsa capacità di neutralizzazione delle basi e che la solubilità dell'arsenico può raggiungere 0,1 mg/l con pH 11.

Dato che il pH della soluzione interstiziale della malta e del calcestruzzo si aggira intorno a 12,5, questo livello di concentrazione può essere superato.

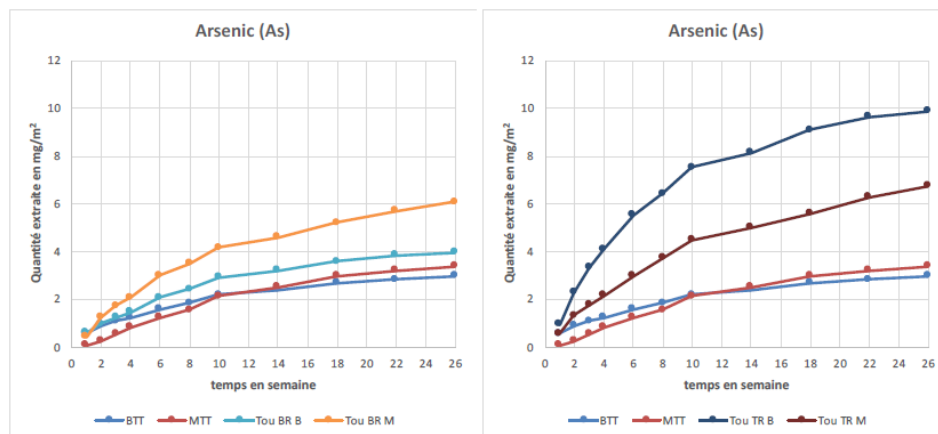
La formula della malta sembra stabilizzare meglio l'arsenico di quella del calcestruzzo.

Lo stesso fenomeno è stato osservato per il molibdeno negli stessi materiali.

➤ **Risultati espressi in emissioni in superficie**

L'espressione della quantità di emissioni in superficie permette di evidenziare in maniera ancor più netta le differenze di emissione dell'arsenico.

Figura 45 – Evoluzione delle emissioni in superficie di arsenico negli eluiti delle lastre dei diversi materiali ricavati dal sedimento grezzo (a sinistra) e trattato (a destra) di Tolone



Questi risultati presentano la stessa tendenza di quelli osservati per i cloruri e i solfati, con un livello di emissione superiore per i materiali a base di sedimenti trattati rispetto ai materiali a base di sedimenti grezzi.

5.4.4. Monitoraggio ecotossicologico

Il monitoraggio della EC20 negli eluiti delle lastre di materiali realizzati con sedimenti e di quelli di controllo consente di osservare l'evoluzione dell'eventuale tossicità dei percolati con l'avanzamento dell'esposizione all'acqua.

Per la lettura di questi risultati bisogna ricordare che la tossicità è maggiore quando il valore di EC20 è basso, poiché si tratta della concentrazione di eluito che scatena l'inibizione della riproduzione del 20% della popolazione di *Brachionus calyciflorus* testata.

Tabella 59 - Risultati di determinazione della EC20 d'inibizione della riproduzione di *Brachionus calyciflorus* nei 3 eluti di monitoraggio ecotossicologico

CE20	P2 (semaine 2)	P7 (semaines 9-10)	P11 (semaines 23 à 26)
Témoïn Béton	>90%	18,1%	>90%
Témoïn Mortier	>90%	24,1%	>90%
Toulon Brut Béton	>90%	40,3%	>90%
Toulon Brut Mortier	>90%	23%	>90%
Toulon Traité Béton	>90%	16,9%	>90%
Toulon Traité Mortier	>90%	11,2%	18,2%
Corse Brut Mortier	>90%	22,3%	>90%
Corse Traité Mortier	>90%	20,8%	41,9%
Cagliari brut mortier	>90%	>90%	>90%
Cagliari traité mortier	>90%	>90%	>90%
Livourne brut béton	>90%	>90%	>90%
Livourne traité béton	>90%	>90%	>90%

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

I livelli di tossicità osservati nel prelievo intermedio dei materiali a base di sedimenti differiscono solo leggermente da quelli di controllo. Si tratta dunque, almeno in parte, di un effetto dovuto alla matrice cementizia. Ciononostante, il caso della malta e del calcestruzzo a base di sedimento di Tolone trattato, identificato tra l'altro come quello che presenta il maggior livello di emissioni di cloruri, solfati, arsenico e molibdeno, si distingue dagli altri materiali per un livello di tossicità superiore e prolungato nel tempo (malta Tolone trattato).

Bisogna evidenziare che, per ragioni amministrative, gli eluti dei lisimetri dei sedimenti di Cagliari e Livorno sono stati conservati a +4°C per un periodo di tempo nettamente superiore alle 48h. Questo fatto deve portare a considerare i risultati con prudenza.

5.4.5. Sintesi dei risultati delle prove sulle lastre sperimentali

I parametri che possono rendere le opere non conformi alle condizioni di accettabilità ambientale per il reimpiego in materiali come malta e calcestruzzo sono :

- I cloruri
- L'arsenico e il molibdeno nel caso del sedimento di Tolone trattato, in particolare nella formulazione di malta.

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

Le condizioni specifiche d'impiego di questi materiali in opere marittime possono essere previste per i materiali che presentano emissioni di cloruri superiori a quelli dei materiali di controllo. Le caratteristiche di accettabilità ambientale per le opere marittime restano tuttavia da definire.

6. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

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

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

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

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

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

Al momento, l'elaborazione dei materiali di costruzione utilizzando il sedimento in sostituzione parziale della sabbia non è oggetto di nessuna procedura di valutazione, né in Francia né in Italia. Per questo, è stato condotto uno studio di formulazione, con l'obiettivo di incorporare nella formulazione di malta per il riempimento di trincee e in quella di calcestruzzo comune sedimenti di dragaggio marino, alcuni dei quali sono stati trattati mediante separazione su vagli con maglie diverse, ai fini della valutazione della loro accettabilità ambientale.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ANNEXES / ALLEGATI

**ANNEXE 1 : RÉSULTATS DE SUIVI DES LYSIMÈTRES DE SÉDIMENTS ITALIENS
(CAGLIARI, LIVOURNE)**

**ALLEGATO 1: RISULTATI DEL MONITORAGGIO DEI LISIMETRI DEI SEDIMENTI
ITALIANI (CAGLIARI, LIVOURNE)**

LIVOURNE BRUT LYSIMÈTRE (LIV BR)

		Référence :	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			7,8	8	7,8	8,0	8,0	7,9	8,1	8,1	8,2	8,3	8,2
Conductivité	µS/cm à 20° c		20600	12600	11400	10400	9390	6390	6170	5940	4970	4150	3830
Chlorures	mg/l	1	4720	2120	1760	1400	1140	607	623	556	374	218	179
Sulfates	mg/l	5	5580	4740	4320	4130	3900	2990	2900	2870	2490	2160	2110
Fluorures	mg/l	0,1	0,81	0,79	0,72	0,73	0,79	0,69	0,68	0,64	0,65	0,66	0,64
Antimoine (Sb)	mg/l	0,02	0,0024 8	0,0023 4	0,0032 2	0,003 0,003	0,0027 7	0,0015	0,0016 8	0,0017 2	0,0015 7	0,0014 1	0,0015 5
Arsenic (As)	mg/l	0,005	0,002	0,0009 7	0,0011 2	0,0009 9	0,0011 1	0,0007 2	0,0008 2	0,0010 4	0,0010 4	0,0012	0,0011
Baryum (Ba)	mg/l	0,005	0,0722	0,0431	0,0482	0,0426	0,0371	0,0307	0,0326	0,0335	0,0347	0,0414	0,0417

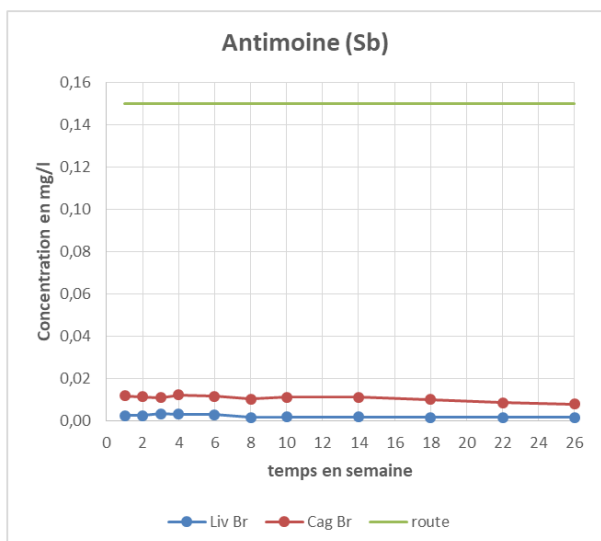
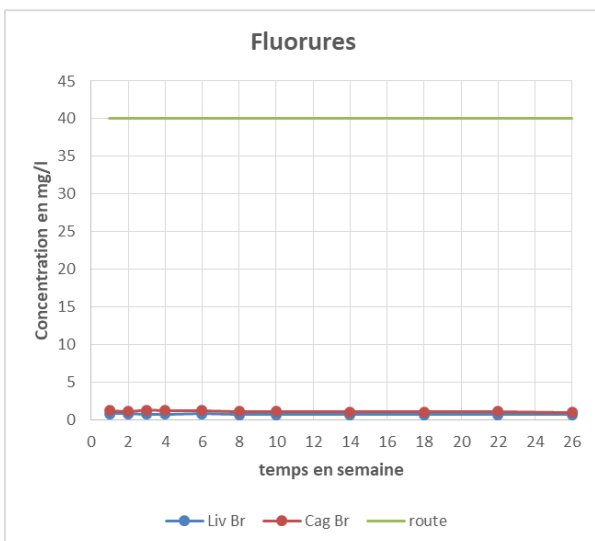
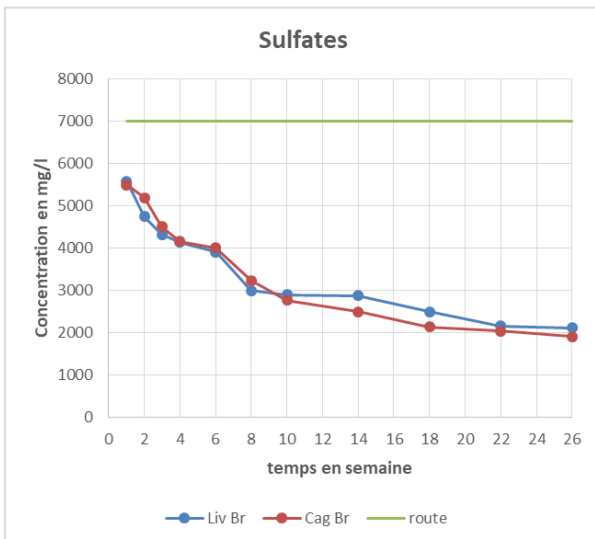
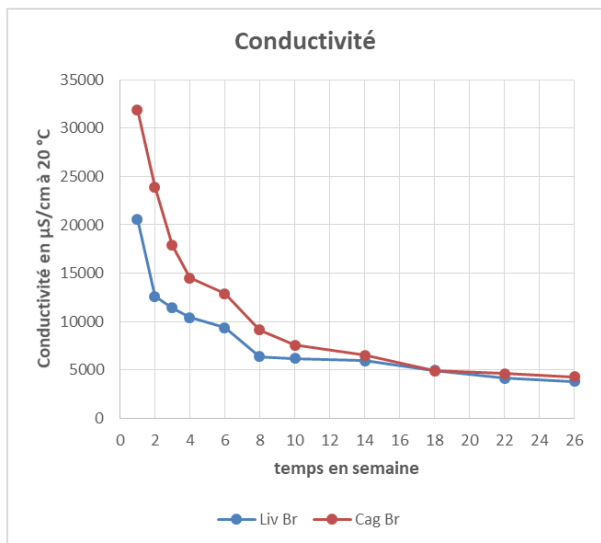
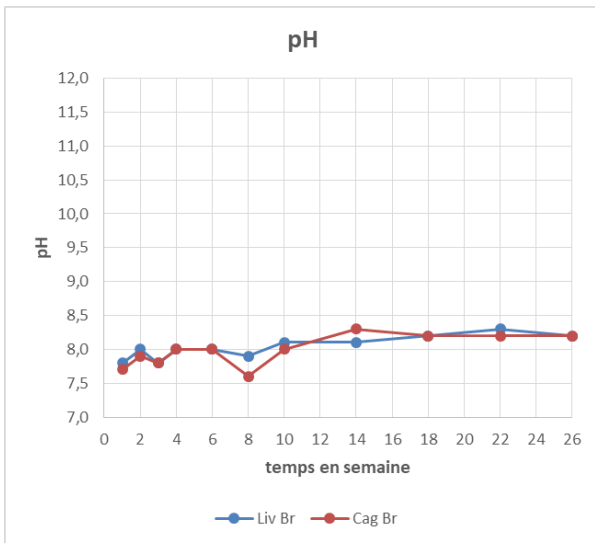
Cadmium (Cd)	mg/l	0,005	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,0056	0,0047 8	0,0076	0,0032 6	0,0030 1	0,0024 1	0,0022 2	0,0023 4	0,0014 5	0,0006 3	0,0005 8
Cuivre (Cu)	mg/l	0,01	0,015	0,0112	0,0108	0,0097 3	0,0099 5	0,0082 4	0,0085	0,0097 2	0,0106	0,0061 1	0,0068 7
Etain (Sn)	mg/l	0,0000	<0,01	0,0103	<0,01	<0,01	0,004	0,0021	0,0026	0,0023	0,0017	0,0039	0,0019
Mercure (Hg)	mg/l	0,0000	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,0106	0,0075 8	0,0072 3	0,0061	0,0233	0,0027 6	0,0022 4	0,0018 6	0,0016	0,0021 2	0,0024 7
Nickel (Ni)	mg/l	0,005	<0,02	0,0028	0,0027	0,0027	0,003	0,0023	0,0032	0,0025	0,0025	0,002	0,002
Plomb (Pb)	mg/l	0,005	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5
Sélénium (Se)	mg/l	0,01	<0,000 5	0,0014 6	0,0010 9	0,0010 2	0,0006 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5
Zinc (Zn)	mg/l	0,02	<0,05	0,0212	0,019	0,0133	0,0256	0,0132	0,0218	0,0116	0,0135	<0,005	0,0071

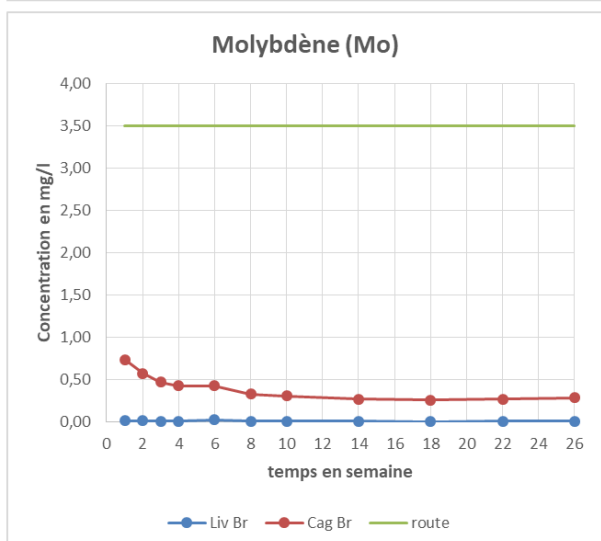
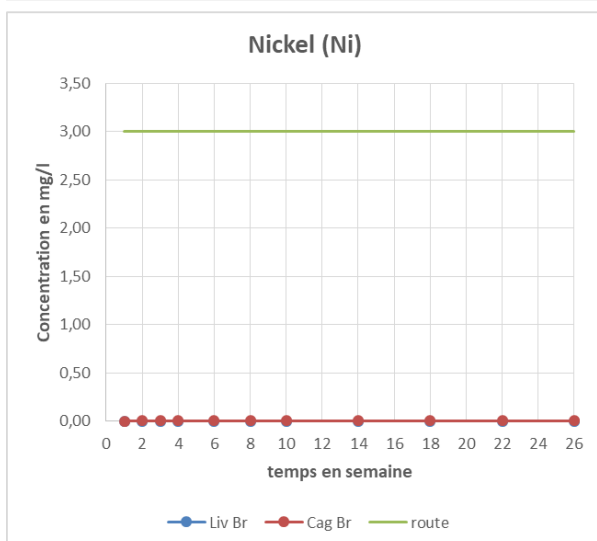
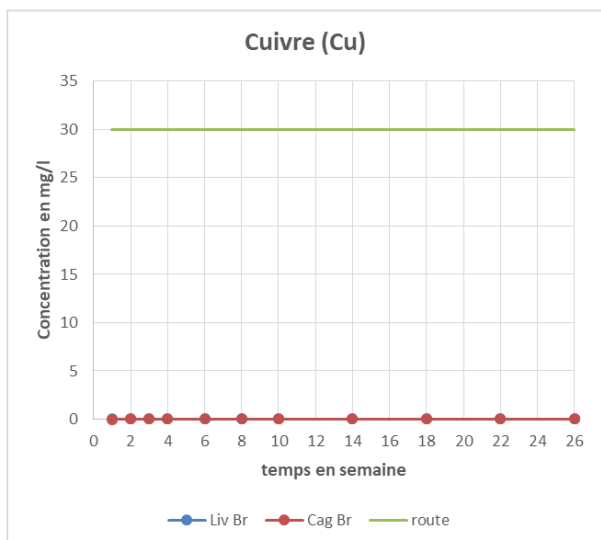
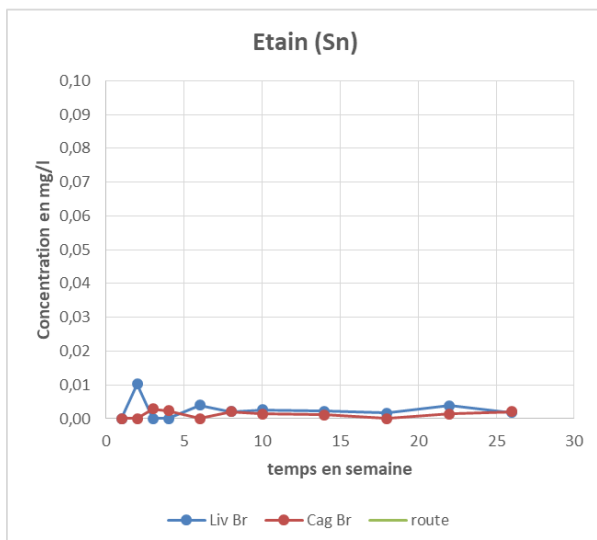
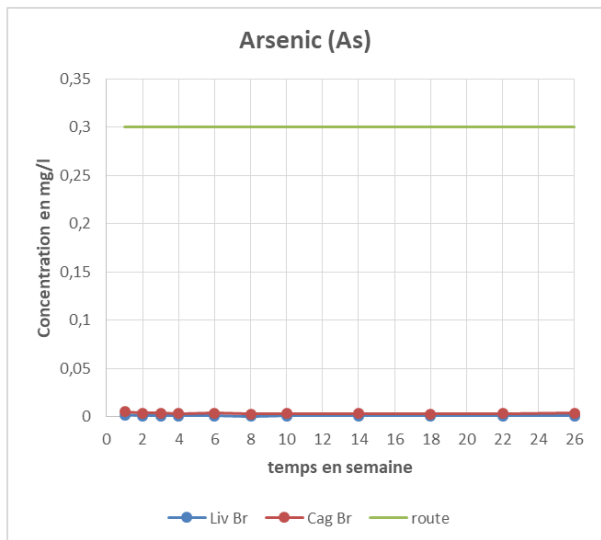
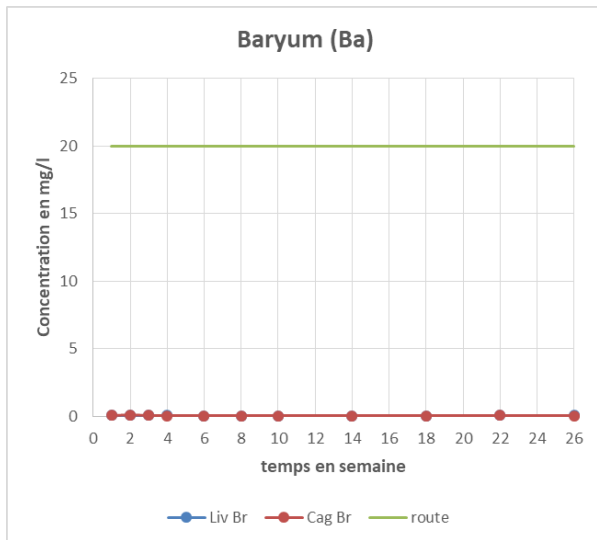
CAGLIARI BRUT LYSIMÈTRE (Cag Br)

