

Progetto - Projet

GEREMIA - Gestione dei reflui per il miglioramento delle acque portuali



PRODOTTO T2.1.2 : DEFINIZIONE DI INDICI INTEGRATI SPECIFICI PER I PORTI COINVOLTI NEL PROGETTO

LIVRABLE T2.1.2 : DEFINITION DES INDICES INTEGRES POUR LES PORTS IMPLIQUES DANS LE PROJET

Partner responsabile - Partner responsable : Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale - Dipartimento di Scienze della Vita e dell'Ambiente (DiSVA) dell'Università Politecnica delle Marche

Nome del prodotto	Redatto da:	Verificato da:	Validato da:
T2.1.2 – Definizione di indici integrati specifici per i porti coinvolti nel progetto	Giuseppe d’Errico, Stefania Gorbi, Francesco Regoli (DiSVA)	Maria Elena Piccione, Sara Dastoli, Valentina Vitiello (ISPRA), Laura Cutroneo (UNIGE)	Giovanni Besio, Marco Capello (UNIGE)
T2.1.2 : Définition des indices intégrés pour les ports impliqués dans le projet	Sara Dastoli, Valentina Vitiello (ISPRA)	Maria Elena Piccione (ISPRA), Laura Cutroneo (UNIGE)	Giovanni Besio, Marco Capello (UNIGE)

Descrizione del Prodotto: Sono stati definiti indici basati sull'integrazione pesata e combinata di un numero minimo di linee di evidenza tale da conservare lo stesso livello di robustezza del modello completo (con tutte e sette le linee di evidenza).

Description du livrable: Les indices ont été définis sur la base de l'intégration pondérée et combinée d'un nombre minimum de lignes de preuve de manière à maintenir le même niveau de robustesse que dans le modèle complet (avec les sept lignes de preuve).

Sintesi

Lo scopo complessivo dello studio è stato quello di effettuare una valutazione approfondita delle condizioni ambientali nelle aree portuali di Olbia, Genova, La Spezia e Tolone. L'aspetto fondamentale di questo prodotto è stato l'elaborazione dei risultati mediante l'applicazione di criteri di valutazione ponderata e la loro integrazione secondo l'approccio Weight of Evidence (WOE). Per questo studio infatti abbiamo parzialmente rielaborato e applicato il modello WOE Sediqualsoft che, integra differenti tipologie di dati (o Linee di Evidenza, LOE), tra cui la caratterizzazione chimica dei sedimenti e della colonna d'acqua, la misura del bioaccumulo in organismi bioindicatori, le risposte dei biomarker, l'applicazione di saggi ecotossicologici e la valutazione delle comunità bentoniche. I risultati di ciascuna LOE vengono inizialmente analizzati all'interno di specifici moduli, che utilizzano flowchart e algoritmi matematici appropriati per elaborare ampi data-sets di dati applicando criteri ponderati. Al termine di questa fase vengono forniti indici di pericolo specifici per ciascuna LOE, che sono poi

integrati, dando loro un peso diverso in funzione della rilevanza ecologica di ciascuna tipologia di indagine, per l'elaborazione finale di un indice di rischio complessivo.

Tale lavoro è stato effettuato per tutte le campagne in modo da riuscire a valutare ed evidenziare l'andamento delle condizioni di pericolosità ambientale nel tempo.

Per quanto riguarda la prima campagna, tutti i siti di indagine dei vari porti hanno evidenziato una condizione di rischio ecologico Assente o Basso.

Nella seconda campagna, le condizioni ambientali dei porti mostrano generalmente un passaggio di classe:

- il porto di Olbia passa da una condizione di assenza di rischio ad una classe di rischio Basso (dovuto sia ad un numero maggiore di LOEs investigate sia ad un aumento del livello di pericolo ecotossicologico (LOE5) nella II campagna).
- il porto di Genova da una classe di rischio Basso ad una classe di rischio Medio (dovuto generalmente ad aumento del livello di pericolo della LOE 3 (Biodisponibilità), LOE 4 (Biomarker) e LOE 5);
- il porto di La Spezia mostra una situazione simile rispetto alla campagna precedente con una classe di rischio Basso, ad eccezione del sito "Molo Fornelli" che evidenzia una classe di rischio Medio (dovuto principalmente ad un aumento del livello di pericolo chimico dei sedimenti (LOE 1) e anche alla LOE5;
- il porto di Tolone passa da una condizione ambientale con un rischio Assente/Basso a Basso/Medio (dovuto principalmente ad un aumento della LOE 1.

Sinthese

L'objectif général de l'étude était de réaliser une évaluation approfondie des conditions environnementales dans les zones portuaires d'Olbia, Gênes, La Spezia et Toulon. L'aspect clé de ce produit a été l'élaboration des résultats par l'application de critères d'évaluation pondérés et leur intégration selon l'approche Weight of Evidence (WOE). Pour cette étude, nous avons partiellement révisé et appliqué le modèle WOE de Sediqualsoft, qui intègre différents types de données (ou Lines of Evidence, LOE), notamment la caractérisation chimique des sédiments et de la colonne d'eau, la mesure de la bioaccumulation dans les organismes bioindicateurs, les réponses des biomarqueurs, l'application de tests écotoxicologiques et l'évaluation des communautés benthiques. Les résultats de chaque LOE sont initialement analysés dans des modules spécifiques, qui utilisent des organigrammes et des algorithmes mathématiques appropriés pour traiter de grands ensembles de données en appliquant des critères pondérés. À la fin de cette phase, des indices de risque spécifiques sont fournis pour chaque LOE, qui sont ensuite intégrés, en leur donnant un poids différent selon la pertinence écologique de chaque type d'enquête, pour l'élaboration finale d'un indice de risque global.

Ce travail a été effectué pour toutes les campagnes afin de pouvoir évaluer et mettre en évidence la tendance des conditions de danger environnemental dans le temps.

Lors de la première campagne, tous les sites étudiés dans les différents ports présentaient une condition de risque écologique absente ou faible.