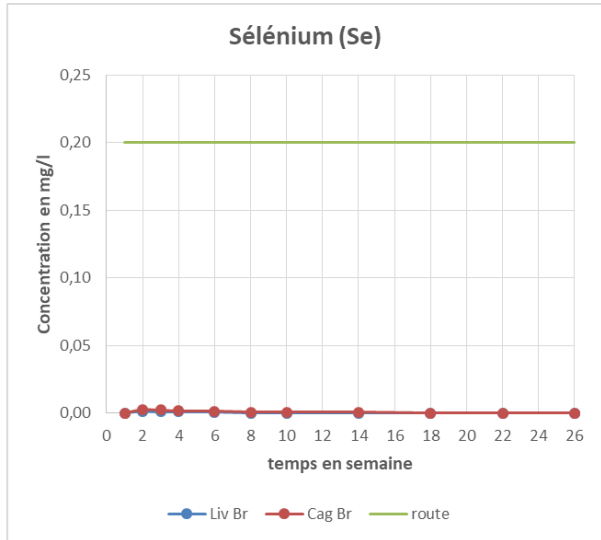
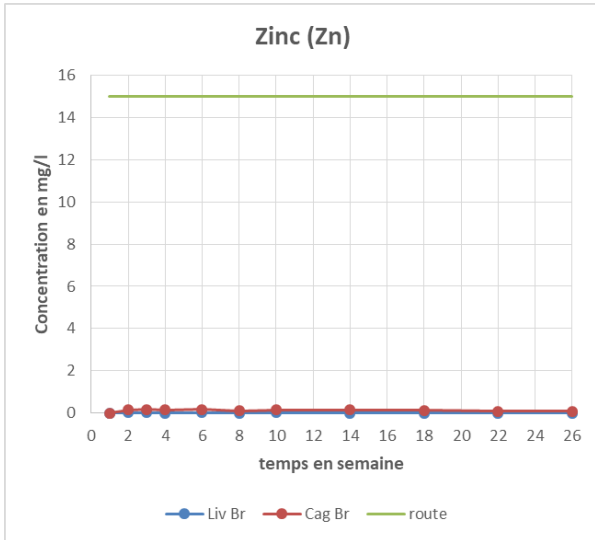
		Référence	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			7,7	7,9	7,8	8,0	8,0	7,6	8	8,3	8,2	8,2	8,2
Conductivité	µS/cm à 20° c		31900	23900	17900	14500	12900	9140	7550	6520	4910	4640	4280
Chlorures	mg/l	1	8960	5870	4030	2970	2550	1410	958	765	493	455	385
Sulfates	mg/l	5	5490	5190	4500	4160	4000	3230	2760	2490	2130	2040	1910
Fluorures	mg/l	0,1	1,2	1,1	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1	1	1,1	0,99
Antimoine (Sb)	mg/l	0,02	0,0117	0,0113	0,0109	0,0121	0,0114	0,0101	0,011	0,0111	0,00987	0,00844	0,00775
Arsenic (As)	mg/l	0,005	0,00552	0,00399	0,00405	0,00362	0,00388	0,00314	0,00335	0,00326	0,00296	0,00345	0,00387

Baryum (Ba)	mg/l	0,005	0,0469	0,0738	0,0468	0,0361	0,0305	0,0281	0,0278	0,0266	0,0283	0,0397	0,0353
Cadmium (Cd)	mg/l	0,005	0,0187	0,0070 2	0,0047 9	0,0036 6	0,0035 7	0,0020 2	0,0023 8	0,0022 2	0,0016 5	0,0012 5	0,0011 2
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,005	0,0011	0,0009 4	0,0006 5	0,0009 9	0,0006 0,0006	0,0007 1	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5
Cuivre (Cu)	mg/l	0,01	0,001	0,0281	0,0268	0,024	0,0245	0,0192	0,0173	0,0161	0,0154	0,0124	0,0136
Etain (Sn)	mg/l	0,0010	<0,01	<0,01	0,0029	0,0024	<0,01	0,0021	0,0014	0,0011	<0,001	0,0014	0,0021
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,733	0,569	0,467	0,426	0,421	0,328	0,305	0,265	0,254	0,264	0,281
Nickel (Ni)	mg/l	0,005	<0,02	0,0084	0,0085	0,0077	0,0082	0,0071	0,0065	0,006	0,0058	0,0055	0,0055
Plomb (Pb)	mg/l	0,005	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5
Sélénium (Se)	mg/l	0,01	<0,000 5	0,0027 1	0,0023 4	0,0017 1	0,0013 4	0,0008 6	0,0008 7	0,0006 4	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5
Zinc (Zn)	mg/l	0,02	0,001	0,145	0,167	0,147	0,175	0,121	0,154	0,16	0,136	0,0806	0,097

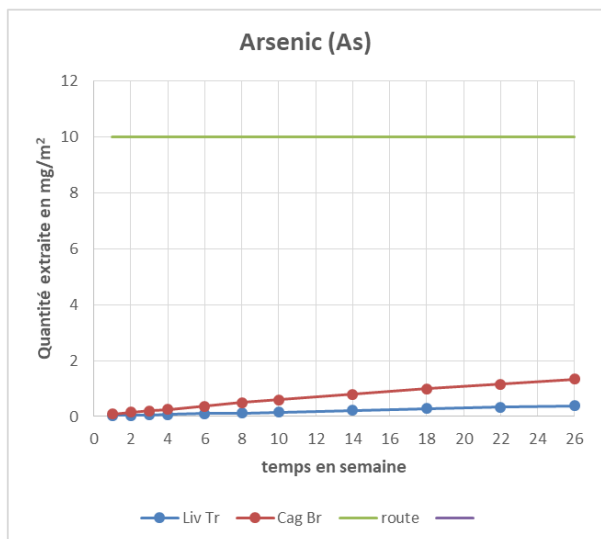
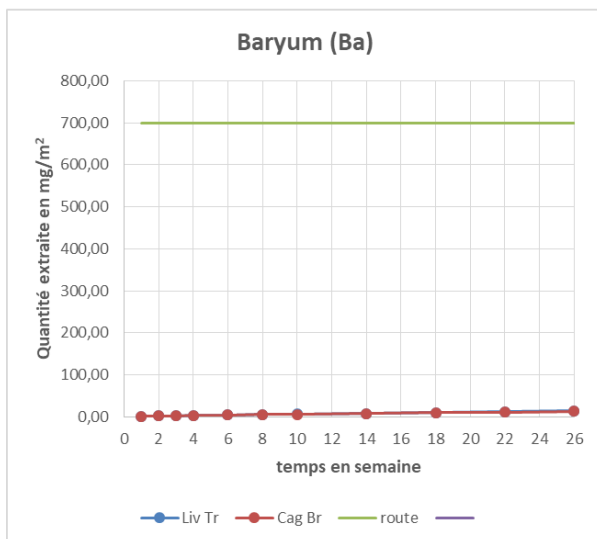
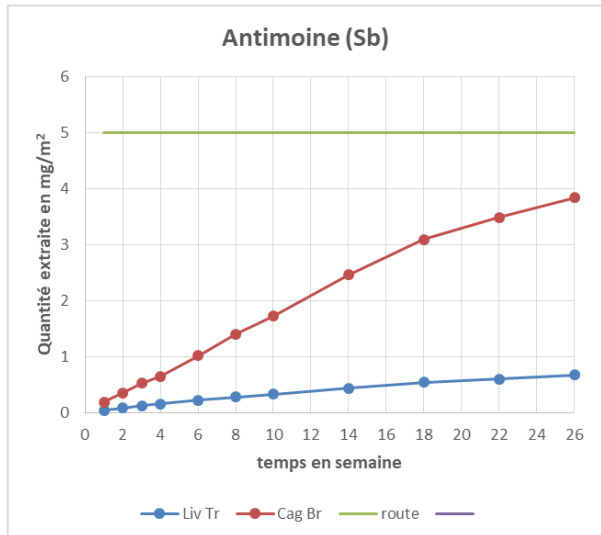
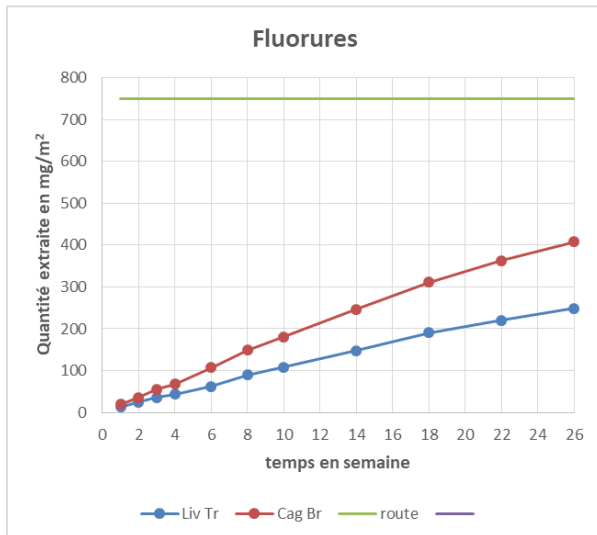
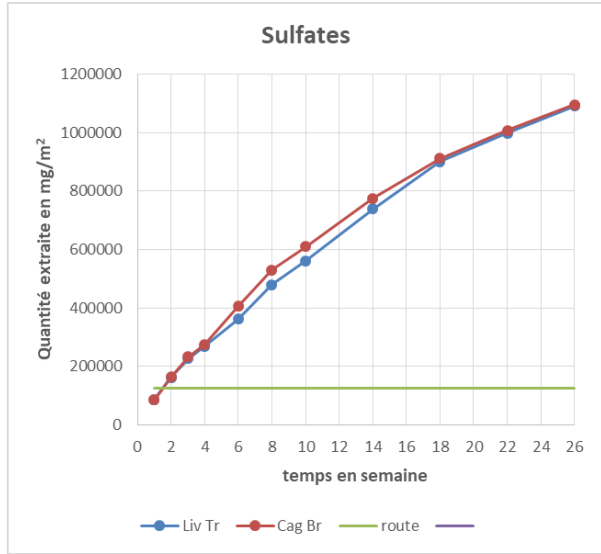
RESULTATS DE SUIVI DE LA CONCENTRATION (MG/L)

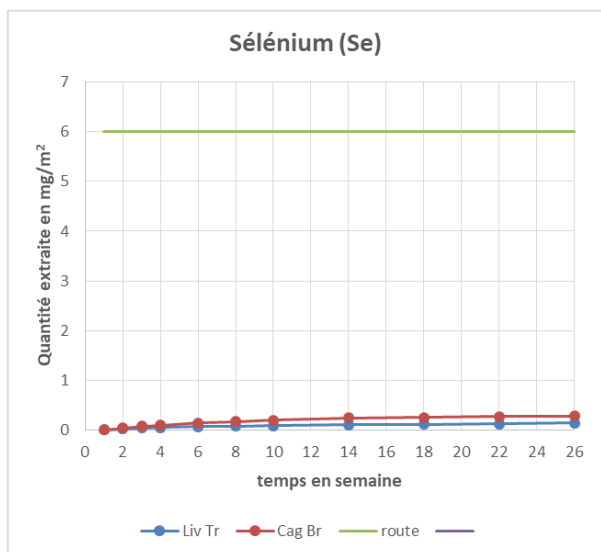
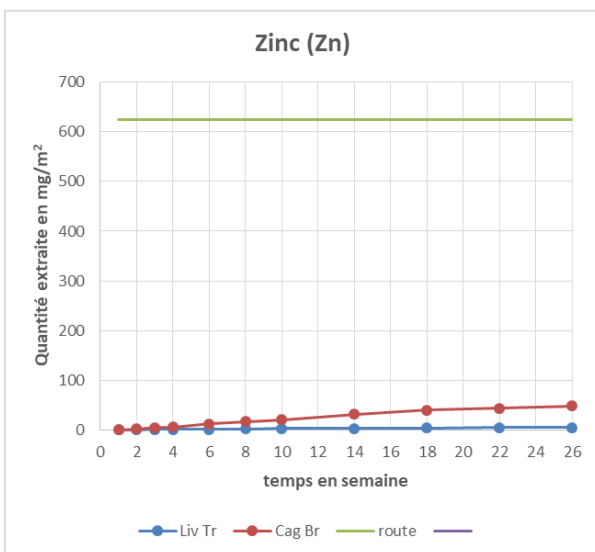
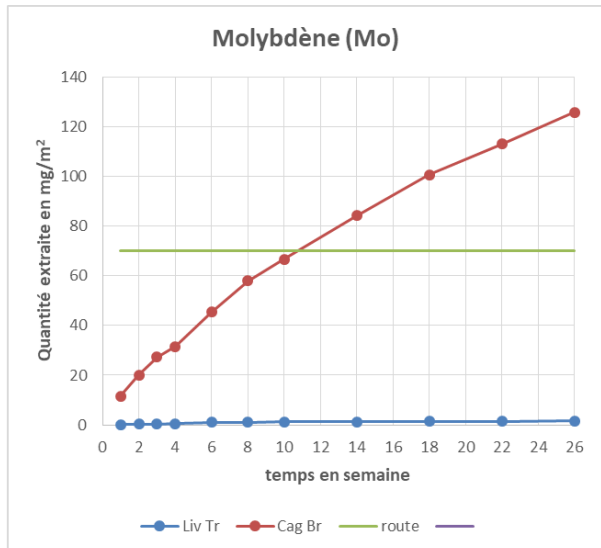
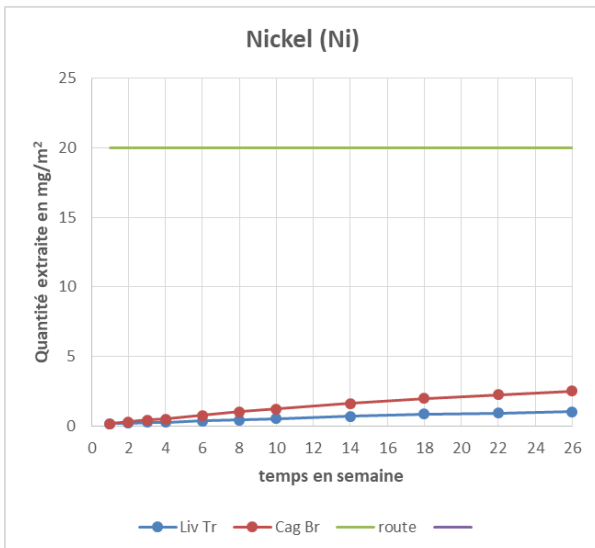
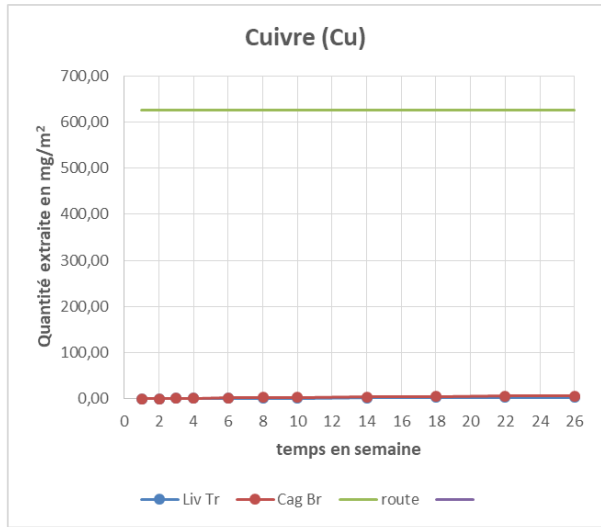
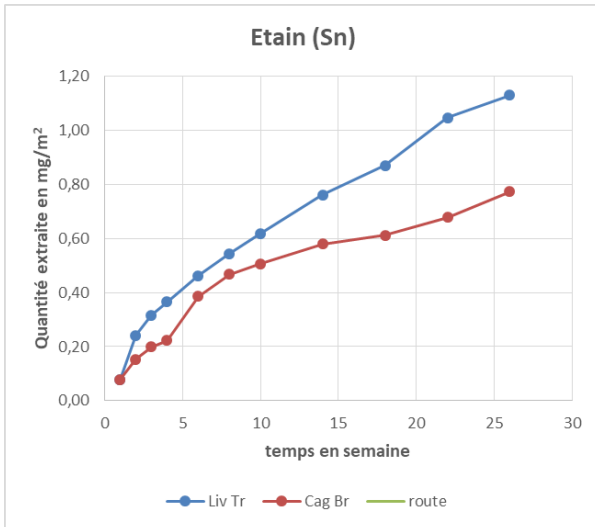






Résultats de suivi du relargage surfacique (mg/m²)





ANNEXE 2 : RÉSULTATS DE SUIVI DES DALLES DES SÉDIMENTS ITALIENS (CAGLIARI, LIVOURNE)

ALLEGATO 2: RISULTATI DEL MONITORAGGIO DELLE LASTRE DI SEDIMENTO ITALIANE (CAGLIARI, LIVORNO)

CAGLIARI BRUT MORTIER (Cag Br M)

		Référenc e :	1	2	3	4	6	8	10	14	18	22	26
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 14	à S15 18	à S19 22	à S23 26
pH			8,5	9,4	8,7	8,6	8,7	9,5	9,6	9,3	9,7	9,4	8,9
Conductivité	µS/cm à 20° c		1180	1680	1610	1580	1560	2390	2870	2230	2890	2850	1780
Chlorures	mg/l	1	84	91,5	100	102	94,3	110	115	98,9	112	139	114
Sulfates	mg/l	5	114	125	135	142	145	185	192	132	143	205	181
Fluorures	mg/l	0,1	2,8	2,3	1,3	1,2	1	1,7	1,8	1,1	1,2	1	0,54
Antimoine (Sb)	mg/l	0,02	0,0061 3	0,00642	0,00443	0,00457	0,00437	0,0078	0,00936	0,00646	0,00792	0,00634	0,0033
Arsenic (As)	mg/l	0,005	0,0144	0,0208	0,0138	0,0128	0,0147	0,0361	0,0498	0,026	0,0248	0,0227	0,00953
Baryum (Ba)	mg/l	0,005	0,0147	0,0099	0,00996	0,0146	0,012	0,00902	0,0258	0,0214	0,071	0,0237	0,0089