Lors de la deuxième campagne, les conditions environnementales des ports montrent généralement un changement de classe :

- le port d'Olbia passe d'une condition de risque Absent à une classe de risque Faible (en raison à la fois d'un nombre plus élevé de LOEs étudiés et d'une



Interreg



UNION EUROPEENNE
UNIONE EUROPEA



MARITTIMO–IT FR–MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Prodotto n. T2.1.2

augmentation du niveau de danger écotoxicologique (LOE5) dans la campagne II).

- le port de Gênes d'une classe de risque faible à une classe de risque moyen (généralement en raison d'une augmentation du niveau de danger de LOE 3 (biodisponibilité), LOE 4 (biomarqueur) et LOE 5) ;
- le port de La Spezia présente une situation similaire par rapport à la campagne précédente avec une classe de risque faible, à l'exception du site "Molo Fornelli" qui présente une classe de risque moyen (principalement en raison d'une augmentation du niveau de danger chimique des sédiments (LOE 1) et également LOE5 ;
- le port de Toulon passe d'une condition environnementale avec un risque Absent/Faible à un risque Faible/Moyen (principalement dû à une augmentation de la LOE 1.

Indice

1 - Introduction	1
2 - Application de critères d'intégration pondérés pour le traitement de données chimiques et biologiques	3
2.1 Critères d'intégration pondérés pour le traitement des données sur la chimie des sédiments.....	4
2.2 Critères d'intégration pondérés pour le traitement des données chimiques de la colonne d'eau	5
2.3 Critères d'intégration pondérés pour le traitement des données de biodisponibilité	7
2.4 Critères d'intégration pondérés pour le traitement des données sur les biomarqueurs.....	8
2.5 Critères d'intégration pondérés pour le traitement des données écotoxicologiques.....	9
2.6 Critères d'intégration pondérés pour le traitement des données sur les communautés benthiques	11
2.7 Élaboration finale du Poids de la preuve WOE et définition de l'indice intégré pour les environnements portuaires	14
3 - Port d'Olbia : développement de l'analyse des risques écologiques	16
3.1 - LOE1 Caratterizzazione chimica dei sedimenti	19
3.2 - LOE2 Caractérisation chimique de la colonne d'eau.....	19
3.3 - LOE3 Biodisponibilité.....	21
3.4 - LOE4 Biomarqueur.....	22
3.5 - LOE5 Essais écotoxicologiques	23
3.6 - LOE6 Communautés benthiques.....	24
3.7 - Analyse et traitement du risque écologique par la méthode du poids de la preuve (Weight Of Evidence - WOE)	25
4 - Port de Gênes : développement de l'analyse des risques écologiques	31
4.1 - LOE1 Caractérisation chimique des sédiments	33
4.2 - LOE2 Caractérisation chimique de la colonne d'eau.....	34

4.3 - LOE3 Biodisponibilità.....	36
4.4 - LOE4 Biomarqueur	38
4.5 - LOE5 Essais écotoxicologiques	40
4.6 - Analyse et traitement du risque écologique par la méthode du poids de la preuve (Weight Of Evidence - WOE)	41
5 - Port de La Spezia : développement de l'analyse des risques écologiques	45
5.1 - LOE1 Caractérisation chimique des sédiments	47
5.2 - LOE2 Caractérisation chimique de la colonne d'eau	48
5.3 - LOE3 Biodisponibilità.....	49
5.4 - LOE4 Biomarqueur	50
5.5 - LOE5 Tests écotoxicologiques	51
5.6 - Analyse et traitement des risques écologiques par la méthode du Weight Of Evidence (WOE).....	52
6 - Port de Toulon : développement de l'analyse du risque écologique	59
6.1 - LOE1 Caractérisation chimique des sédiments	60
6.2 - LOE2 Caractérisation chimique de la colonne d'eau	61
6.3 - LOE5 Essais écotoxicologiques	62
6.4 - Analyse et traitement des risques écologiques par la méthode du poids de la preuve (WOE)	63
7 - Indices intégrés spécifiques pour les ports impliqués dans le projet.....	67
8 - Bibliographie	70

1 - Introduction

L'objectif général de l'étude était de réaliser une évaluation approfondie des conditions environnementales dans les zones portuaires d'Olbia, Gênes, La Spezia et Toulon. L'aspect clé de ce produit a été l'élaboration des résultats par l'application de critères d'évaluation pondérés et leur intégration selon l'approche Weight of Evidence (WOE). L'évaluation de la qualité du milieu marin et l'analyse des risques écologiques sont des questions très complexes qui doivent être abordées par des approches multidisciplinaires, capables de fournir le plus grand nombre d'éléments utiles pour décrire la complexité d'un écosystème (Benedetti et al., 2014 ; Regoli et al., 2014, 2019). En même temps, il est fondamental que la complexité scientifique des données environnementales hétérogènes puisse être traitée de manière intégrée, avec le développement d'indices et d'échelles tant quantitatifs que qualitatifs, fournissant une caractérisation synthétique du risque qui, tout en maintenant la rigueur scientifique des élaborations, assure une communication plus facile aux organismes compétents. Pour cette étude, nous avons partiellement retravaillé et appliqué le modèle WOE de Sediqualsoft, qui intègre différents types de données (ou Lines of Evidence, LOE), notamment la caractérisation chimique des sédiments et de la colonne d'eau, la mesure de la bioaccumulation dans les organismes bioindicateurs, les réponses des biomarqueurs, l'application de tests écotoxicologiques et l'évaluation des communautés benthiques. Les résultats de chaque LOE sont initialement analysés dans des modules spécifiques, qui utilisent des organigrammes et des algorithmes mathématiques appropriés pour traiter de grands ensembles de données en appliquant des critères pondérés. À la fin de cette phase, des indices de danger spécifiques sont fournis pour chaque LOE, qui sont ensuite intégrés, en leur donnant un poids différent selon la pertinence écologique de chaque type de relevé, pour l'élaboration finale d'un indice de danger global (Regoli et al., 2014, 2019 ; Morroni et al., 2020).