Cadmium (Cd)	mg/l	0,005	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,0151	0,0204	0,0159	0,0159	0,0181	0,0268	0,025	0,0118	0,0159	0,0142	0,0079
Cuivre (Cu)	mg/l	0,01	0,0303	0,0612	0,0601	0,0654	0,0863	0,171	0,26	0,162	0,245	0,302	0,116
Etain (Sn)	mg/l	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,00889	0,0101	0,00841	0,0089	0,0106	0,0137	0,0183	0,00905	0,0153	0,0134	0,00662
Nickel (Ni)	mg/l	0,005	0,0096	0,0231	0,02	0,0215	0,0289	0,0632	0,14	0,0981	0,168	0,205	0,0692
Plomb (Pb)	mg/l	0,005	0,0005	0,0005	0,0005	0,00161	0,0005	0,0005	0,00067	0,0005	0,00086	0,00081	0,0005
Sélénium (Se)	mg/l	0,01	0,00088	0,00091	0,00057	0,0005	0,0005	0,00149	0,00203	0,00106	0,00149	0,00141	0,00055
Zinc (Zn)	mg/l	0,02	0,005	0,005	0,005	0,0287	0,005	0,0074	0,013	0,0164	0,0221	0,0404	0,017

CAGLIARI TRAITÉ MORTIER (Cag Tr M)

		Référence :	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			8,5	9,6	8,8	8,5	8,8	9,6	9,5	9,4	9,6	9,6	9,3
Conductivité	μS/cm à 20° c		1280	2070	1980	1310	1840	2470	2530	2290	3130	3350	2060
Chlorures	mg/l	1	86,9	98,8	109	109	98,9	111	122	101	126	146	114
Sulfates	mg/l	5	124	150	173	185	207	212	221	149	160	185	164
Fluorures	mg/l	0,1	3,6	2,8	1,8	2	1,5	2	1,7	1,2	1,6	1,8	1,1
Antimoine (Sb)	mg/l	0,02	0,0109	0,0104	0,00972	0,00971	0,00812	0,0127	0,0145	0,0118	0,0177	0,0126	0,00793
Arsenic (As)	mg/l	0,005	0,0287	0,0332	0,0283	0,028	0,0259	0,0378	0,0439	0,0321	0,0447	0,0349	0,0164
Baryum (Ba)	mg/l	0,005	0,0191	0,0386	0,0169	0,052	0,00656	0,00729	0,00759	0,0203	0,0276	0,0169	0,00855
Cadmium (Cd)	mg/l	0,005	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,0156	0,0204	0,0189	0,0214	0,0245	0,026	0,0306	0,0202	0,028	0,0115	0,00514
Cuivre (Cu)	mg/l	0,01	0,0362	0,115	0,0526	0,0866	0,0536	0,0873	0,123	0,114	0,231	0,199	0,0887
Etain (Sn)	mg/l	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,0137	0,015	0,0162	0,0173	0,0209	0,0202	0,0239	0,0157	0,026	0,0225	0,0114
Nickel (Ni)	mg/l	0,005	0,0098	0,0213	0,0144	0,0176	0,0165	0,0269	0,0445	0,0388	0,0861	0,097	0,04
Plomb (Pb)	mg/l	0,005	0,0005	0,0055	0,0009	0,00758	0,0005	0,0005	0,0005	0,00067	0,00106	0,00067	0,0005
Sélénium (Se)	mg/l	0,01	0,0018	0,00176	0,00141	0,00139	0,00129	0,00223	0,0023	0,00148	0,00205	0,00174	0,00083
Zinc (Zn)	mg/l	0,02	0,005	0,132	0,0156	0,17	0,005	0,005	0,0202	0,0112	0,0173	0,0186	0,0127

LIVOURNE BRUT BÉTON (Liv Br B)

		Référence	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			9,6	9,7	9,4	9,2	9	9,4	9,6	9,4	10,1	10,3	9,3
Conductivité	μS/cm à 20° c		2520	3240	2930	2480	2060	2370	2130	1880	2550	2660	1530
Chlorures	mg/l	1	294	369	346	340	209	187	170	130	185	214	142
Sulfates	mg/l	5	167	185	166	162	114	124	108	116	119	147	140
Fluorures	mg/l	0,1	1,8	1,5	1	0,95	0,62	0,78	0,62	0,88	0,6	0,57	0,34
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,00551	0,00445	0,00455	0,00454	0,0032	0,00402	0,00296	0,00327	0,0026	0,0022	0,00119
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,0422	0,0466	0,041	0,0398	0,0254	0,023	0,0149	0,0199	0,0113	0,00994	0,00621
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,0156	0,254	0,0328	0,0255	0,0102	0,0109	0,025	0,0438	0,122	0,189	0,02

Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Chrome (Cr)	mg/l	0,0005	0,037	0,0439	0,0335	0,0327	0,0169	0,0164	0,0113	0,0157	0,00968	0,00711	0,00341
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,0577	0,141	0,0912	0,0871	0,0629	0,0683	0,053	0,0399	0,0864	0,107	0,0593
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,0002	0,0218	0,0249	0,0205	0,0206	0,0106	0,00984	0,00707	0,00716	0,00862	0,00871	0,00464
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,0171	0,0322	0,0294	0,0304	0,0255	0,0256	0,0194	0,0141	0,0358	0,0471	0,0221
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	0,00061	0,0112	0,00272	0,00129	0,0005	0,0005	0,0005	0,00057	0,00157	0,0026	0,0005
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,00165	0,00216	0,00138	0,00125	0,00078	0,0009	0,0006	0,00081	0,00078	0,00088	0,0005
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,0062	0,172	0,0459	0,0182	0,005	0,005	0,005	0,0097	0,0126	0,033	0,0073

LIVOURNE TRAITÉ BÉTON (Liv Tr B)

		Référence	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			8,4	8,6	8,6	8,5	8,4	9	9	9,5	9,9	10,1	9,2
Conductivité	μS/cm à 20° c		1230	1380	1920	1930	1980	2130	2380	1950	2510	2600	1450
Chlorures	mg/l	1	72,9	73	89,6	90,5	85,5	95,4	95	105	99,8	113	96,4
Sulfates	mg/l	5	212	141	355	402	465	323	349	144	152	163	147
Fluorures	mg/l	0,1	2,1	2,1	1,5	1,4	1,2	3,2	3	1,6	2,2	1,5	0,74
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,00383	0,00342	0,00407	0,00379	0,00397	0,00983	0,01	0,00579	0,00698	0,00404	0,0023
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,00483	0,00693	0,0157	0,0134	0,0117	0,0296	0,0598	0,0381	0,0538	0,0361	0,0165
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,0269	0,0123	0,018	0,0205	0,0201	0,0244	0,0269	0,0854	0,159	0,352	0,0336

Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Chrome (Cr)	mg/l	0,0005	0,0517	0,0325	0,0521	0,0536	0,0639	0,065	0,0763	0,0305	0,0357	0,0203	0,00797
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,0239	0,022	0,0262	0,0257	0,0199	0,0389	0,0439	0,038	0,0462	0,067	0,0353
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,0002	0,0117	0,00842	0,0201	0,0229	0,0244	0,0195	0,0247	0,012	0,0128	0,01	0,00441
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,0054	0,0058	0,006	0,0067	0,0052	0,0087	0,0112	0,0133	0,0222	0,0404	0,0209
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	0,0005	0,0005	0,00142	0,00155	0,0005	0,0005	0,0007	0,00054	0,00068	0,00153	0,0005
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,0005	0,00069	0,00133	0,00131	0,00151	0,00134	0,00192	0,00104	0,00111	0,00091	0,0005
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,0119	0,0053	0,0306	0,0334	0,005	0,005	0,0124	0,0153	0,018	0,0322	0,0066

BÉTON TÉMOIN (BTT)

		Référence :	1	2	3	4	6	8	10	14	18	22	26
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			10,09	9,91	9,9	9,84	9,56	9,74	9,36	9,195	9,82	9,73	9,515
Conductivité	μS/cm à 20° c		1419,6	1412,2	1019	981,5	1169,7	1663,3	3017	1949,5	3378,5	2574,5	1775,5
Chlorures	mg/l	1	26	23	22,1	22,1	20,2	21,6	22,9	23,5	19,1	14,1	14,1
Sulfates	mg/l	5	50,5	38,4	37,3	36,4	37,8	37,5	131	45,5	158	69,7	69,7
Fluorures	mg/l	0,1	1,7	1,3	0,86	0,7	0,98	0,89	1,3	0,81	1,5	1,1	1,1
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,0078 3	0,0054 6	0,005	0,0038 2	0,0067 3	0,0051 6	0,0099 9	0,0056 1	0,0086 6	0,0064 4	0,0064 4
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,057	0,031	0,02	0,016	0,034	0,027	0,034	0,019	0,03	0,015	0,015
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,012	0,024	0,0036 9	0,006	0,0026 6	0,0035 1	0,02	0,032	0,058	0,023	0,023

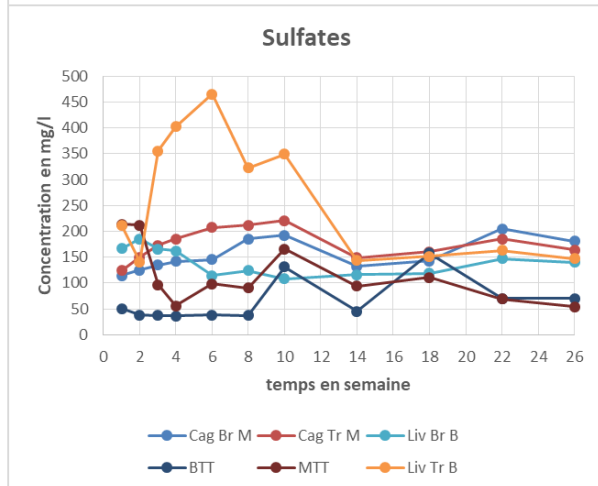
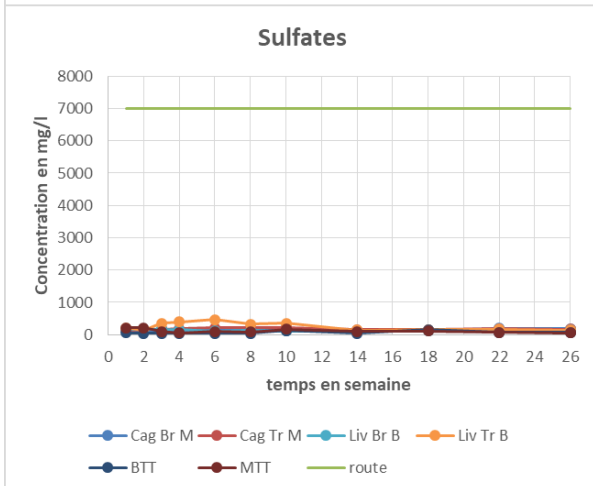
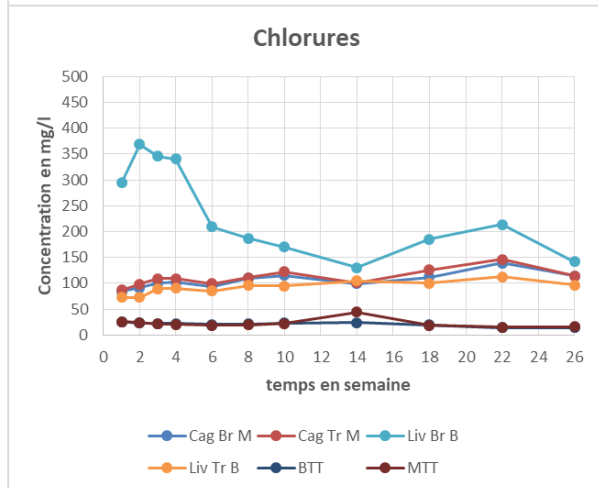
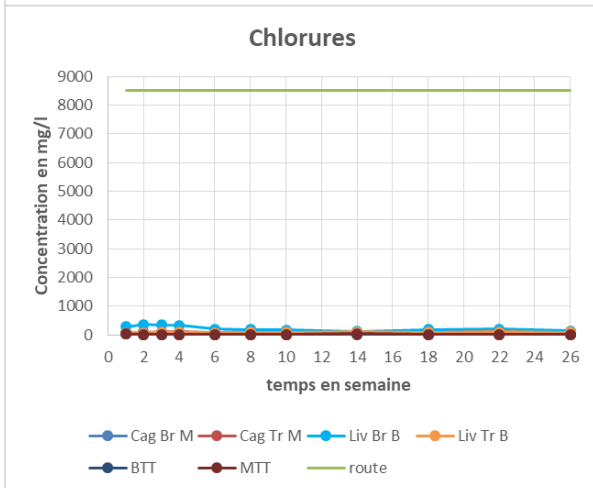
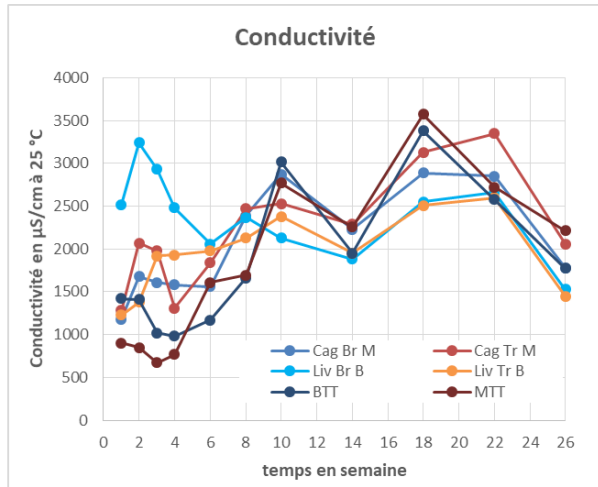
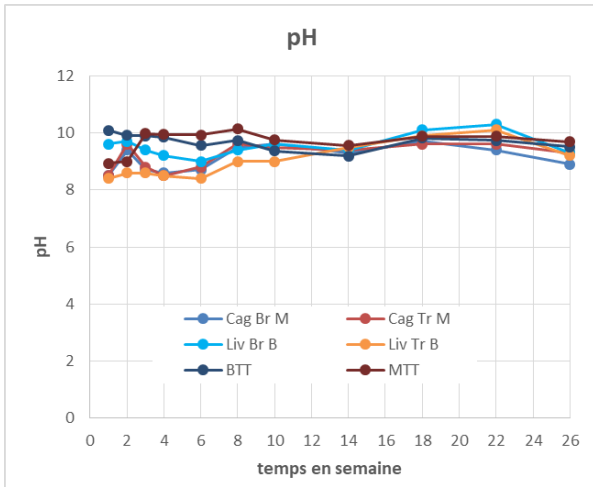
Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,023	0,011	0,012	0,009	0,016	0,013	0,034	0,013	0,058	0,019	0,019
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,0094 3	0,0069 6	0,0060 7	0,0080 6	0,02	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,0011	0,001	0,001	0,02	0,008	0,0021	0,01	0,04	0,001	0,001	0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,05	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,071	0,03	0,008	0,008	0,014	0,014	0,051	0,025	0,088	0,047	0,047
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,02	0,002	0,0022	0,0039	0,0039
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0014	0,0005	0,0005	0,005	0,0005 7	0,0008 5	0,0008 1	0,0008 1
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,01	0,0005	0,0005	0,0005	0,0006	0,0005	0,005	0,0005	0,0020 6	0,0010 1	0,0010 1
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,005	0,0108	0,005	0,04	0,005	0,005	0,05	0,0172	0,0197	0,0093	0,0093

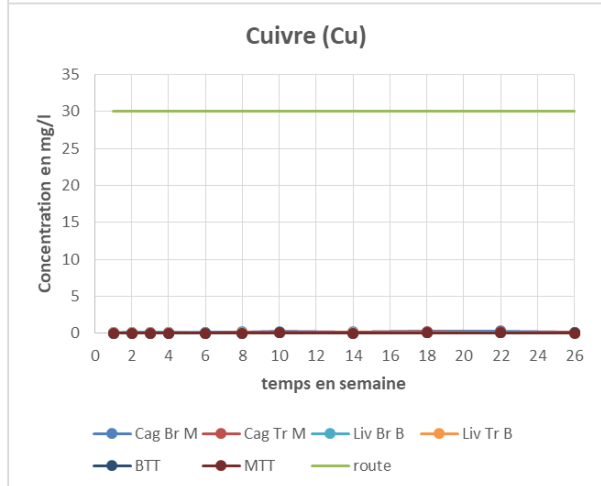
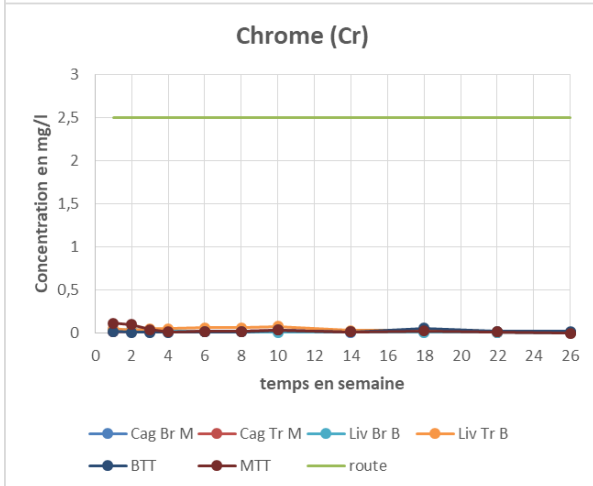
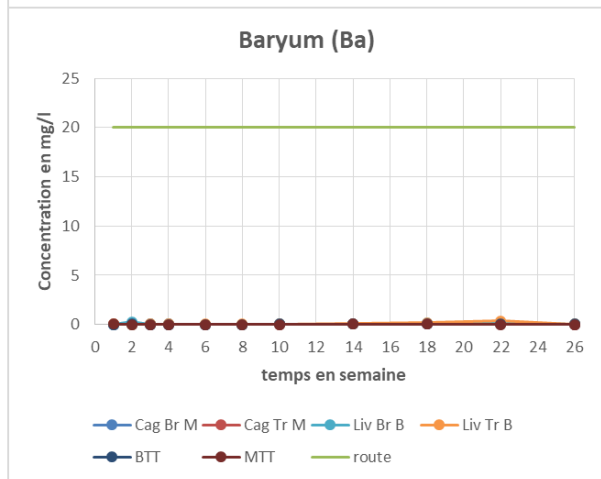
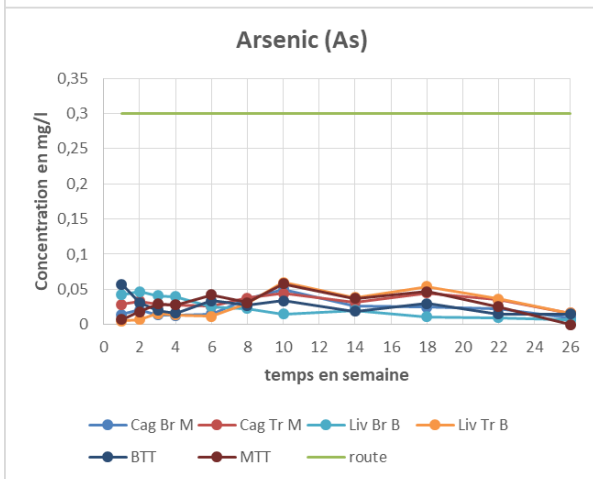
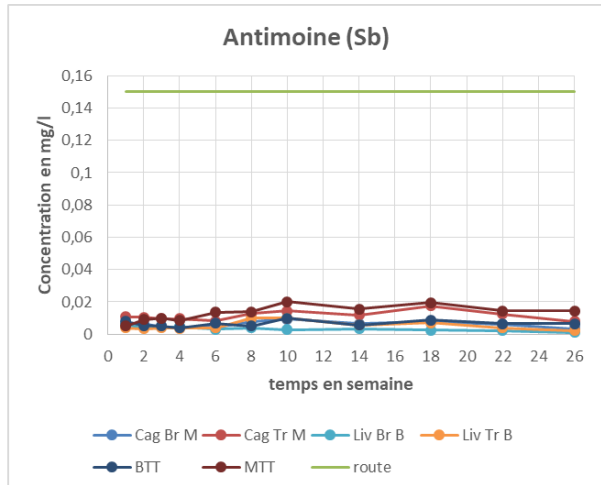
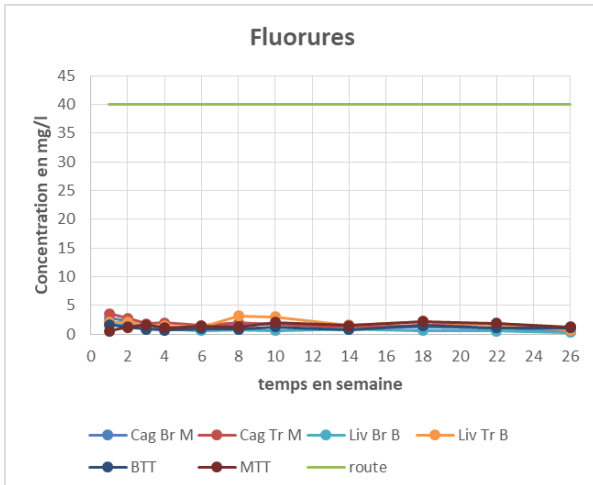
MORTIER TÉMOIN (MTT)