L'application de critères d'intégration pondérés présente l'avantage d'abandonner la logique des évaluations basées exclusivement sur des approches tabulaires, et a déjà été validée dans de nombreux cas d'études, notamment des études sur des sédiments pollués, des résurgences naturelles et des déversements d'hydrocarbures, des urgences environnementales telles que le naufrage du Costa Concordia, des évaluations dans des zones marines complexes comprenant des zones portuaires ou impactées par des rejets miniers et industriels, la caractérisation de champs off-shore (Piva et al, 2011 ; Benedetti et al., 2012, 2014 ; Regoli et al., 2014 ; Bebianno et al., 2015 ; Frantzen et al., 2016 ; Mestre et al., 2017 ; Lehtonen et al., 2019 ; Regoli et al., 2019 ; Morroni et al., 2020).

2 - Application de critères d'intégration pondérés pour le traitement de données chimiques et biologiques

Toutes les données ont été traitées avec le modèle d'analyse de risque (SediquaSoft ; Produit T2.1.1. Définition du modèle conceptuel pour la création de l'indice intégré) basé sur une approche quantitative de type Weight Of Evidence (WOE), capable d'intégrer les résultats obtenus à partir de différents types d'investigation (ou lignes de preuve, LOE), dans l'évaluation du risque écologique.

Ce modèle contient des algorithmes et des organigrammes spécifiques qui, sur la base d'objectifs précis et d'hypothèses de jugement d'experts, permettent l'application de critères d'intégration pondérés à de grands ensembles de données obtenus à partir de 6 lignes de preuve : caractérisation chimique des sédiments (LOE-1), caractérisation chimique de la colonne d'eau (LOE-2), biodisponibilité des contaminants dans les organismes bioindicateurs (LOE-3), effets sublétaux mesurés par des batteries de biomarqueurs (LOE-4), effets toxiques mesurés par l'application d'essais écotoxicologiques (LOE-5) et analyse des communautés benthiques (LOE-6). Les données sont analysées au sein de modules spécifiques capables de fournir pour chaque type de données, à la fois un indice quantitatif de danger (HQ, Hazard Quotient), et un jugement synthétique du niveau de danger (divisé en 5 classes allant d'absent à très élevé). Ces procédures de calcul ont été développées au sein d'un logiciel dédié qui, malgré le traitement de données complexes en indices synthétiques, conserve néanmoins des informations de grande importance et de valeur scientifique utiles pour toute étude ultérieure. Le modèle SediquaSoft comprend également un module final de traitement des WOE qui intègre les différentes lignes de preuves, en leur donnant un poids différent selon leur pertinence pour les objectifs de l'enquête, pour arriver à une évaluation quantitative et qualitative du risque écologique.

2.1 Critères d'intégration pondérés pour le traitement des données sur la chimie des sédiments

Les résultats analytiques obtenus pour les sédiments ont été traités à l'aide du logiciel SediQualsoft (Produit T2.1.1. Définition du modèle conceptuel pour la création de l'indice intégré). Grâce à l'utilisation de critères d'intégration pondérés, la logique de dépassement de la valeur tabulaire, voire de la valeur minimale par un seul paramètre, est abandonnée comme principe fondamental de la caractérisation chimique.

Tous les paramètres chimiques dont l'analyse est prévue ont un "poids", ce qui permet de donner une plus grande pertinence dans la classification chimique des sédiments à la variation des polluants qui sont caractérisés par une plus grande toxicité, une tendance à la bioaccumulation ou une persistance dans l'environnement.

Le traitement des données chimiques commence par la comparaison des concentrations mesurées pour chaque paramètre avec les valeurs indiquées dans les références normatives ou les NQE adoptées en fonction de l'objectif de protection choisi. Dans cette étude, les références utilisées pour les différents paramètres chimiques sont celles liées aux limites L2 fournies par le DM 173/2016 sur la caractérisation et la classification de la qualité des sédiments marins soumis à des activités de manipulation.

Ensuite, pour chaque paramètre chimique analysé, on calcule l'écart par rapport à la limite de référence, c'est-à-dire le rapport à la référence (RTR). La valeur RTR est corrigée en fonction du "poids" du contaminant afin d'obtenir un RTRw (corrigé), afin de souligner l'importance des variations pour les contaminants les plus dangereux.

Le calcul du danger chimique global (Quotient de danger : HQchimique) est dérivé de la moyenne de tous les RTRw des paramètres dont le RTR < 1 (c'est-à-dire dont les valeurs sont inférieures aux seuils de référence), additionnée à la somme \sum des RTRw de tous les contaminants RTR > 1.

Les coefficients N et M indiquent le nombre de paramètres avec $RTR < \text{ou} > 1$ respectivement, tandis que j et k sont des indices qui permettent de répéter le calcul N ou M fois.

Le résultat de cet algorithme représentera l'indice chimique global HQc ; cet indice sera ensuite classé, en lui attribuant une classe de danger (d'Absent à Très élevé), caractérisée par une couleur différente selon sa gravité.

Comme la procédure de calcul ne change pas selon le type de référence choisi pour la comparaison, les données chimiques peuvent être traitées en même temps afin d'obtenir une valeur de HQc et une classe de danger chimique par rapport à d'autres références adoptées au niveau local ou, au contraire, par des normes internationales.

2.2 Critères d'intégration pondérés pour le traitement des données chimiques de la colonne d'eau

Les résultats analytiques obtenus pour la colonne d'eau ont été traités à l'aide du logiciel SediQualsoft (Produit T2.1.1. Définition du modèle conceptuel pour la création de l'indice intégré). Le module pour l'élaboration de l'indice de danger relatif à la caractérisation chimique de l'eau est essentiellement basé sur le même algorithme de calcul déjà décrit pour la ligne de preuve précédente, ajusté toutefois en ce qui concerne les limites et les références normatives utilisées pour la comparaison avec les résultats de l'enquête.