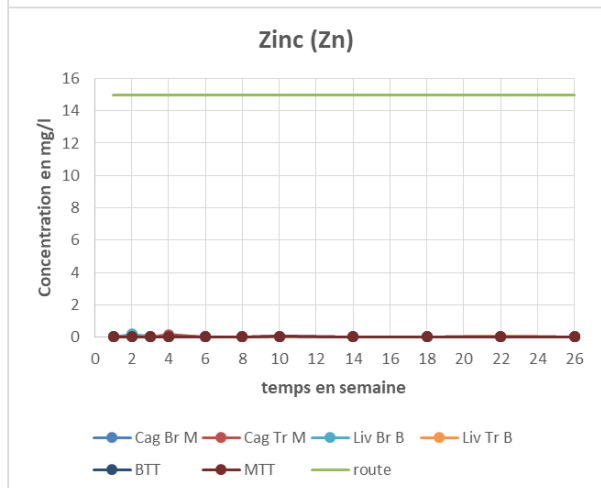
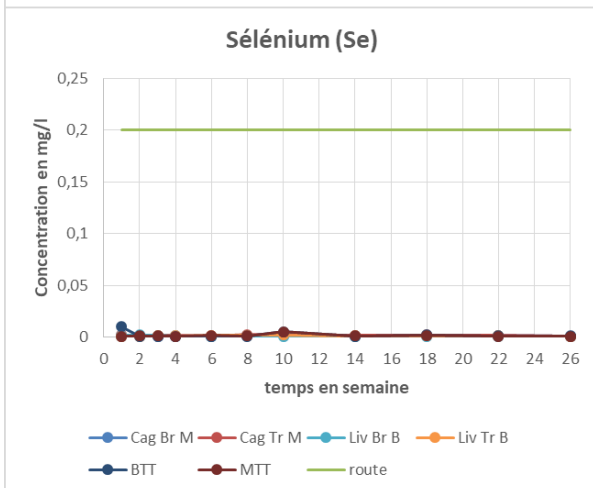
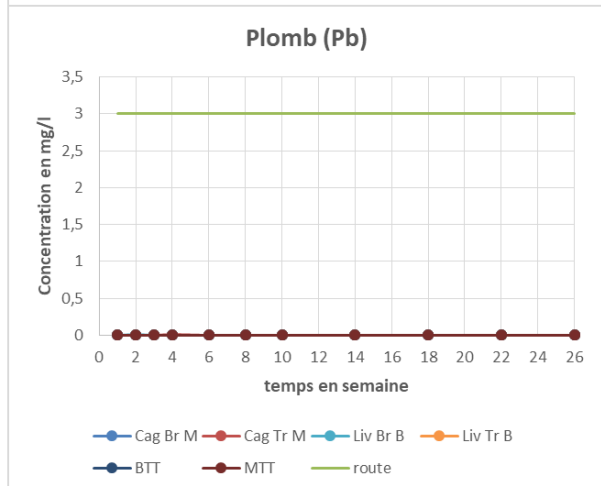
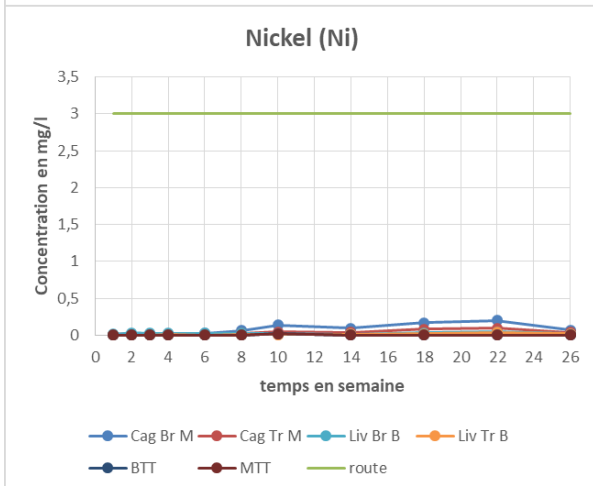
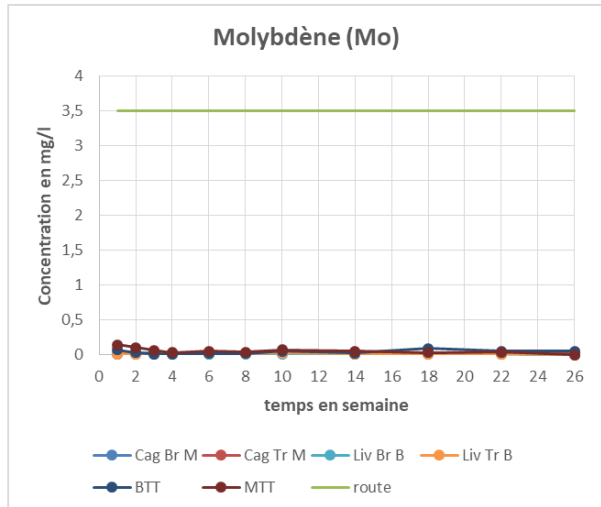
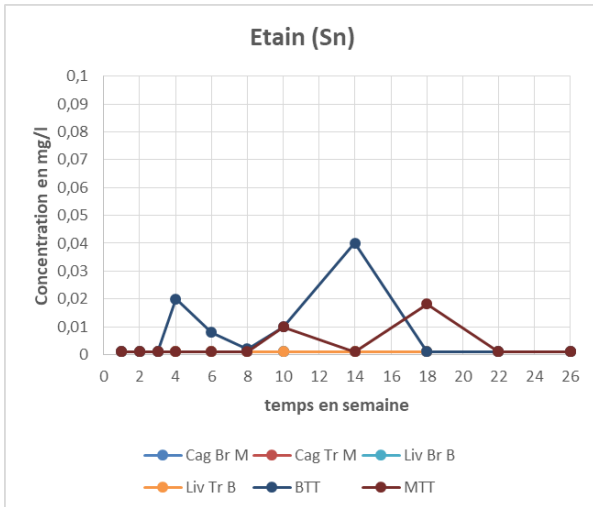
		Référence :	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			8,94	8,99	9,98	9,95	9,93	10,14	9,75	9,565	9,875	9,885	9,685
Conductivité	μS/cm à 20° c		903,5	850,4	674	766	1610,9	1692	2767,6 9	2258,5	3571,5	2719	2215,5
Chlorures	mg/l	1	25,9	23,5	21,7	20,8	18,6	19,7	22,4	43,9	18,9	15,2	16,2
Sulfates	mg/l	5	214	212	96,9	56	98,7	90,5	166	93,5	111	69	53,7
Fluorures	mg/l	0,1	0,53	1,2	1,7	1,1	1,4	1,3	2,1	1,5	2,2	1,9	1,3
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,0050 8	0,0089 4	0,0098 6	0,0084 7	0,0136	0,014	0,02	0,0157	0,0197	0,0145	0,0145
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,007	0,018	0,029	0,028	0,042	0,031	0,058	0,037	0,047	0,025	0,016
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,038	0,016	0,0051 1	0,007	0,006	0,008	0,011	0,029	0,06	0,006	0,033

Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002 7	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,002	0,0002	0,0002	0,0002	0,005
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,114	0,101	0,044	0,017	0,023	0,018	0,035	0,016	0,026	0,015	0,011
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,0088 5	0,0087 5	0,02	0,01	0,02	0,02	0,04	0,02	0,03	0,04	0,03
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,001	0,0182	0,001	0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,05	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,139	0,102	0,061	0,027	0,048	0,039	0,071	0,053	0,032	0,039	0,026
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,0044	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,02	0,002	0,0032	0,002	0,005
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	0,0005	0,0005	0,0006 4	0,0005	0,0005	0,0005	0,005	0,0005	0,0005 4	0,0005	0,005
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,0008 5	0,0010 4	0,0009 8	0,0006 5	0,0013 8	0,0010 8	0,005	0,0013 3	0,0016 1	0,0006 3	0,0005
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,0062	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,05	0,0083	0,0247	0,0059	0,02

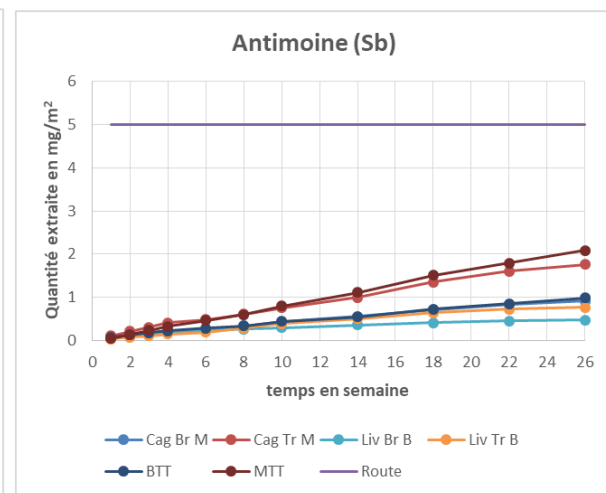
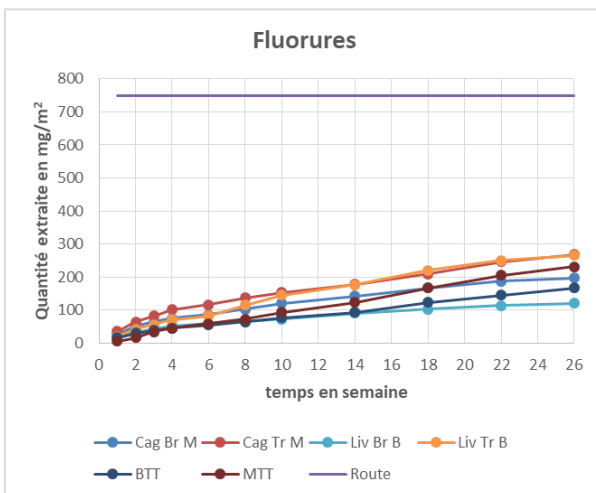
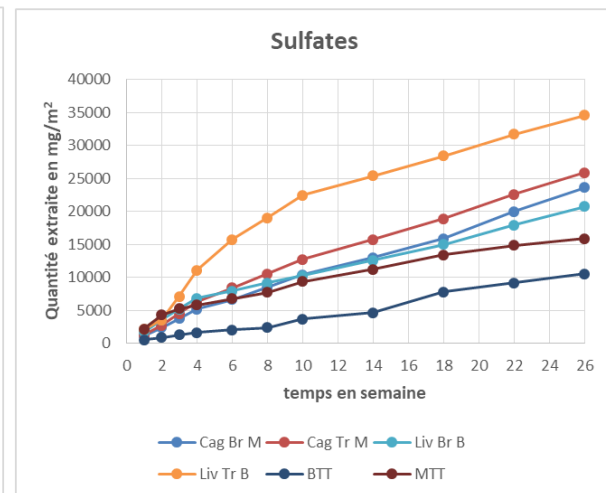
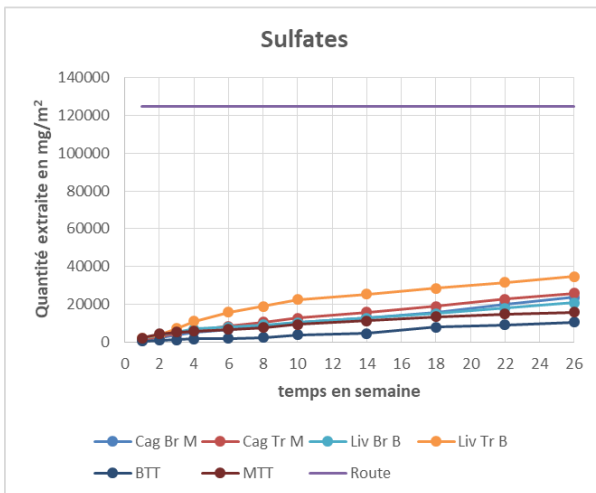
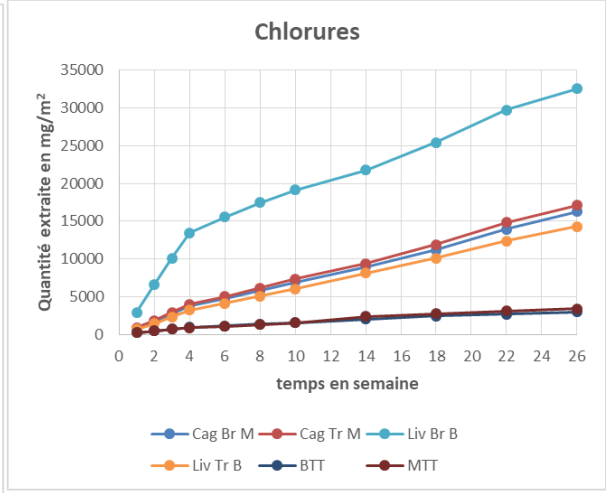
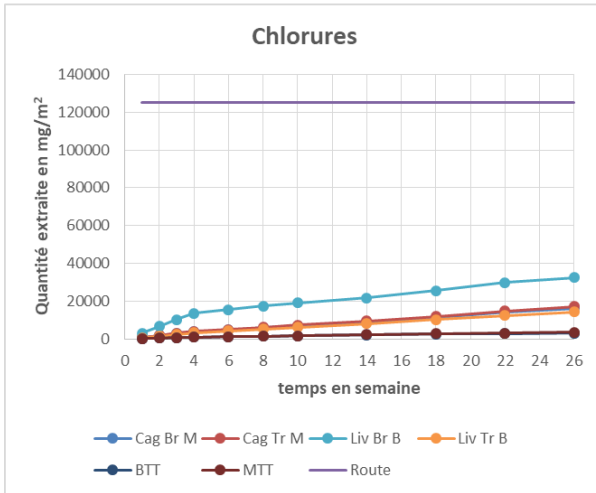
RÉSULTATS DE SUIVI DES CONCENTRATIONS (mg/L)

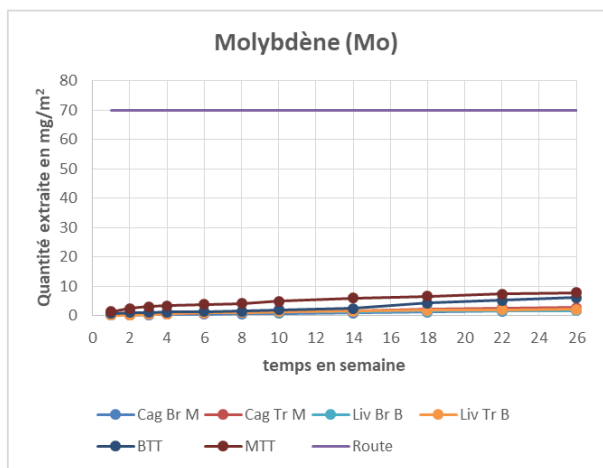
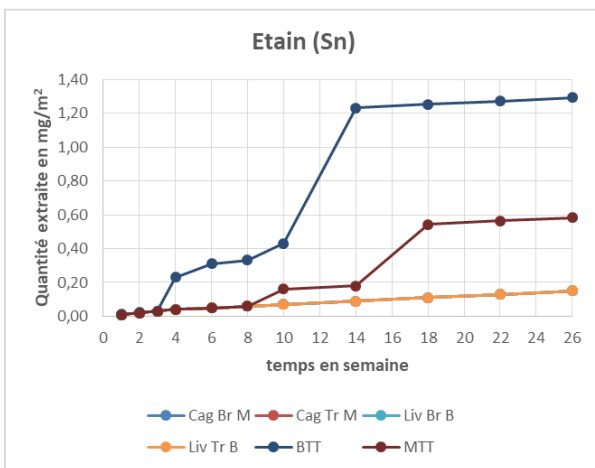
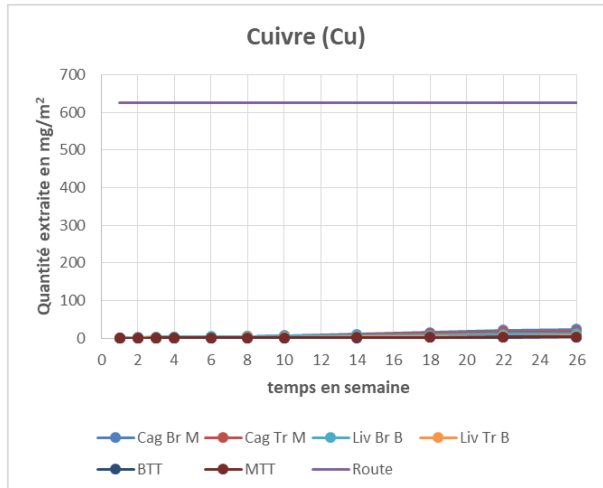
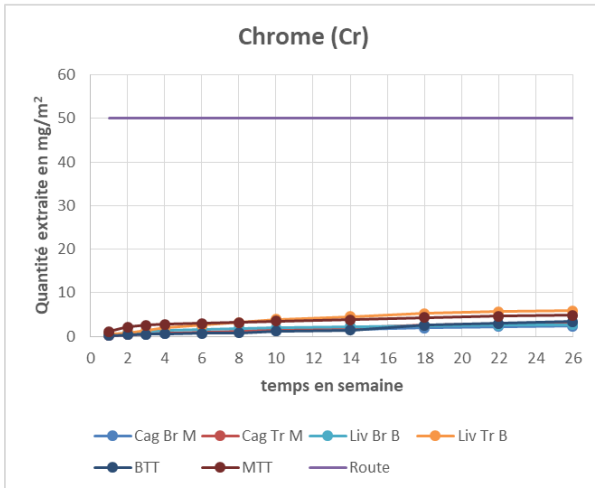
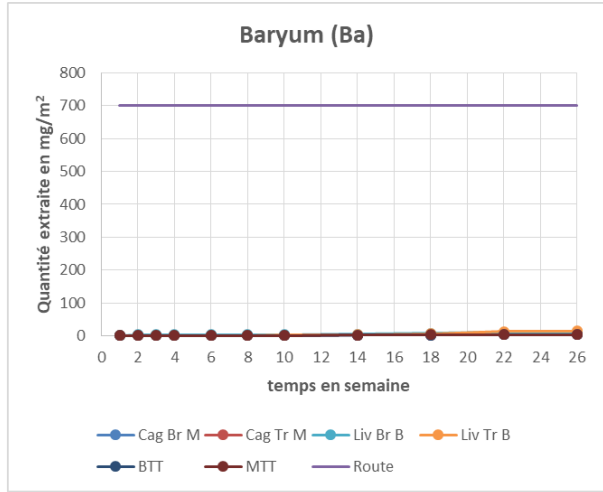
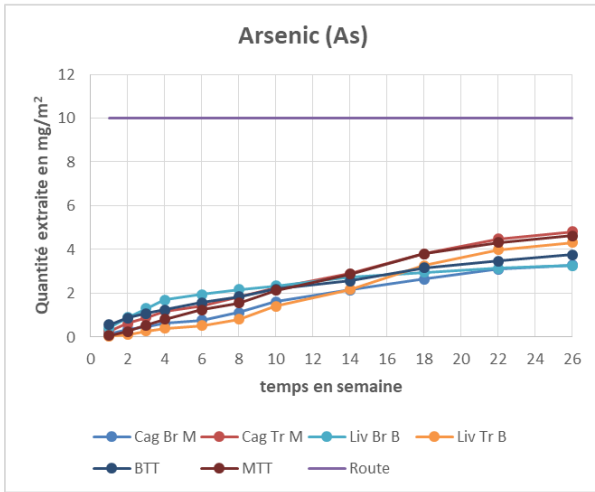