Toujours dans ce module, la première partie fournit un ensemble d'informations générales sur le site et l'échantillonnage (y compris la profondeur éventuelle de l'échantillonnage), puis l'inclusion des concentrations mesurées dans les différents échantillons d'eau pour la liste des analytes rapportés dans le DM 260/2010, notamment les métaux, les hydrocarbures volatils, les hydrocarbures aliphatiques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les polychlorobiphényles, les pesticides et les composés organohalogénés, les composés organostanniques, les dioxines et les

composés de type dioxine, les solvants aromatiques, halogénés, nitro-aromatiques, les phénols, les amines aromatiques, etc.

Dans LOE-2 également, les différents composés se sont vus attribuer un "poids" entre 1 et 1,3 en fonction de leur présence dans la liste des substances prioritaires ou dangereuses et prioritaires (directive 2008/105/CE) ; ce poids attribué peut être modifié par l'utilisateur du programme, et la liste des composés chimiques à analyser peut également être facilement mise à jour en cas d'exigences spécifiques.

Le fonctionnement du module LOE-2 ne nécessite pas que tous les analytes aient été analysés : les valeurs mesurées sont alors comparées aux références normatives des normes de qualité environnementale (NQE) du DM 260 de 2010.

Le calcul du quotient de danger spécifique pour la caractérisation chimique de l'eau est basé sur les mêmes critères, hypothèses et avis d'experts que ceux utilisés pour les sédiments. Pour chaque paramètre, l'écart par rapport à la référence, le RTR (Ratio To Reference), est calculé, puis corrigé pour le type (poids) de contaminant (RTRw), afin de souligner l'importance des contaminants les plus dangereux. Le quotient de danger spécifique à cette LOE calcule un RTRw moyen pour tous les paramètres dont le RTR ≤ 1 (c'est-à-dire des valeurs inférieures aux NQE), tandis que pour les contaminants dont le RTR > 1 , les RTRw individuels sont additionnés en une somme Σ .

Dans cette lignée, le modèle traite également l'indice TRIX, qui n'est cependant pas utilisé dans l'intégration finale de l'indice de risque chimique des eaux (HQC') mais qui peut être un appui.

Sur la base d'un jugement d'expert, l'indice de danger chimique de l'eau est attribué à une classe de danger chimique (d'absent à très élevé) ; la sortie du modèle fournit, en plus de la valeur de HQC' et du niveau de danger respectif attribué, des informations supplémentaires importantes telles que la distribution en pourcentage des paramètres analysés dans les 5 classes de danger.

2.3 Critères d'intégration pondérés pour le traitement des données de biodisponibilité

Le traitement des données de biodisponibilité est essentiel car il permet d'établir le danger associé au transfert éventuel des contaminants environnementaux vers le compartiment biotique. Dans le calcul du risque de biodisponibilité (HQBA) (Produit T2.1.1. Définition du modèle conceptuel pour la création de l'indice intégré), la variation de la concentration par rapport aux contrôles (RTR) est calculée pour chaque paramètre, corrigée une nouvelle fois en fonction du type de contaminant et de la signification statistique des différences (RTRw). La signification statistique de la variation par rapport aux contrôles est évaluée en appliquant le coefficient Z, calculé en fonction de la valeur obtenue par le test T pour les données à variance non homogène (point 4 de l'organigramme de la figure 6). Le coefficient Z a une valeur de 1 (pas de réduction de l'effet) lorsque l'échantillon est significativement différent du contrôle ($p < 0,05$), tandis qu'il diminue au fur et à mesure que la significativité diminue, passant de manière linéaire de 1 à 0,5 lorsque p passe de 0,05 à 0,06 ; pour les valeurs de p supérieures à 0,06, le coefficient Z diminue rapidement de façon non linéaire jusqu'à 0,2 lorsque p tend vers 1. Cette correction réduit progressivement le poids global d'un paramètre dont la variation moyenne n'est pas statistiquement significative, mais n'élimine pas complètement sa contribution au calcul du HQBA.

En fonction de l'ampleur de la variation, qui tient également compte de la variabilité naturelle des concentrations tissulaires de contaminants, les différents paramètres analysés sont affectés à l'une des 5 classes d'effets (absents à très élevés) : absents à faibles si $RTRw < 2,6$, modérés si $2,6 \leq RTRw < 6,5$, élevés si $6,5 \leq RTRw < 13$, et très élevés si $RTRw \geq 13$. La valeur cumulée du HQBA est ensuite calculée sans tenir compte des paramètres dont le $RTRw$ est $< 1,3$ (aucun effet), en faisant la moyenne de ceux dont le $RTRw$ est compris entre 1,3 et 2,6 (effet faible), et en additionnant (Σ) tous les $RTRw > 2,6$ (effets modérés, élevés et très élevés) : en fonction de la distribution en

% des paramètres dans les différentes classes d'effets, le modèle indique la classe de danger globale pour la biodisponibilité.

2.4 Critères d'intégration pondérés pour le traitement des données sur les biomarqueurs

Le module d'analyse des biomarqueurs peut traiter les résultats obtenus à partir d'une large liste de biomarqueurs parmi les plus utilisés par la communauté scientifique (Produit T2.1.1. Définition du modèle conceptuel pour la création de l'indice intégré). Chaque biomarqueur est associé à un poids compris entre 1 et 3 en fonction de la pertinence biologique de la réponse et du niveau de connaissance des mécanismes impliqués ; en outre, pour chaque biomarqueur, en fonction de l'espèce et du tissu, un seuil de variation biologiquement significatif est également établi (Seuil) qui tient compte des éventuelles réponses biphasiques de certains biomarqueurs qui peuvent être à la fois induites et inhibées. Pour garantir une approche multi-biomarqueurs, le modèle requiert certaines exigences minimales en termes de nombre et d'importance des biomarqueurs analysés. Pour calculer l'indice de risque cumulatif pour les biomarqueurs HQBM, la variation mesurée pour chaque biomarqueur est comparée au seuil spécifique (E) et ajusté (EW) à la fois pour l'importance biologique de la réponse et la signification statistique de la différence par rapport au contrôle en appliquant le coefficient Z déjà décrit pour le traitement des données de biodisponibilité. Chaque biomarqueur est ensuite affecté à une classe d'effet (d'absent à très élevé) en fonction de l'ampleur de la variation par rapport au seuil : absent ou faible si $E < 1$, moyen avec E entre 1 et 2, élevé si E est entre 2 et 3, très élevé pour les biomarqueurs avec $E > 3$. Les résultats de tous les biomarqueurs sont pondérés différemment dans le calcul du risque cumulatif HQBM, qui ne tient pas compte de la contribution des biomarqueurs à effet absent ou faible, calcule l'Ew moyen des réponses à effet modéré et ajoute (Σ) les Ew des réponses à effet élevé ou très élevé.