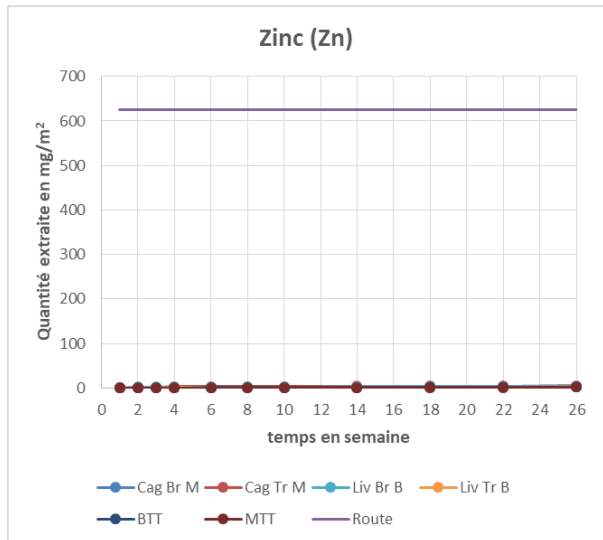
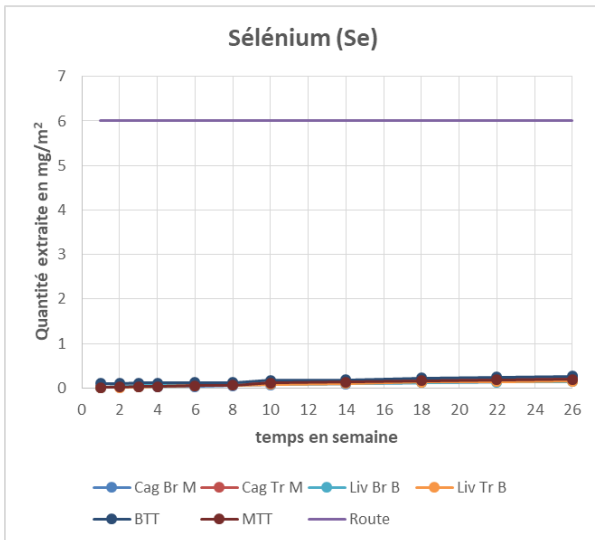
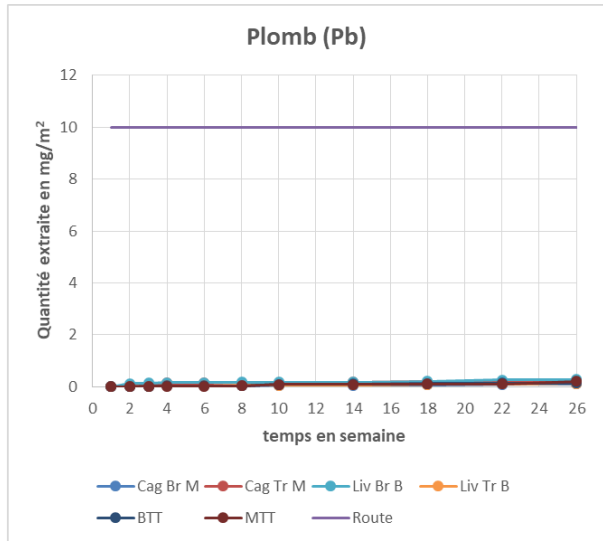
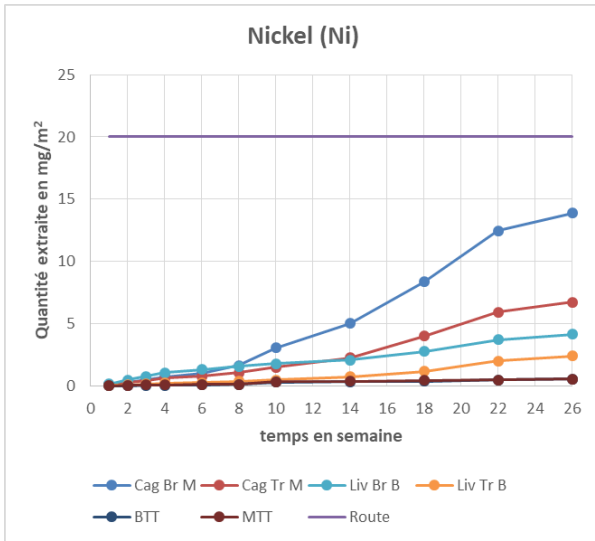




RÉSULTATS DE SUIVI DU RELARGAGE SURFACIQUE (mg/m²)







ANNEXE 3 : RÉSULTATS DE SUIVI DES LYSIMÈTRES DE SÉDIMENTS FRANÇAIS (TOULON, CENTURI)

ALLEGATO 3: RISULTATI DEL MONITORAGGIO DEI LISIMETRI DEI SEDIMENTI FRANCESI (TOULON, CENTURI)

**TOULON BRUT
LYSIMÈTRE
(TBR)**

		Référence :	1	2	3	4	6	8	10	14	18	22	26
Paramètres		Date prélèvement t :	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			7,43	7,46	7,46	7,77	7,335	7,535	7,74	7,53	7,99	8,17	8,31
Conductivité	µS/cm à 20° c		35893	18537	7476,9	4645,7	2583,1 5	1583	841,85	681	883,5	769,53	623,17
Chlorures	mg/l	1	11394, 2	4264,2	634,2	241,2	49,7	35,7	21,4	23,8	27	16,7	9,8
Sulfates	mg/l	5	5514,3	5644,3	3584,3	2504,3	599,3	350,3	50,3	5	79,3	64,3	40,3
Fluorures	mg/l	0,1	0,69	1,1	0,81	1	1,3	1,5	1,5	0,84	0,94	1,2	0,96
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,0045 4	0,0022	0,0014 5	0,0039 5	0,0019 7	0,0011 5	0,0013 6	0,0007 5	0,0071 5	0,0011 5	0,0009 1

Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,00374	<0,002	0,0032	<0,0002	0,00202	0,006	0,00177	0,00179	0,005	0,00261	<0,005
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,131	0,061	0,039	0,044	0,051	0,057	0,04	0,135	0,107	0,036	0,026
Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	<0,002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,00104	0,00026	<0,005
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,005
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,0151	0,011	0,00202	0,00715	0,00273	0,00432	0,00311	0,00623	0,02	0,00518	<0,01
Etain (Sn)	mg/l	0,001	<0,01	<0,01	0,002	0,0035	<0,001	0,0012	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,0083	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,065	0,137	0,021	0,119	0,051	0,111	0,11	0,059	0,099	0,097	0,059
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,005	<0,02	0,014	0,006	0,013	0,01	0,0049	0,0044	0,0064	0,0021	<0,005
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	<0,005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,005
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,0121	<0,005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,0584	0,0747	0,0054	<0,005	<0,005	0,0083	<0,005	0,07	0,03	0,0054	<0,02

**CENTURI
BRUT
LYSIMETRE
(CBR)**

CBR		Référence :	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres		Date prélèvement t :	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			7,41	7,41	7,51	7,82	7,225	7,42	7,655	7,6875	7,48	8,06	8,25
Conductivité	μS/cm à 20° c		35794, 9	16229	1607	1057,4	1294	1319	1042,5	751,75	1658,7 5	855,00	625,07
Chlorures	mg/l	1	10594, 2	3984,2	121,2	76,7	82,9	30	23,5	24,1	26,3	8,9	9,1
Sulfates	mg/l	5	7134,3	4344,3	320,3	187,3	697,3	285,3	195,3	60,3	642,3	208,3	74,3
Fluorures	mg/l	0,1	1	1,5	1,8	1,8	1,4	1,5	1,2	0,73	0,66	0,61	0,82
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,0038 5	0,0038 5	0,0059 2	0,0011 6	0,0018 6	0,0012 8	0,0010 6	0,0004 2	0,0049 3	0,0019 4	0,0012 5

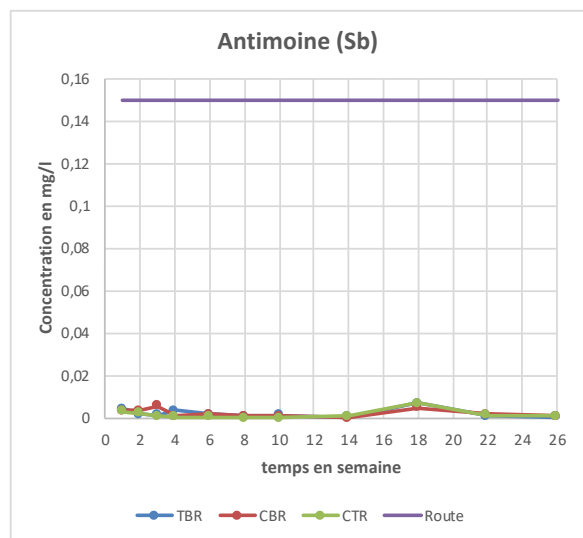
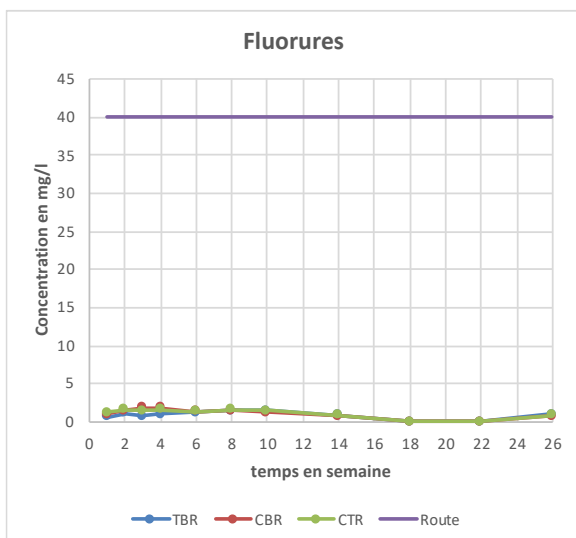
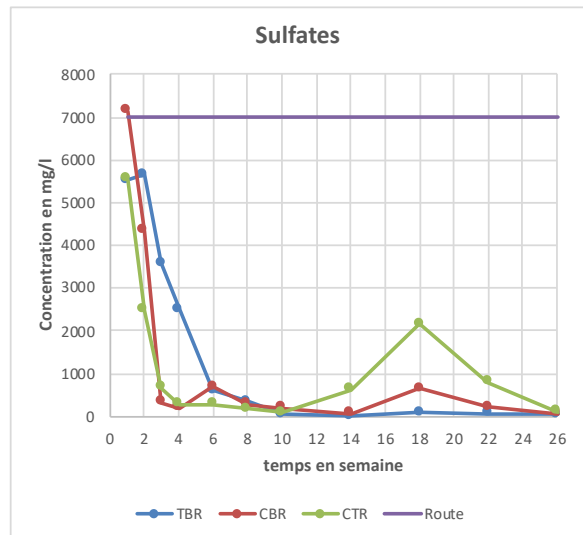
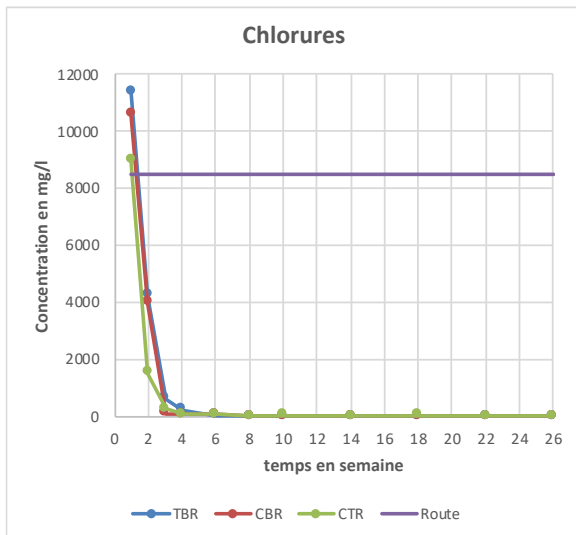
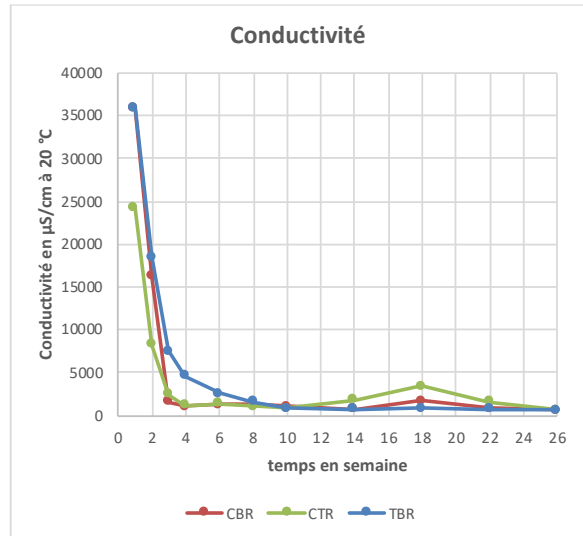
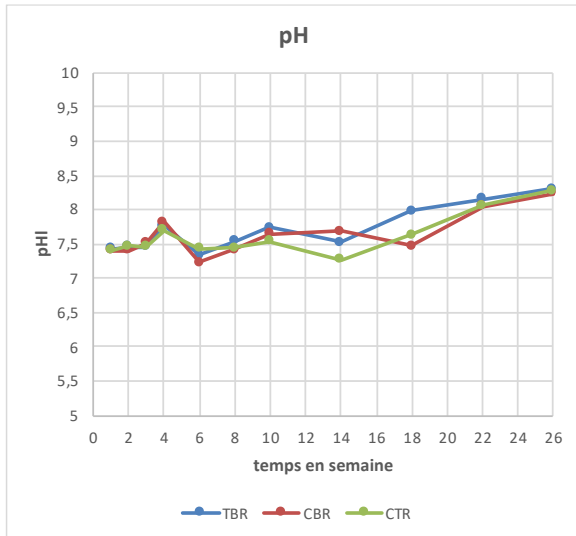
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,0048 7	0,0044 5	0,0018 8	0,0030 3	0,0034 4	0,007	0,0009 2	0,0021 6	0,0014 5	0,006	<0,005
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,069	0,063	0,069	0,061	0,044	0,06	0,026	0,091	0,107	0,033	0,079
Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	<0,002	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	0,007 4	0,0008	<0,005
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	<0,000 5	<0,000 5	0,0043 4	<0,000 5	<0,000 5	0,0006 1	<0,000 5	<0,000 5	0,0005 7	<0,000 5	<0,005
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,0092 2	0,0041 7	0,0087 3	0,0023 3	0,0027	0,0102	0,0012 9	0,0013 1	0,01	0,0043 8	<0,01
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,0133	0,0043	0,0176	0,0014	<0,001	0,0027	0,0018	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	0,0224	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,009	0,018	0,103	0,024	0,07	0,019	0,012	0,01	0,013	0,014	0,037
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,028	0,027	0,009	0,011	0,012	0,007	0,0045	0,006	0,01	0,0048	<0,005
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	<0,005	<0,000 5	0,0005 7	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,005
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	<0,005	0,0019	0,0013 9	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	0,0005 6	<0,000 5	<0,000 5
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,051	0,0224	0,02	0,0133	<0,005	0,0224	<0,005	0,04	0,05	0,0165	0,03