L'attribution d'une des 5 classes de gravité est dérivée de la distribution en pourcentage des réponses des biomarqueurs dans les 5 classes d'effet. Le modèle indique le nombre de biomarqueurs dans chacune des 5 classes, la valeur du risque cumulatif HQBM et la classe de risque globale pour les biomarqueurs.

2.5 Critères d'intégration pondérés pour le traitement des données écotoxicologiques

L'élaboration des résultats écotoxicologiques des sédiments a été réalisée en appliquant les critères d'intégration pondérée, qui ont également été mis en œuvre par le décret ministériel n° 173 du 15 juillet 2016 " Règlement contenant les modalités et les critères techniques pour l'autorisation de l'immersion en mer des matériaux d'excavation des fonds marins " (Produit T2.1.1. Définition du modèle conceptuel pour la création de l'indice intégré).

Ces critères prennent en compte des aspects importants et des caractéristiques spécifiques des tests biologiques individuels utilisés dans la batterie, notamment la pertinence toxicologique de la réponse biologique mesurée, l'ampleur et la signification statistique de la différence d'effet entre l'échantillon et le contrôle, la sensibilité des espèces testées, le type d'exposition (aiguë ou chronique) et la matrice testée. En ce sens, pour chacun des tests prévus dans les différents types de batteries, il existe un "seuil" d'effet qui représente la variation minimale considérée comme biologiquement significative pour chaque condition expérimentale, et des "poids" qui sont attribués à chaque test en fonction de la pertinence biologique du point final mesuré, de la durée d'exposition et de la matrice testée (Piva et al., 2011 ; Benedetti et al., 2012).

Les étapes et les procédures de calcul pour l'intégration des résultats et la formulation du jugement de toxicité sont décrites ci-dessous.

- après vérification des données, l'effet (E_i) est calculé pour chaque essai biologique, entendu comme le pourcentage de changement du point final mesuré,

compensé au moyen de la correction d'Abbott par rapport aux changements observés dans le contrôle ;

- l'effet E_i est corrigé en fonction de la signification statistique de la variation par rapport aux contrôles, en appliquant le coefficient Z . Cette correction réduit progressivement le poids global d'une analyse qui n'est pas statistiquement significative, mais n'élimine pas complètement sa contribution à la batterie ;

- chaque effet (E_i) multiplié par son coefficient Z , est lié au "seuil" spécifique de cet essai ; l'effet corrigé (E_{iw}) ainsi obtenu indique de combien de fois la variation mesurée dans un essai dépasse celle considérée comme biologiquement pertinente ;

- seulement pour certains essais, lorsqu'il est possible d'obtenir un éventuel effet hormétrique (comme dans le cas de la bioluminescence bactérienne ou de la croissance des algues), on attribue une valeur de E_{iw} égale à 0 si l'effet hormétrique est $< 40\%$, 1,25 si l'effet hormétrique est $> 40\%$ mais $< 100\%$, égale à 1,5 si l'effet hormétrique est $> 100\%$;

- l'indice de danger global de la batterie de tests écotoxicologiques (Hazard Quotient, HQBattery) est calculé comme la somme des effets pondérés (E_{iw}) des tests individuels, encore corrigés selon le facteur W_2 , qui correspond au produit des pondérations attribuées en fonction de la pertinence biologique du critère considéré, de la pertinence écologique de la matrice testée et de l'exposition aiguë ou chronique des organismes.

- Pour l'attribution du niveau de danger résultant de la batterie d'essais écotoxicologiques, la valeur obtenue pour l'indice HQBattery est normalisée sur une échelle comprise entre 0 et 10, où 1 correspond à la valeur seuil de la batterie (c'est-à-dire la valeur HQ qui serait obtenue si tous les essais de la batterie montraient un effet égal au seuil respectif) et 10 correspond à la valeur maximale de la batterie (lorsque tous les essais montrent un effet de 100%). En fonction de la valeur normalisée de HQBattery, le niveau de danger écotoxicologique est affecté à une classe de gravité

(d'absent à très élevé), identifiée par une couleur différente : Absent/blanc si HQBattery <1 ; Faible/bleu clair si HQBattery ≥1 et <1,5 ; Moyen/jaune si HQBattery ≥1,5 et <3 ; Élevé/rouge si HQBattery ≥3 et <6 ; Très élevé/noir si HQBattery ≥6.

2.6 Critères d'intégration pondérés pour le traitement des données sur les communautés benthiques

Le module de traitement des données sur les communautés benthiques calcule automatiquement les descripteurs de communautés, les indices de diversité taxonomique et les indicateurs écologiques suivants (Produit T2.1.1. Définition du modèle conceptuel pour la création de l'indice intégré) :

- Densité (N)

Nombre total d'individus dans l'échantillon ;

- Richesse spécifique (S)

Représenté par le nombre d'espèces présentes dans chaque échantillon ;

- Indice de Margalef (D) ou richesse spécifique

L'indice de Margalef (Margalef, 1969) est une mesure du nombre d'espèces (S) par rapport au nombre total d'individus présents N :

$$D = \frac{S - 1}{\ln(N)}$$

- Diversité des espèces ou hétérogénéité globale (H')

En utilisant l'indice de Shannon (Shannon et Wiener, 1963) donné par la formule

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

Où S est le nombre total d'espèces et P est la fréquence de l'espèce i-enisme.