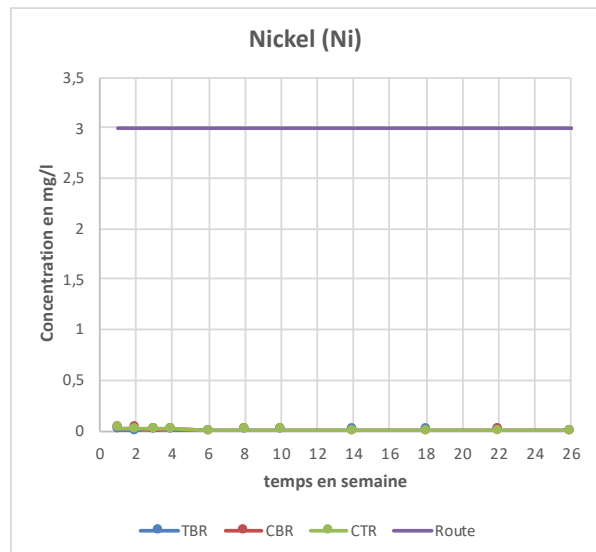
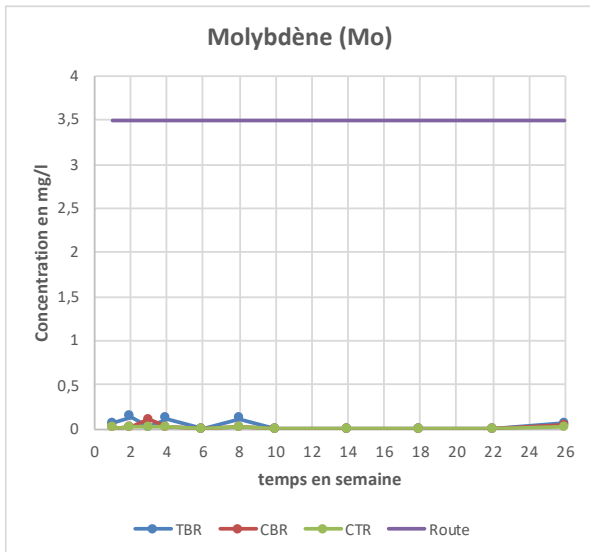
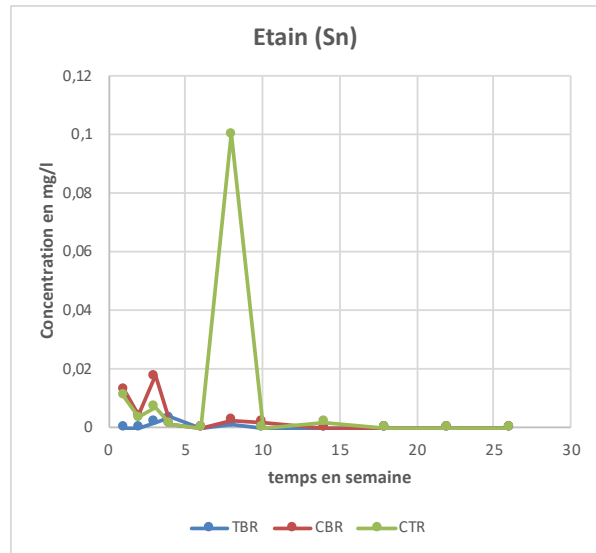
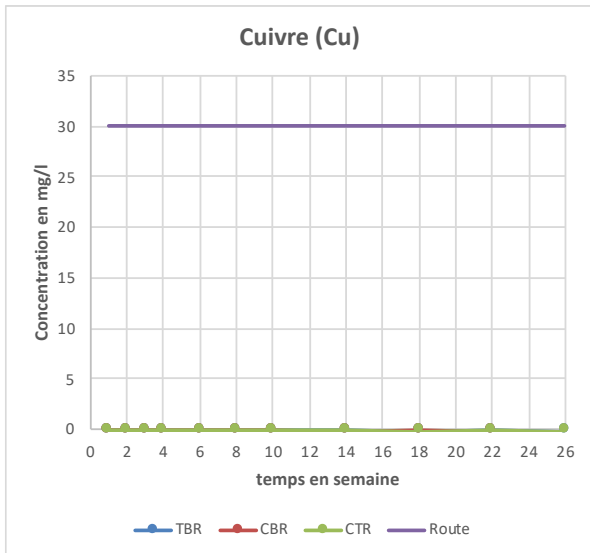
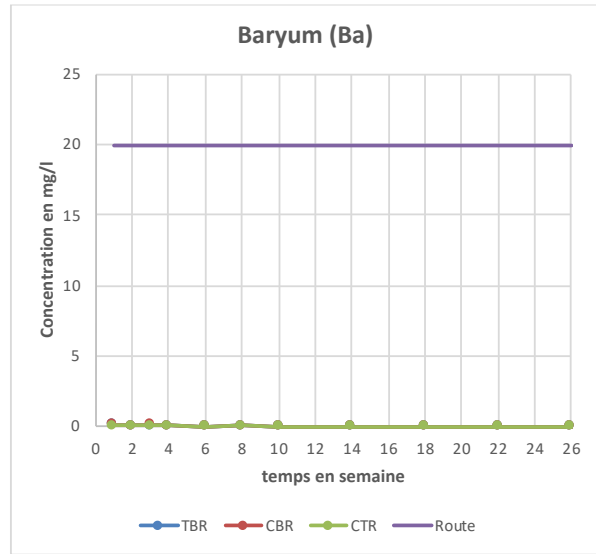
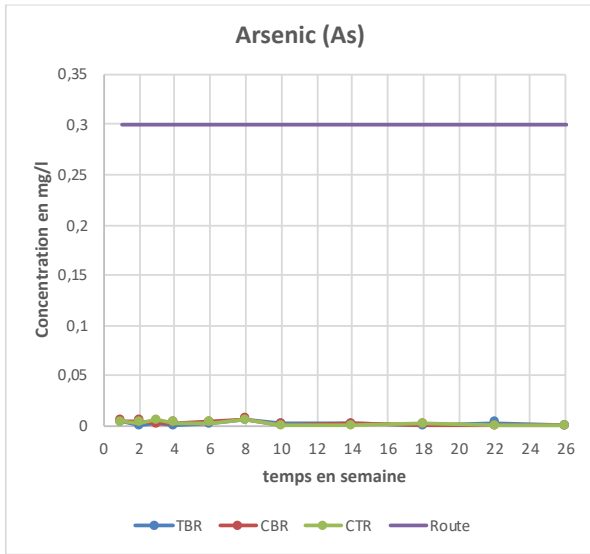
**CENTURI
TRAITE
LYSIMETRE
(CTR)**

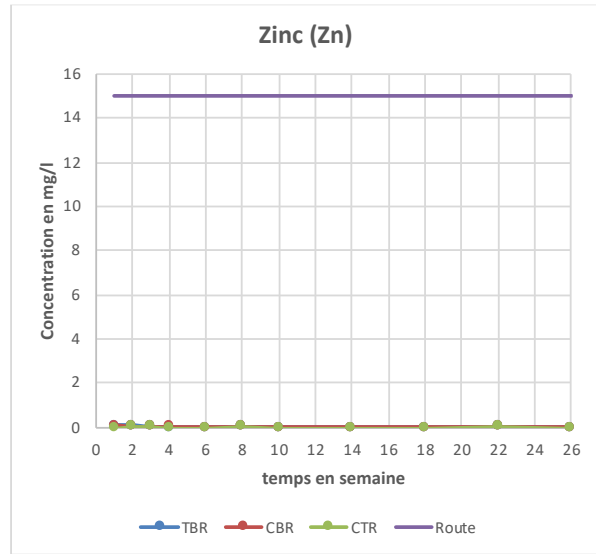
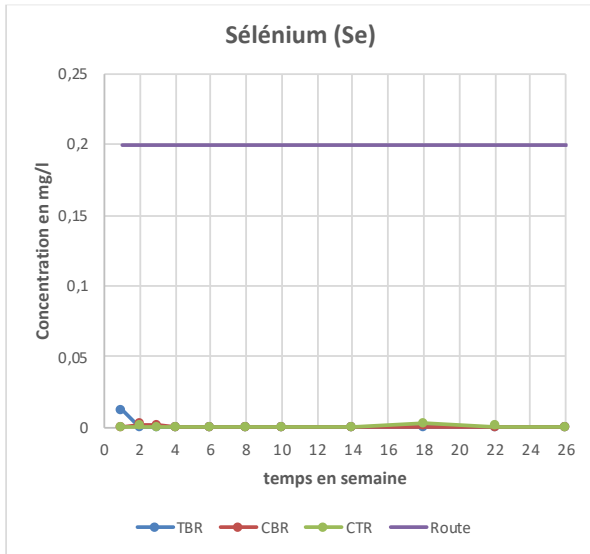
		Référence :	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres		Date prélèvement t :	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			7,41	7,48	7,46	7,7	7,435	7,445	7,54	7,2725	7,64	8,07	8,28
Conductivité	µS/cm à 20° c		24227, 6	8288	2459,8	1194	1349,3 5	1072,5 5	852,75	1785,5	3445,5	1629,5 7	619,83
Chlorures	mg/l	1	8974,2	1524,2	290,2	95,2	84	35,7	47,7	29,4	42,3	10,2	7,7
Sulfates	mg/l	5	5544,3	2484,3	677,3	271,3	284,3	182,3	77,3	636,3	2164,3	809,3	100,3
Fluorures	mg/l	0,1	1,2	1,6	1,5	1,6	1,4	1,6	1,5	0,83	0,69	0,75	0,9
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,0031 3	0,0024 1	0,0009 4	0,0006 6	0,0005 8	0,0004 2	0,0002	0,0012	0,0074 1	0,0014 4	0,001
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,0043 4	0,0030 1	0,006	0,0028 3	0,0031	0,006	0,008	<0,000 2	0,0019 8	0,005	<0,005

Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,048	0,036	0,041	0,045	0,052	0,044	0,046	0,145	0,12	0,028	0,022
Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	0,016	0,0025 8	<0,005
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	0,0009 8	<0,000 5	<0,005
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,0065 6	0,0019 4	0,0028 2	0,0015 9	0,0016 9	0,0032 1	0,0010 1	0,0034 1	0,03	0,0045	<0,01
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,011	0,0036	0,0071	0,0014	<0,001	0,1	<0,001	0,0019	<0,001	<0,001	<0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2	0,0063	<0,000 2	<0,000 3	<0,000 2	<0,000 2	<0,000 2
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,013	0,016	0,025	0,02	0,016	0,021	0,017	0,012	0,023	0,013	0,016
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,029	0,019	0,018	0,012	0,014	0,01	0,0038	0,011	0,02	0,007	<0,005
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	<0,005	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,005
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	<0,005	0,0009 3	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	<0,000 5	0,0026 2	0,0005 2	<0,000 5
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	<0,05	0,0065	0,006	<0,005	<0,005	0,0063	<0,005	0,07	0,08	0,0141	<0,02

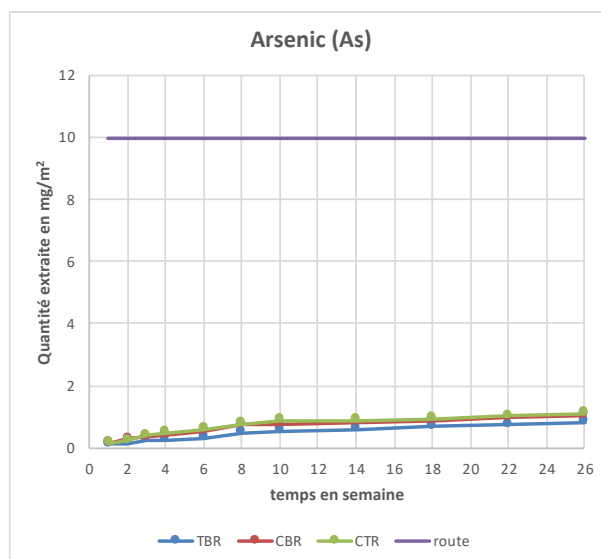
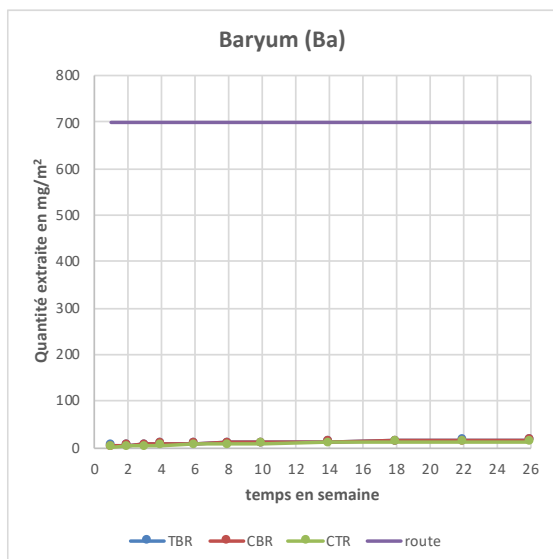
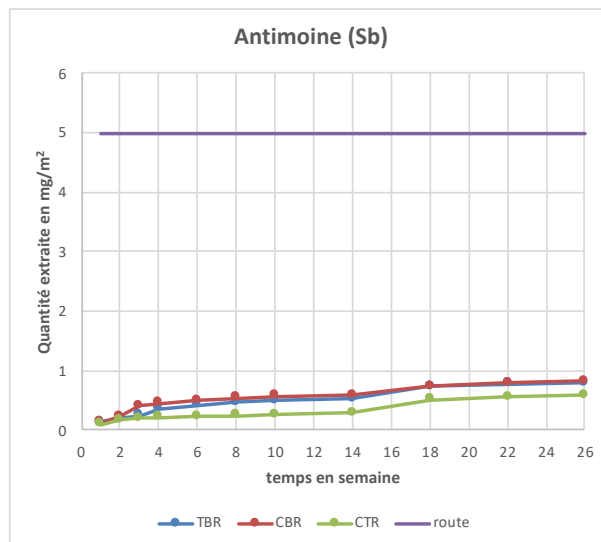
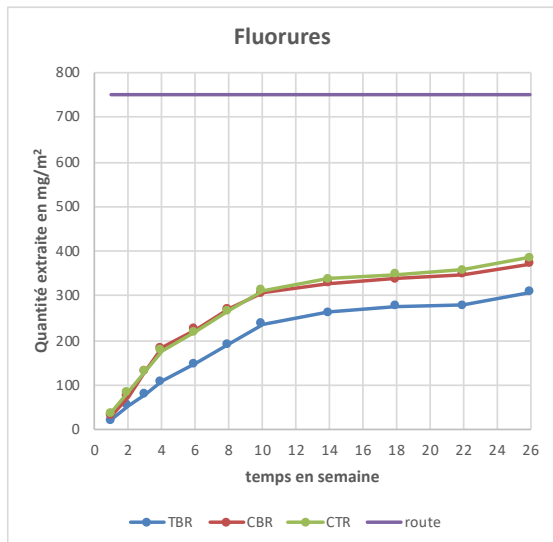
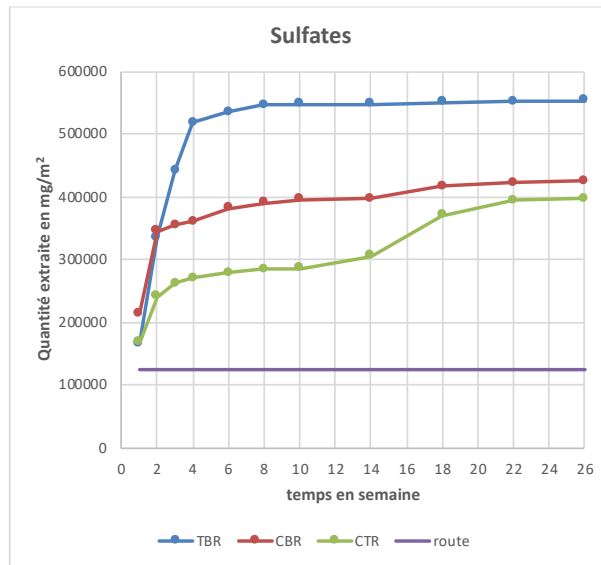
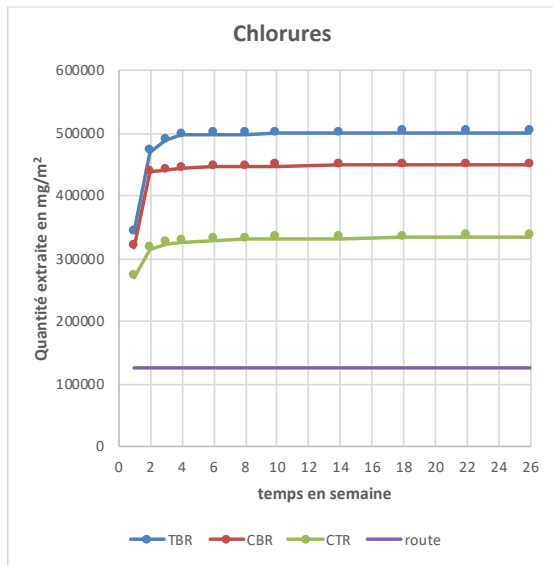
RÉSULTATS DE SUIVI DE LA CONCENTRATION (mg/L)

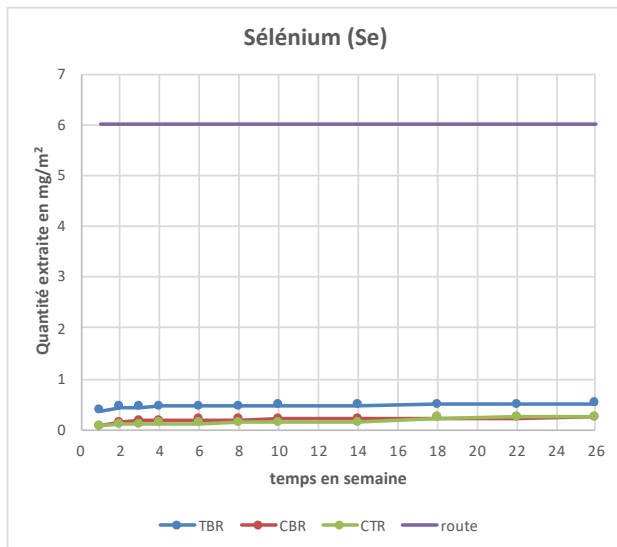
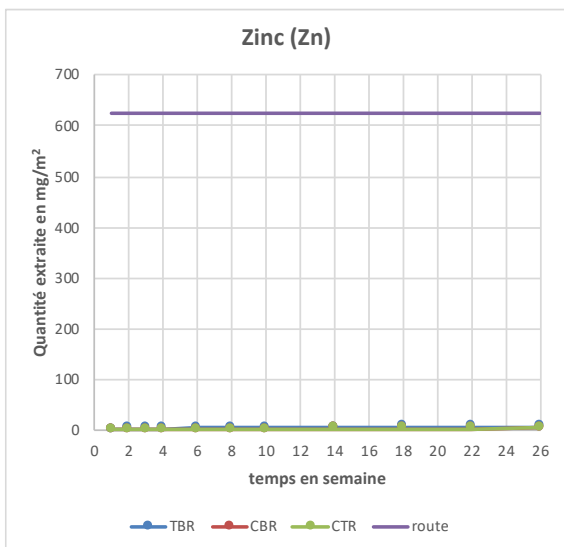
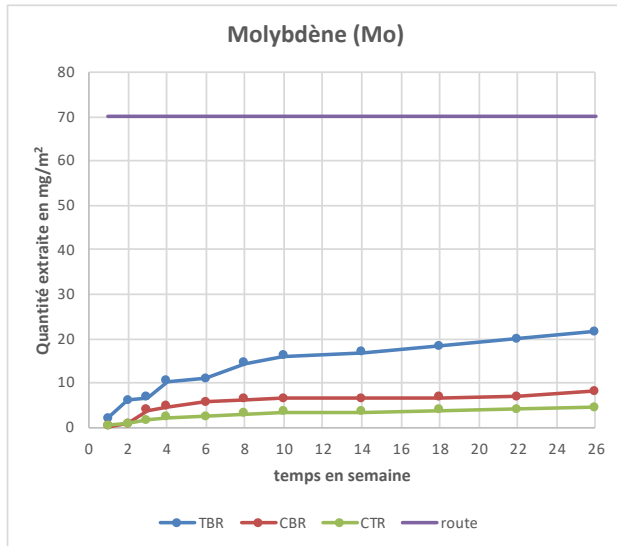
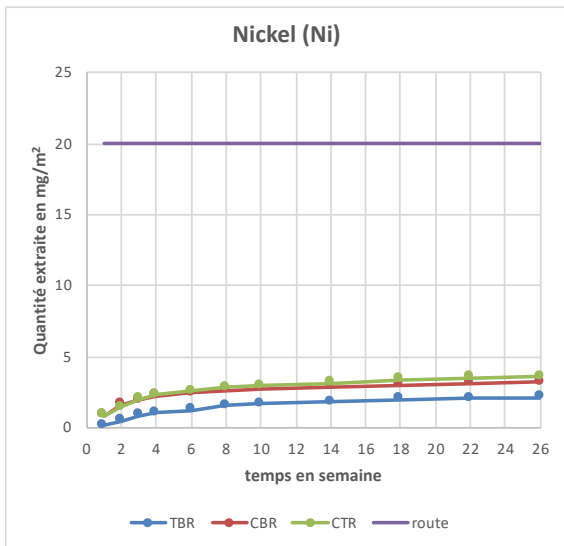
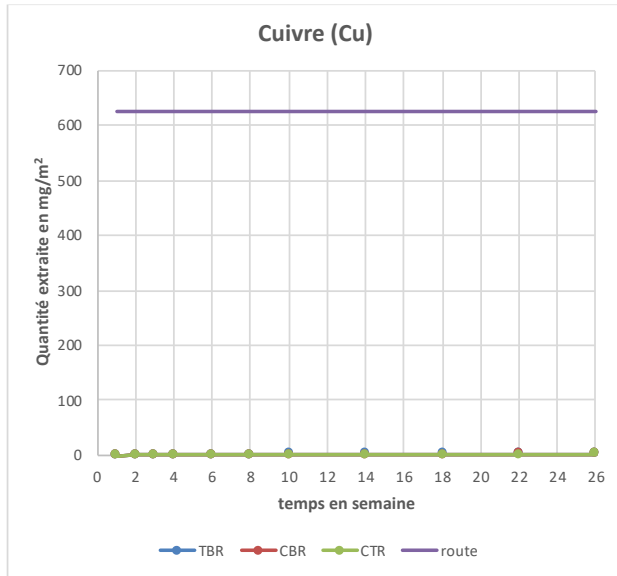
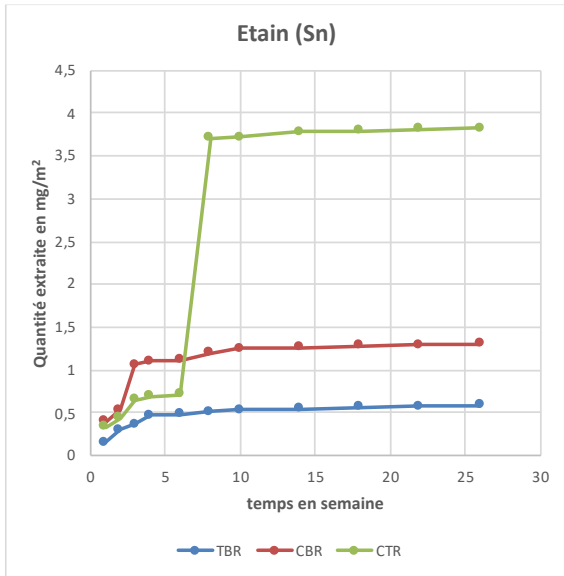






RÉSULTATS DE SUIVI DU RELARGAGE SURFACIQUE (mg/m²)





**ANNEXE 4 : RÉSULTATS DE SUIVI DES DALLES DE SÉDIMENTS FRANÇAIS
(TOULON, CENTURI)**

**ALLEGATO 4: RISULTATI DEL MONITORAGGIO DELLE LASTRE DI SEDIMENTI
FRANCESI (TOULON, CENTURI)**

TOULON BRUT BÉTON (Tou BR B)

		Référence :	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			10,1	10,1	10,46	10	9,75	9,88	9,61	9,485	9,92	9,86	9,575
Conductivité	μS/cm à 20° c		1379,9	1237,9	1482	1126,6	2360,9	2094,9	2836,2	2168	4303,5	2826	2026
Chlorures	mg/l	1	34,1	27,6	29,3	24,2	24,3	24,8	30,2	30,1	44,5	30,9	23,8
Sulfates	mg/l	5	61,9	41	54,1	42,8	56,6	66,3	58,8	41,4	81,1	57,6	41,7
Fluorures	mg/l	0,1	1,6	1,3	1	0,64	0,97	0,77	0,87	0,63	0,95	0,78	0,46
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,0127	0,0112	0,0125	0,00813	0,0134	0,011	0,00928	0,00778	0,00885	0,00666	0,00627
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,059	0,037	0,026	0,025	0,06	0,036	0,049	0,03	0,036	0,026	0,013
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,03	0,011	0,00298	0,00585	0,00454	0,006	0,007	0,025	0,06	0,026	0,028

Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,002	0,0002	0,0002	0,0002	0,005
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,022	0,011	0,029	0,009	0,023	0,012	0,014	0,011	0,012	0,006	0,005
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,03	0,02	0,04	0,02	0,06	0,06	0,05	0,04	0,09	0,07	0,04
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,001	0,0013	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,0164	0,0069	0,001	0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,05	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,053	0,008	0,039	0,013	0,024	0,018	0,03	0,026	0,04	0,051	0,017
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,0024	0,002	0,003	0,002	0,0027	0,0028	0,02	0,0038	0,0121	0,006	0,005
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,007	0,0005	0,005	0,0005	0,0011	0,0011	0,005
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,0010 5	0,0007 4	0,0008 5	0,0006	0,0008 7	0,0007 5	0,005	0,0007 6	0,0017 8	0,0009	0,0005 3
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,005	0,0066	0,005	0,005	0,005	0,005	0,05	0,0163	0,0255	0,02	0,02

TOULON BRUT MORTIER (Tou BR M)

		Référence :	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			9,59	10,2	10,39	10,13	9,96	10,17	9,62	9,67	10,105	10,09	9,87
Conductivité	µS/cm à 20° c		1219,6	1700	1886,4	1533	3348,3	3382,7	5393	3340,5	6353,5	4728,5	3995,5
Chlorures	mg/l	1	58,8	59,5	57,3	42,3	56,4	49	41,6	45,1	102,2	71,1	57,1
Sulfates	mg/l	5	165	64,2	79	79,5	127	57,4	75,9	47,1	127	34,7	63,4
Fluorures	mg/l	0,1	1,8	1,9	1,3	0,84	1,3	1	1,4	0,81	1,2	1,2	0,79
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,0156	0,0188	0,0179	0,0142	0,06	0,02	0,02	0,0164	0,0168	0,0141	0,0152
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,041	0,083	0,049	0,035	0,092	0,05	0,066	0,043	0,061	0,051	0,037
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,025	0,013	0,0032 4	0,0065 5	0,0068 7	0,009	0,0087 7	0,026	0,059	0,024	0,029

Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,036	0,02	0,027	0,013	0,021	0,009	0,006	0,0067	0,006	0,006	0,005
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,06	0,11	0,09	0,05	0,06	0,15	0,17	0,1	0,12	0,05	0,11
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0011	0,001	0,01	0,0016	0,0014	0,001	0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,05	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,115	0,032	0,069	0,027	0,241	0,03	0,048	0,041	0,149	0,074	0,054
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,02	0,007	0,007	0,0034	0,005	0,011	0,008	0,01	0,009	0,0066	0,008
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	0,0005	0,0007	0,0005	0,0005	0,0006	0,0010	0,005	0,0007	0,0016	0,0005	0,005
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,0012	0,0018	0,0016	0,0011	0,0039	0,0013	0,01	0,0012	0,0034	0,0005	0,0009
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,05	0,0169	0,0074	0,005	0,005	0,005	0,05	0,0203	0,0259	0,0145	0,02

TOULON TRAITÉ BÉTON (Tou TR B)

		Référence :	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			9,87	9,95	10,19	10,06	9,93	9,98	9,63	9,66	10,06	9,985	9,965
Conductivité	µS/cm à 20° c		3448,7	3138	3076	2742	5302	4939,2	8271	4673	7951,5	5552	3898,5
Chlorures	mg/l	1	457,2	297,2	329,2	249,2	327,2	241,2	373,2	263,2	469,2	351,2	223,2
Sulfates	mg/l	5	483	277	146	104	142	69	126	63	113	76,3	49,3
Fluorures	mg/l	0,1	3	2,7	1,9	1,5	1,9	1,5	2	1,2	1,6	1,4	0,76
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,022	0,0236	0,0246	0,0213	0,04	0,03	0,02	0,0178	0,0192	0,0129	0,0124
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,093	0,135	0,103	0,078	0,143	0,09	0,11	0,061	0,096	0,055	0,023
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,009	0,00568	0,00369	0,00335	0,007	0,00522	0,00861	0,024	0,015	0,008	0,033

Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	0,00028	0,00033	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,002	0,0002	0,0002	0,0002	0,005
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,135	0,06	0,05	0,025	0,048	0,03	0,035	0,019	0,014	0,00609	0,005
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,03	0,04	0,03	0,03	0,13	0,13	0,04	0,04	0,04	0,17	0,06
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001	0,03	0,0065	0,0029	0,01	0,0031	0,0045	0,001	0,0025
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,05	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,757	0,132	0,073	0,047	0,067	0,056	0,169	0,067	0,198	0,106	0,025
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,02	0,0033	0,0034	0,0024	0,006	0,0049	0,02	0,0048	0,0096	0,0169	0,005
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,00148	0,00158	0,0017	0,005	0,00089	0,00204	0,00077	0,005
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,01	0,00336	0,00248	0,0019	0,00208	0,00189	0,02	0,00151	0,00495	0,00189	0,00058
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,05	0,005	0,005	0,09	0,02	0,0137	0,05	0,0254	0,0345	0,0117	0,02

TOULON TRAITÉ MORTIER (Tou TR M)

		Référence	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			9,9	10,47	10,28	10,16	9,95	10,08	9,7	9,735	10,1	9,915	9,985
Conductivité	µS/cm à 20° c		7119	7990	6263	5228	9028,4	8633,2	14047,4	8278,5	15211,5	13560,5	11311
Chlorures	mg/l	1	1524,2	1824,2	1304,2	853,2	930,2	741,2	823,2	674,2	2064,2	98,2	1254,2
Sulfates	mg/l	5	521	345	289	201	195	135	154	86,9	178	158	123
Fluorures	mg/l	0,1	3,3	2,6	1,8	1,6	2,7	1,9	3	1,6	2,3	2,2	1,5
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,03	0,02	0,0294	0,02	0,0276
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,057	0,075	0,044	0,04	0,08	0,077	0,075	0,053	0,058	0,069	0,045

Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,024	0,005	0,0024 7	0,0048 2	0,009	0,0030 9	0,0035 3	0,011	0,017	0,007	0,035
Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	0,00036	0,00093	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003 8	0,0002 1	0,002	0,0003 6	0,005
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,034	0,025	0,017	0,017	0,017	0,011	0,012	0,006	0,007	0,009	0,008
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,09	0,12	0,05	0,04	0,14	0,07	0,08	0,04	0,05	0,21	0,22
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,001	0,0017	0,001	0,0018	0,01	0,0012	0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,005	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,401	0,303	0,176	0,102	0,04	0,17	0,522	0,184	0,252	0,376	0,088
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,02	0,01	0,007	0,02	0,01	0,007	0,005	0,0117	0,026	0,0254	0,011
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,005	0,0009 1	0,005	0,0005	0,0005 7	0,005	0,008	0,005
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,00415	0,00455	0,005	0,005	0,0021 1	0,01	0,0052 8	0,0027 1	0,005	0,06	0,0016 7
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,05	0,0118	0,005	0,04	0,005	0,005	0,005	0,0133	0,05	0,0161	0,02

CORSE BRUT MORTIER (Cor BR M)

		Référence	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			9,78	9,98	10,28	10	9,81	9,94	9,65	9,725	10,025	9,905	9,81
Conductivité	µS/cm à 20° c		1095,6	1288,5	1340	1282	2606,9	2439,4	3965	2813,75	5101,5	4569,5	3378
Chlorures	mg/l	1	45	42,5	37,1	37	39,4	34,5	47,8	37,5	85,7	79,1	61,3
Sulfates	mg/l	5	85,9	71,2	63,4	62,2	126	78,9	129	58,9	179	134	91,2
Fluorures	mg/l	0,1	1,6	1,7	1,2	0,96	1,5	1,3	1,9	1,1	2	2,3	1,5
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,0122	0,0117	0,0104	0,00973	0,0171	0,016	0,0214	0,0125	0,0183	0,0153	0,0143
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,053	0,066	0,039	0,035	0,067	0,048	0,069	0,035	0,057	0,046	0,027
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,023	0,009	0,0042	0,00635	0,006	0,00233	0,008	0,022	0,049	0,023	0,036

Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,00025	0,0002	0,00021	0,0002	0,005
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,022	0,02	0,022	0,013	0,024	0,017	0,019	0,015	0,042	0,029	0,018
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,01	0,02	0,02	0,02	0,06	0,07	0,05	0,03	0,07	0,07	0,04
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0058	0,004	0,001	0,02	0,002	0,0012	0,001	0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,005	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,079	0,022	0,029	0,019	0,047	0,031	0,042	0,032	0,081	0,102	0,044
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,0027	0,0027	0,0021	0,002	0,0035	0,0026	0,005	0,0029	0,0154	0,006	0,005
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,00053	0,00053	0,00069	0,0005	0,00058	0,00167	0,00166	0,005
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,00114	0,00126	0,0009	0,00085	0,0018	0,00125	0,00182	0,00087	0,00323	0,0005	0,00101
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,005	0,005	0,005	0,0067	0,0096	0,005	0,005	0,0143	0,0337	0,0195	0,02

CORSE TRAITÉ MORTIER (Cor TR M)

		Référence	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			9,69	10,04	10,13	10,01	9,87	10,17	10,53	10,13	10,21	9,92	9,78
Conductivité	µS/cm à 20° c		7119	1692	1592	1559	3152,4	3016,8	5576,4	3666	5949,5	4691,5	3254
Chlorures	mg/l	1	77,7	75,2	56	49,1	63,3	53,9	100,2	62,5	122,2	1854,2	76,7
Sulfates	mg/l	5	193	96,2	75,4	80,2	155	88,9	121	65,8	225	164	88,7
Fluorures	mg/l	0,1	1,9	2,1	1,4	1,1	1,8	1,4	1,9	1,1	2,1	2,2	1,4
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,0152	0,0143	0,0133	0,0121	0,02	0,0181	0,0233	0,0137	0,03	0,0166	0,016
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,071	0,105	0,062	0,049	0,097	0,066	0,068	0,037	0,11	0,057	0,032
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,03	0,007	0,00329	0,00533	0,023	0,008	0,007	0,03	0,0127	0,026	0,027

Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	0,002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,00021	0,0002	0,005
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,045	0,036	0,024	0,016	0,028	0,02	0,024	0,014	0,026	0,015	0,01
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,04	0,04	0,03	0,05	0,07	0,07	0,15	0,05	0,05	0,07	0,04
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,01	0,001	0,001	0,05	0,0057	0,0013	0,0029	0,0117	0,0017	0,001	0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,005	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,213	0,049	0,036	0,04	0,054	0,036	0,052	0,048	0,297	0,112	0,044
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,02	0,005	0,004	0,0027	0,005	0,006	0,013	0,008	0,0276	0,0128	0,007
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	0,005	0,0005	0,0005	0,00713	0,00155	0,0116	0,0005	0,0005	0,00051	0,00131	0,005
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,005	0,00175	0,00152	0,001	0,00209	0,00129	0,00187	0,00122	0,00577	0,00231	0,00105
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,0693	0,0085	0,005	0,39	0,0122	0,005	0,005	0,0185	0,0195	0,0123	0,02

BÉTON TÉMOIN (BTT)

		Référence	1	2	3	4	6	8	10	14	18	22	26
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			10,09	9,91	9,9	9,84	9,56	9,74	9,36	9,195	9,82	9,73	9,515
Conductivité	µS/cm à 20° c		1419,6	1412,2	1019	981,5	1169,7	1663,3	3017	1949,5	3378,5	2574,5	1775,5
Chlorures	mg/l	1	26	23	22,1	22,1	20,2	21,6	22,9	23,5	19,1	14,1	14,1
Sulfates	mg/l	5	50,5	38,4	37,3	36,4	37,8	37,5	131	45,5	158	69,7	69,7
Fluorures	mg/l	0,1	1,7	1,3	0,86	0,7	0,98	0,89	1,3	0,81	1,5	1,1	1,1
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,0078	0,0055	0,0050	0,0038	0,0067	0,0052	0,0100	0,0056	0,0087	0,0064	0,0064
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,057	0,031	0,02	0,016	0,034	0,027	0,034	0,019	0,03	0,015	0,015
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,012	0,024	0,00369	0,006	0,00266	0,00351	0,02	0,032	0,058	0,023	0,023

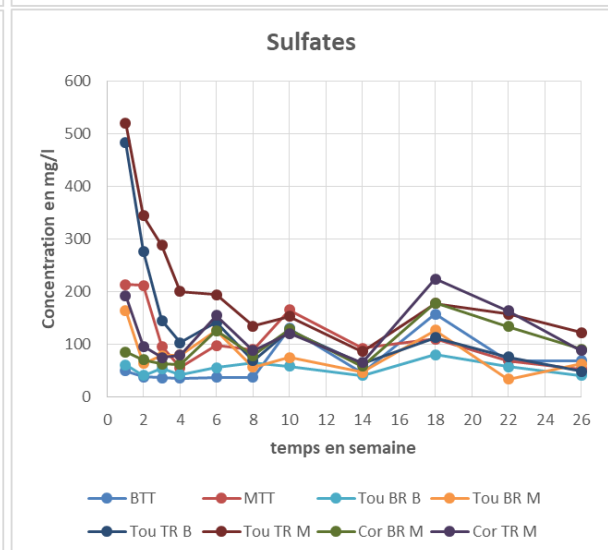
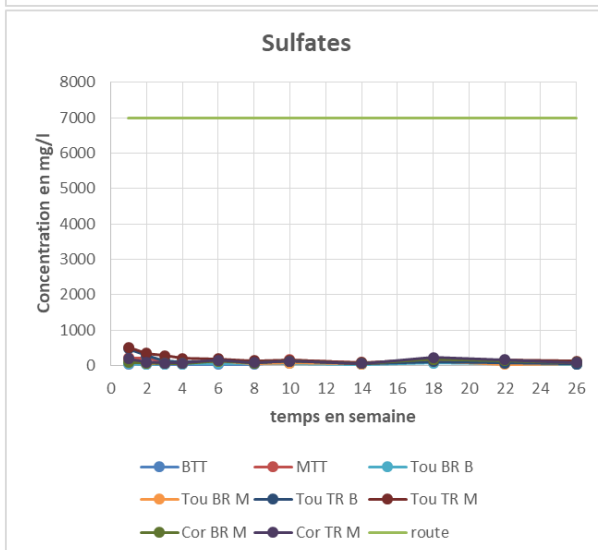
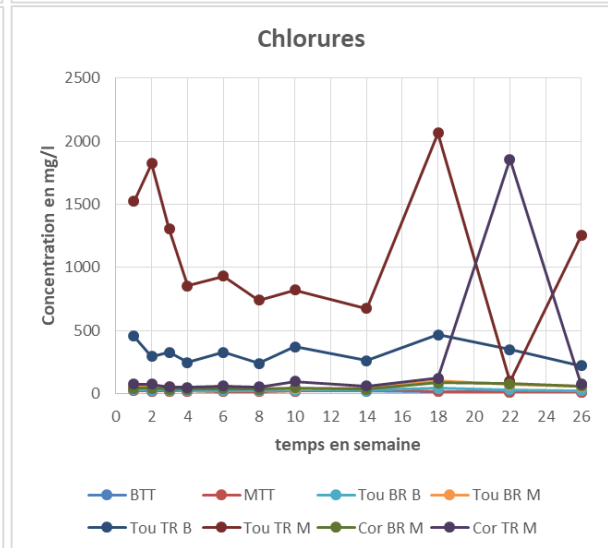
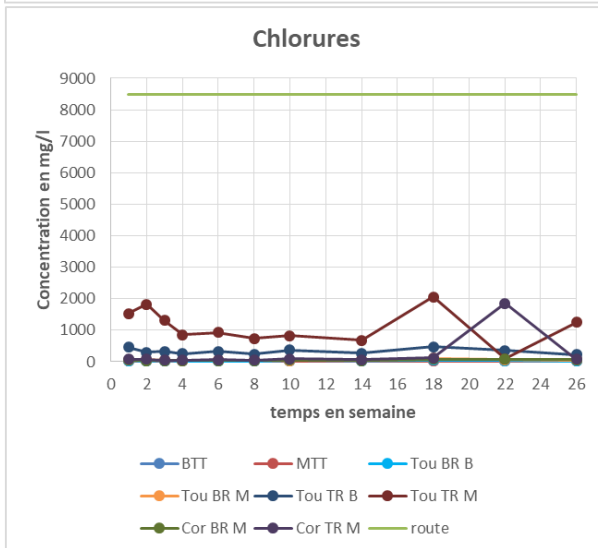
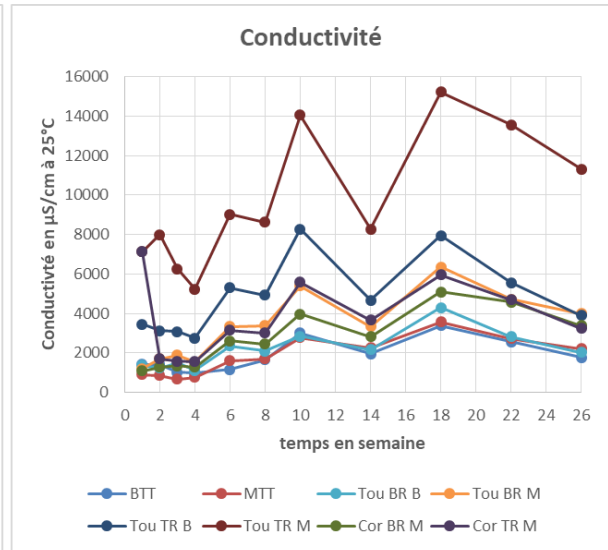
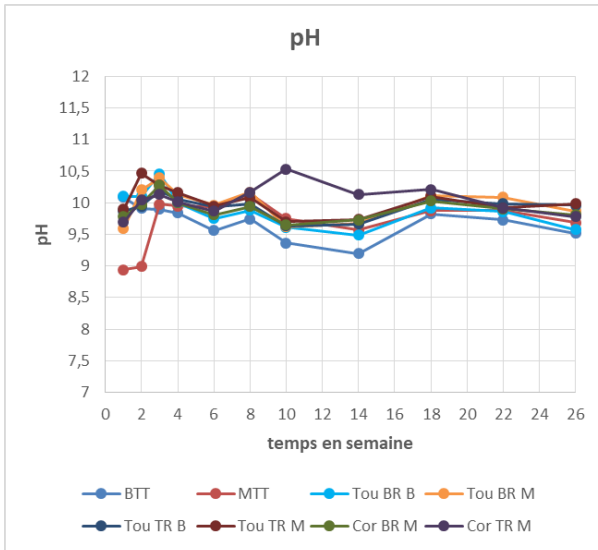
Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,023	0,011	0,012	0,009	0,016	0,013	0,034	0,013	0,058	0,019	0,019
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,0094	0,0070	0,0061	0,0081	0,020	0,020	0,040	0,020	0,030	0,030	0,030
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,0011	0,001	0,001	0,02	0,008	0,0021	0,01	0,04	0,001	0,001	0,001
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,05	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,071	0,03	0,008	0,008	0,014	0,014	0,051	0,025	0,088	0,047	0,047
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,02	0,002	0,0022	0,0039	0,0039
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0014	0,0005	0,0005	0,005	0,00057	0,00085	0,00081	0,00081
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,01	0,0005	0,0005	0,0005	0,0006	0,0005	0,005	0,0005	0,00206	0,00101	0,00101
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,005	0,0108	0,005	0,04	0,005	0,005	0,05	0,0172	0,0197	0,0093	0,0093