En outre, le module renvoie le statut de qualité écologique (EcoQ) basé sur l'indice de diversité de Shannon-Wiener proposé par Simboura et Zenetos (EcoQI ; Simboura et Zenetos, 2001) et celui proposé par Vincent (EcoQII ; Vincent, 2002) ;

- Equidistribution (J)

Calculé en utilisant l'indice de Pielou (Pielou, 1969) qui considère la distribution des abondances des individus au sein des espèces présentes dans l'échantillon :

$$J = \frac{H'}{H'_{max}} = \frac{H'}{\text{Log}_2 S}$$

où H' est l'indice de Shannon et S le nombre total d'espèces ;

- AMBI (indice de biotique marine ATZI)

L'indice AMBI (Borja et al. 2000) utilisé pour les communautés de substrats mous, est basé sur la classification des espèces benthiques en cinq groupes écologiques qui correspondent à différents niveaux de sensibilité. L'indice tient compte de la composition de la population, en assignant chaque espèce à un groupe écologique en fonction de sa sensibilité ou de sa tolérance au stress environnemental, ce qui permet de classer, comme l'exige la directive 2000/60/CE, les environnements marins côtiers.

La formule proposée par Borja et al. (2000) est la suivante :

$$AMBI = \frac{[(0 \times \%GI) + (1.5 \times \%GII) + (3 \times \%GIII) + (4.5 \times \%GIV) + (6 \times \%GV)]}{100}$$

où GI=espèces sensibles ; GII=espèces indifférentes ; GIII=espèces tolérantes ; GIV=espèces opportunistes de second ordre ; GV=espèces opportunistes de premier ordre. La valeur de l'AMBI varie de 0 (environnement non pollué ou perturbé) à 7 (environnement extrêmement pollué et azoïque).

- M-AMBI

L'indice M-AMBI (Muxika et al., 2007) est un indice multimétrique qui combine l'indice AMBI, l'indice de diversité de Shannon et l'indice de richesse spécifique en utilisant une technique d'analyse multivariée.

M-AMBI fournit un indice allant de 0 (état écologique médiocre) à 1 (état écologique élevé) et les valeurs de référence utilisées pour chaque métrique sont celles fournies par le DM 260 de 2010.

- BENTIX

L'indice BENTIX (Simboura et Zenetos, 2002) est un autre indice permettant d'évaluer l'EcoQ et prend en compte la sensibilité/tolérance des organismes aux perturbations et leur répartition en trois groupes écologiques. Voici la formule de l'indice BENTIX :

$$BENTIX = \frac{[6 \times \%GI + 2 \times (\%GII + \%GIII)]}{100}$$

où GI : espèces sensibles aux événements perturbateurs ; GII : espèces tolérantes à la pollution ; GIII : comprend les opportunistes de premier ordre. Comme pour l'AMBI, la valeur de BENTIX renvoie une classification du degré de pollution et du statut écologique.

- BOPA (indice des polychètes amphipodes benthiques opportunistes)

L'indice BOPA (Dauvin et Ruellet, 2007) est basé sur le rapport entre les polychètes opportunistes et les amphipodes (sauf pour le genre Jassa). Les organismes sont classés au niveau de la famille et non au niveau de l'espèce comme les indices précédents. L'indice BOPA est calculé comme suit :

$$BOPA = \log \left[\frac{fp}{fa + 1} + 1 \right]$$

où f_p est la fréquence des polychètes opportunistes ; f_a est la fréquence des amphipodes.

La valeur du BOPA est faible lorsque l'état environnemental est bon, avec peu d'espèces opportunistes, et augmente avec l'enrichissement organique.

- BITS (Indice benthique basé sur la suffisance taxonomique)

Le BITS est un indice développé par Mistri et Munari (2008) spécifiquement pour les lagunes côtières méditerranéennes et classe les organismes au niveau de la famille. La formule proposée par Mistri et Munari est la suivante :

$$BITS = \log \left[\frac{6f_I + f_{II}}{f_{III} + 1} + 1 \right] + \log \left[\frac{n_I}{n_{II} + 1} + \frac{n_I}{n_{III} + 1} + \frac{0.5n_{II}}{n_{III} + 1} + 1 \right]$$

où f_I , f_{II} et f_{III} représentent le rapport entre le nombre d'individus appartenant aux familles sensibles (f_I), tolérantes (f_{II}) et opportunistes (f_{III}) sur le nombre total d'individus collectés dans l'échantillon, tandis que n_I , n_{II} et n_{III} représentent le nombre de familles, sensibles (n_I), tolérantes (n_{II}) et opportunistes (n_{III}), présentes dans l'échantillon.

La valeur du BITS est nulle lorsqu'il n'y a pas de familles sensibles et tolérantes dans l'échantillon, tandis qu'elle est élevée lorsque l'état de l'environnement est bon et que les familles opportunistes sont peu nombreuses.

L'évaluation d'EcoQ avec BITS varie selon le type de substrat (sable ou boue).

2.7 Élaboration finale du Poids de la preuve WOE et définition de l'indice intégré pour les environnements portuaires

Les résultats obtenus sur les indices de danger calculés pour les différentes LOE sont intégrés dans la phase finale par le biais d'une approche WOE classique qui

Prodotto n. T2.1.2

attribue des poids différents aux divers types de données en fonction de leur pertinence écologique. Les pondérations attribuées aux indices de danger élaborés pour les différents éléments de preuve étaient les suivantes : 1,0 pour la caractérisation chimique des sédiments (LOE-1), 0,9 pour la caractérisation chimique de la colonne d'eau (LOE-2), 1. 2 pour la biodisponibilité des contaminants (LOE-3), 1,0 pour les réponses sublétales au niveau subcellulaire mesurées par des biomarqueurs (LOE-4), 1,2 pour les effets de toxicité aiguë au niveau de l'organisme (LOE-5), 1,3 pour les analyses des communautés benthiques (LOE-6). Après normalisation des indices de danger à une échelle commune, l'ensemble du traitement WOE conduit à un résumé du risque qui fournit à la fois une valeur quantitative et une affectation qualitative à un niveau allant de " Absent " à " Très élevé " (Benedetti et al., 2014 ; Regoli et al., 2014 ; 2019) (Produit T2.1.1. Définition du modèle conceptuel pour la création de l'indice intégré).