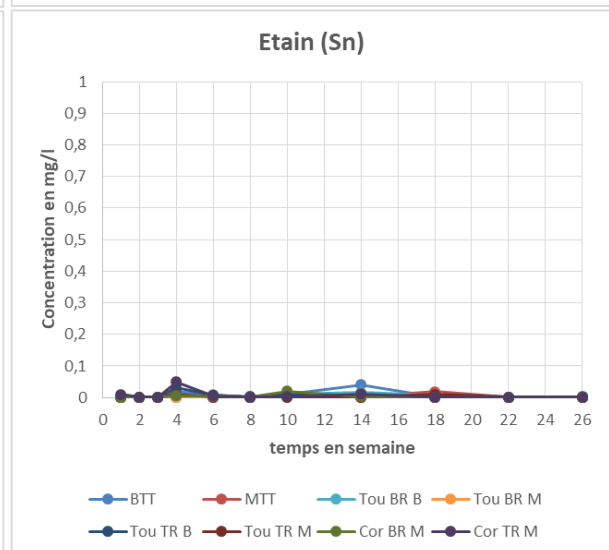
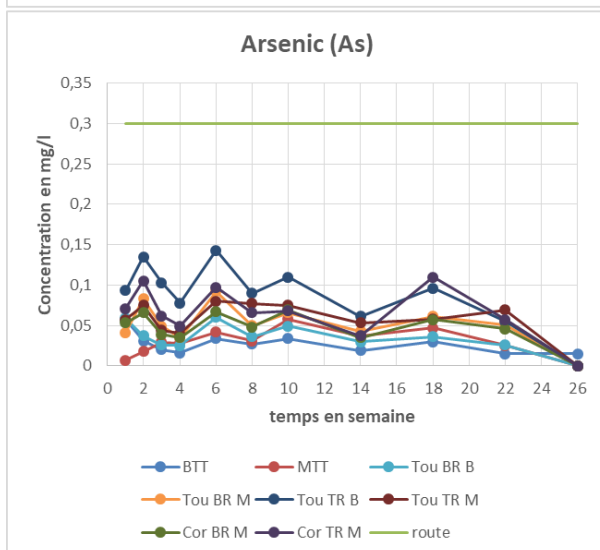
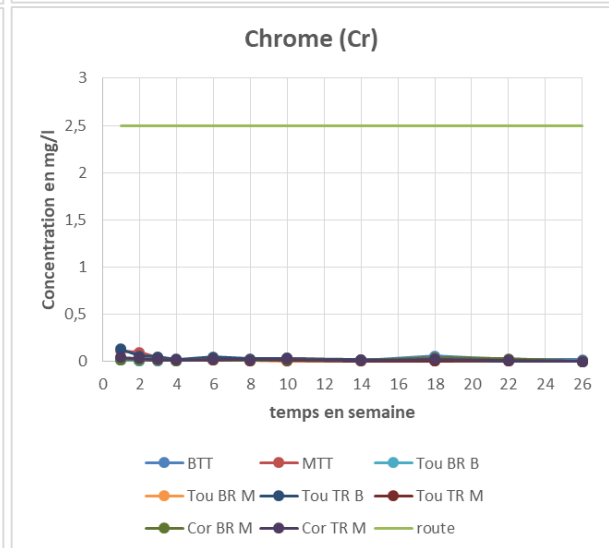
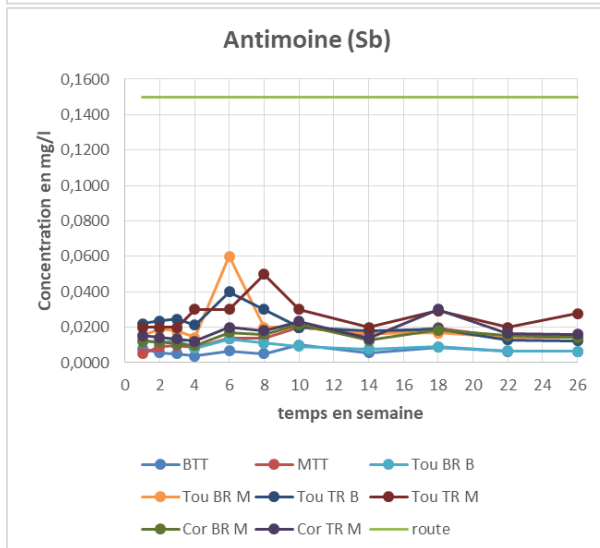
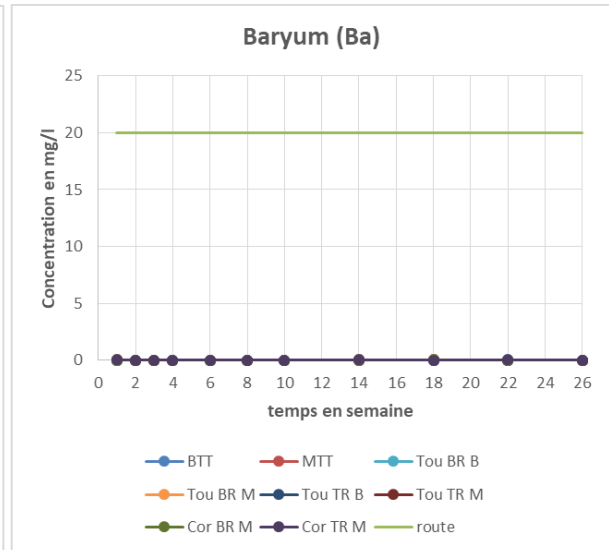
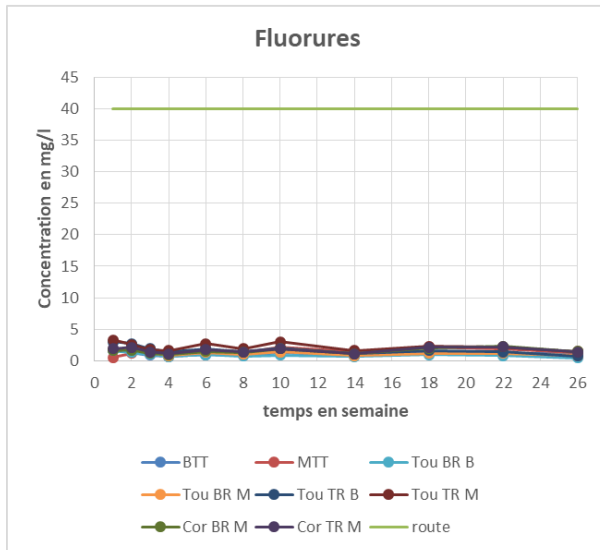
MORTIER TÉMOIN (MTT)

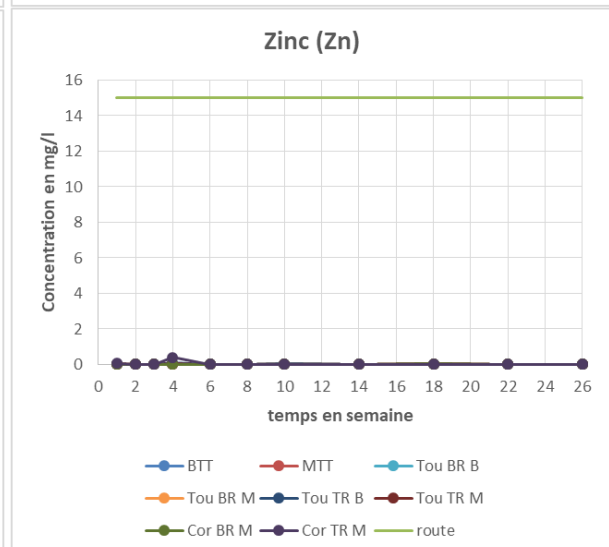
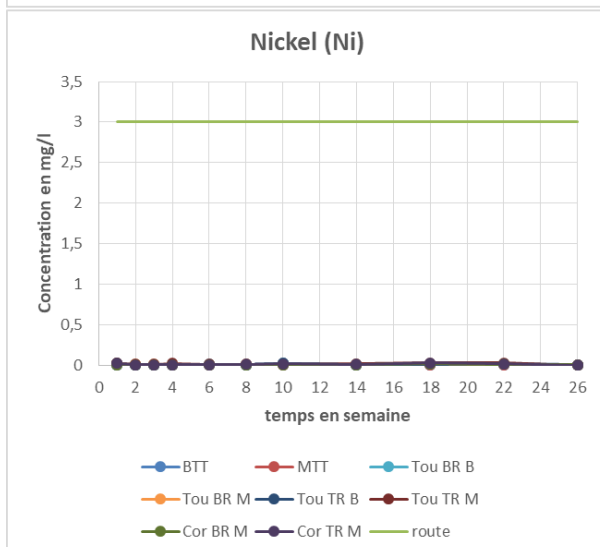
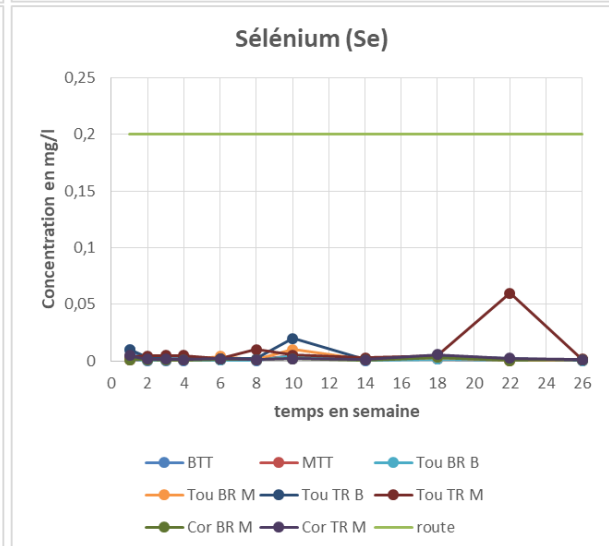
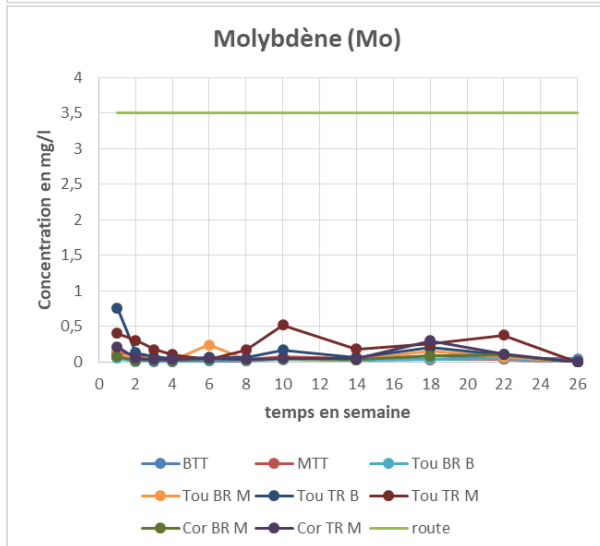
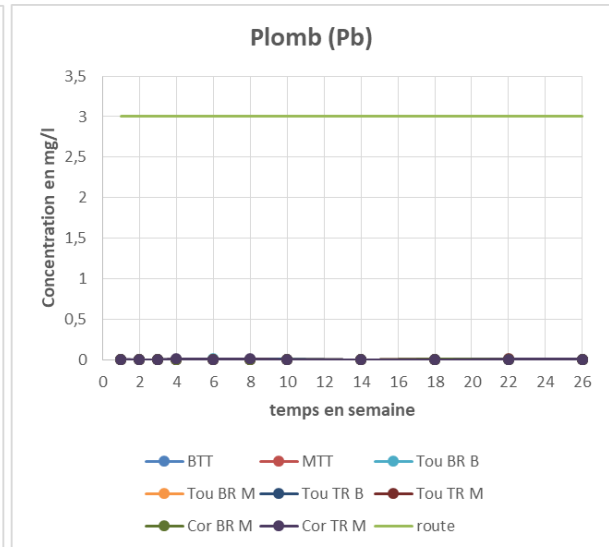
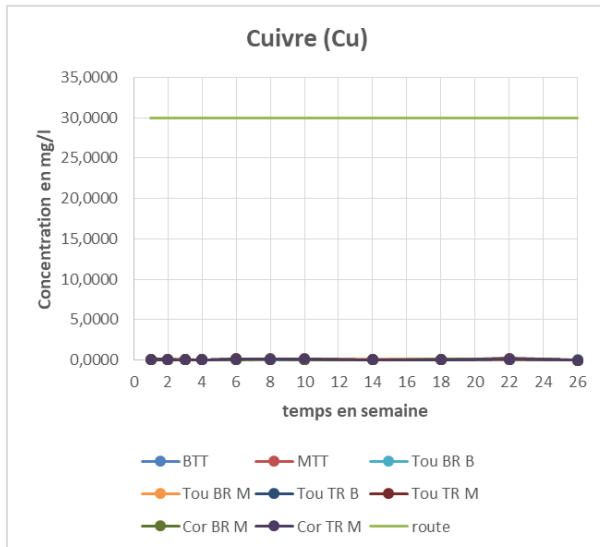
		Référence	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paramètres	Unités	LQ	S1	S2	S3	S4	S5-S6	S7-S8	S9-S10	S11 à 14	S15 à 18	S19 à 22	S23 à 26
pH			8,94	8,99	9,98	9,95	9,93	10,14	9,75	9,565	9,875	9,885	9,685
Conductivité	µS/cm à 20° c		903,5	850,4	674	766	1610,9	1692	2767,69	2258,5	3571,5	2719	2215,5
Chlorures	mg/l	1	25,9	23,5	21,7	20,8	18,6	19,7	22,4	43,9	18,9	15,2	16,2
Sulfates	mg/l	5	214	212	96,9	56	98,7	90,5	166	93,5	111	69	53,7
Fluorures	mg/l	0,1	0,53	1,2	1,7	1,1	1,4	1,3	2,1	1,5	2,2	1,9	1,3
Antimoine (Sb)	mg/l	0,0002	0,00508	0,00894	0,00986	0,00847	0,0136	0,014	0,02	0,0157	0,0197	0,0145	0,0145
Arsenic (As)	mg/l	0,0002	0,007	0,018	0,029	0,028	0,042	0,031	0,058	0,037	0,047	0,025	0,016
Baryum (Ba)	mg/l	0,0002	0,038	0,016	0,00511	0,007	0,006	0,008	0,011	0,029	0,06	0,006	0,033

Cadmium (Cd)	mg/l	0,0002	0,0002	0,00027	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,002	0,0002	0,0002	0,0002	0,005
Chrome (Cr)	mg/l	0,005	0,114	0,101	0,044	0,017	0,023	0,018	0,035	0,016	0,026	0,015	0,011	
Cuivre (Cu)	mg/l	0,0005	0,00885	0,00875	0,02	0,01	0,02	0,02	0,04	0,02	0,03	0,04	0,03	
Etain (Sn)	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,001	0,0182	0,001	0,001	
Mercure (Hg)	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,05	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	
Molybdène (Mo)	mg/l	0,005	0,139	0,102	0,061	0,027	0,048	0,039	0,071	0,053	0,032	0,039	0,026	
Nickel (Ni)	mg/l	0,002	0,0044	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,02	0,002	0,0032	0,002	0,005	
Plomb (Pb)	mg/l	0,0005	0,0005	0,0005	0,00064	0,0005	0,0005	0,0005	0,005	0,0005	0,00054	0,0005	0,005	
Sélénium (Se)	mg/l	0,0005	0,00085	0,00104	0,00098	0,00065	0,00138	0,00108	0,005	0,00133	0,00161	0,00063	0,0005	
Zinc (Zn)	mg/l	0,005	0,0062	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,05	0,0083	0,0247	0,0059	0,02	

RÉSULTATS DE SUIVI DES CONCENTRATIONS (mg/l)







RÉSULTATS DE SUIVI DU RELARGAGE SURFACIQUE (mg/m²)