3 - Port d'Olbia : développement de l'analyse des risques écologiques

Il est maintenant universellement reconnu que la caractérisation de la qualité de l'environnement et des risques écologiques doit être abordée avec des approches multidisciplinaires qui intègrent les analyses chimiques traditionnelles dans les matrices abiotiques (eau et sédiments), avec celles indiquant l'apparition d'effets biologiques causés par les contaminants à différents niveaux de l'organisation biologique, depuis les processus de bioaccumulation, jusqu'à l'apparition d'altérations moléculaires dans les populations et les communautés (Galloway et al., 2004 ; Chapman, 2007 ; Viarengo et al., 2007 ; Regoli et al., 2019).

La combinaison d'analyses chimiques et biologiques représente une valeur ajoutée pour les protocoles de surveillance et de gestion, et est conforme aux récentes directives européennes qui recommandent l'utilisation de multiples indicateurs de qualité pour évaluer l'état de la qualité environnementale des écosystèmes aquatiques, (Galloway et al., 2004 ; Moore et al., 2006 ; Chapman, 2007 ; Hagger et al., 2008 ; Chapman et al., 2013 ; Marigómez et al., 2013).

Dans cette étude, on a appliqué un modèle d'analyse des risques de type Weight Of Evidence (WOE), qui est capable de traiter toutes les données au moyen d'algorithmes mathématiques appropriés et de critères d'évaluation pondérés spécifiques aux différents types d'enquête (ou lignes de preuve, LOE).

Les données recueillies dans la zone portuaire d'Olbia se réfèrent à 6 LOE principaux : caractérisation chimique des sédiments en référence aux valeurs L2 du DM 173/2016 (LOE-1), caractérisation chimique de la colonne d'eau en référence aux NQE du D. Lgs 172/2015 (LOE-2), biodisponibilité des métaux et ou.

organiques pour les moules transplantées (LOE-3), effets sublétaux mesurés par des batteries de biomarqueurs chez les moules transplantées (LOE-4), caractéristiques écotoxicologiques des sédiments évaluées par une batterie de tests biologiques (LOE-5), analyse des communautés benthiques dans les sédiments (LOE-6) (tableau 3.1).

L'application des critères d'intégration pondérés pour le traitement des données a permis de résumer de grands ensembles de données de résultats scientifiques complexes en une série d'indices synthétiques de danger, chacun étant spécifique à chaque type d'enquête (ou ligne de preuve, LOE). Au-delà de l'importance de disposer de tous ces indices synthétiques qui permettent une évaluation plus facile de la signification globale des résultats obtenus pour chaque type d'analyse, une autre valeur ajoutée est l'intégration pondérée de types de données différents et hétérogènes : cela permet de renforcer une approche multidisciplinaire, en obtenant des niveaux d'évaluation de plus en plus complexes, jusqu'à la caractérisation du risque écologique.

Tableau 3.1. Type de données collectées dans la zone portuaire d'Olbia lors des différentes campagnes.

	LOE	Analyses	Période	Échantillons
1	Caractérisation chimique des sédiments	Granulométrie Métaux: Al - As - Cd- Cr _{tot} - Cu- Fe- Hg - Ni- Pb- Zn Composés organostanniques IPA hydrocarbures aromatiques polycycliques PCB biphényles polychlorés Pesticides	I Campagne (juin 2018) II Campagne (mai 2019) III Campagne (novembre 2019)	- Banchina Isola Bianca (SE-01) - Foce Padrongianus (SE-02) - Cala Saccaia - (SE-03)
2	Caractérisation chimique de la Colonne d'eau	Métaux: Cr _{tot} -Cu - Fe - Mn - Ni - Pb - Zn Autres par.: pH - Temp - Cond - Turb	III Campagne (novembre 2019)	Pt1 à Pt 10
3	Biodisponibilité <i>Mytilus galloprovincialis</i>	Métaux: As - Cd - Cr _{tot} - Cu- Hg - Ni- Pb- Zn Composés organostanniques IPA hydrocarbures aromatiques polycycliques PCB biphényles polychlorés	I Campagne (juin 2018) II Campagne (mai 2019)	- Banchina Isola Bianca (MT-01) - Foce Padrongianus (MT-02) - Cala Saccaia (MT-03)
4	Biomarqueurs <i>Mytilus galloprovincialis</i>	Métallothionéine Acétylcholinestérase Micronoyaux LS NRRT % Phagocytose Rapport Gran/Ian	II Campagne (mai 2019)	- Banchina Isola Bianca (MT-01) - Foce Padrongianus (MT-02) - Cala Saccaia (MT-03)
5	Tests écotoxicologiques	Embryotoxicité - <i>Paracentrotus Lividus</i> Croissance des algues - <i>Phaeodactylum tricorntutum</i> Bioluminescence - <i>Aliivibrio fischeri</i> en phase solide	I Campagne (juin 2018) II Campagne (mai 2019) III Campagne (novembre 2019)	- Banchina Isola Bianca (SE-01) - Foce Padrongianus (SE-02) - Cala Saccaia (SE-03)
6	Communautés benthiques	Espèce/abondance	II Campagne (mai 2019)	- Banchina Isola Bianca (SE-01) - Foce Padrongianus (SE-02) - Cala Saccaia (SE-03)

3.1 - LOE1 Caratterizzazione chimica dei sedimenti

Les résultats chimiques ont été traités en utilisant les critères d'intégration pondérés qui, par rapport aux références réglementaires du DM 173/16 (L2), élaborent un indice de danger chimique basé sur le nombre de contaminants dépassant la référence spécifique, la dangerosité de ces paramètres et l'ampleur des dépassements mesurés. Ces critères d'intégration pondérés abandonnent la logique du simple dépassement de la valeur tabulée, même par un minimum et par un seul paramètre, comme principe de classification chimique de la qualité des sédiments.

Comme indiqué dans le tableau 3.2, le traitement global de tous les résultats par rapport à L2 (DM 173/2016) a fourni une classe de danger chimique Absente pour tous les échantillons de la zone portuaire d'Olbia dans les trois campagnes, avec un indice de danger chimique (HQ) toujours inférieur à 0,2.

Tableau 3.2. Niveaux de danger chimique obtenus à partir du traitement pondéré des données chimiques de tous les sédiments du port d'Olbia en référence aux limites L2 (DM 173/2016).

Code Échantillon	Zone	Campagne	HQ	% max/RTR	N. param. dép.	Niveau de danger chimique
GR-OL-I-SE-01	Banchina Isola Bianca	I	0,09	-	0	ABSENT
GR-OL-I-SE-02	Foce Padrongianus	I	0,05	-	0	ABSENT
GR-OL-I-SE-03	Area esterna	I	0,05	-	0	ABSENT
GR-OL-II-SE-01	Banchina Isola Bianca	II	0,11	-	0	ABSENT
GR-OL-II-SE-02	Foce Padrongianus	II	0,05	-	0	ABSENT
GR-OL-II-SE-03	Area esterna	II	0,05	-	0	ABSENT
GR-OL-III-SE-01	Banchina Isola Bianca	III	0,05	-	0	ABSENT
GR-OL-III-SE-02	Foce Padrongianus	III	0,04	-	0	ABSENT
GR-OL-III-SE-03	Area esterna	III	0,09	-	0	ABSENT

3.2 - LOE2 Caractérisation chimique de la colonne d'eau

Comme pour la LOE1, l'application des critères d'évaluation pondérés sur la caractérisation chimique de la colonne d'eau, abandonne la logique de l'approche tabulaire et du dépassement unique d'une référence normative (même si elle est

légère); au contraire, les résultats sont considérés comme un tout, en donnant du poids au nombre de paramètres qui dépassent la valeur de référence relative, à l'ampleur de ces dépassements et à la dangerosité des composés en question. Comme limites de référence et objectifs de qualité, ceux prévus par les normes de qualité environnementale (NQE) du décret législatif 172/2015 ont été considérés dans cette étude.

Le tableau 3.3 présente les résultats obtenus lors du traitement de la caractérisation chimique de la colonne d'eau. Le traitement a fourni une classe de danger chimique moyenne pour presque tous les échantillons, à l'exception de l'échantillon Pt11 qui a un niveau de danger faible. Le seul paramètre dépassant les limites de référence réglementaires était le Cr pour tous les échantillons.

Tableau 3.3. Niveaux de danger chimique obtenus à partir du traitement pondéré des données chimiques de la colonne d'eau du port d'Olbia en référence aux limites EQS (décret législatif 172/2015).

Code Échantillon	Campagne	EQS (Décret Législatif 172/2015)			Niveau de danger chimique
		HQ	% max/RTR	N. param. dép.	
Pt 1	III	3.09	100 - Cr	1	MOYEN
Pt 2	III	3.34	100 - Cr	1	MOYEN
Pt 3	III	3.97	100 - Cr	1	MOYEN
Pt 4	III	4.23	100 - Cr	1	MOYEN
Pt 5	III	3.95	100 - Cr	1	MOYEN
Pt 6	III	3.23	100 - Cr	1	MOYEN
Pt 7	III	2.83	100 - Cr	1	MOYEN
Pt 8	III	2.81	100 - Cr	1	MOYEN
Pt 9	III	2.85	100 - Cr	1	MOYEN
Pt 10	III	2.65	100 - Cr	1	MOYEN
Pt 11	III	2.46	100 - Cr	1	BASSE

3.3 - LOE3 Biodisponibilità

Pour la bioaccumulation, les niveaux de concentration des mêmes contaminants pris en compte dans la LOE 1 ont été mesurés dans des organismes de l'espèce *Mytilus galloprovincialis* lors de chaque campagne, établissant ainsi la possibilité que les contaminants présents dans les sédiments puissent passer dans le compartiment biotique. Pour chaque site, la valeur de risque cumulé HQ a été calculée à l'aide du modèle Weight Of Evidence sur la base de toutes les valeurs RTR. Le RTR représente le rapport entre la concentration de l'analyte mesurée dans le tissu de l'organisme exposé et la concentration du même analyte dans le tissu de l'organisme utilisé comme témoin, qui est ensuite corrigé en fonction de la nature du contaminant et de la signification statistique des différences.

Le traitement global des résultats à l'aide des critères d'intégration pondérés a confirmé un niveau de bioaccumulation faible ou absent chez toutes les moules transloquées du port d'Olbia, en fonction du nombre, de l'étendue et de la signification statistique des différences mesurées. (tableau 3.4).

Tableau 3.4. Résultats du traitement global du risque de bioaccumulation dans les tissus des moules du port d'Olbia.

Code Échantillon	Site	Campagne	Nombre de paramètres attribués aux différentes classes					HQ	Niveau de danger
			Absent	Basse	Moyen	Élevé	Très Élevé		
GR-OL-I-MT-01	Banchina Isola Bianca	I	36	6	1	0	0	6.12	BASSE
GR-OL-I-MT-02	Foce Padrongianus	I	34	9	0	0	0	1.45	BASSE
GR-OL-I-MT-03	Cala Saccaia	I	43	0	0	0	0	0	ABSENT
GR-OL-PL-I-MT-01	Banchina Isola Bianca	I	37	5	1	0	0	5.44	BASSE
GR-OL-PL-I-MT-02	Foce Padrongianus	I	39	3	1	0	0	4.71	BASSE
GR-OL-PL-I-MT-03	Cala Saccaia	I	43	0	0	0	0	0	ABSENT
GR-OL-II-MT-01	Banchina Isola Bianca	II	40	3	0	0	0	1.63	BASSE
GR-OL-II-MT-02	Foce Padrongianus	II	42	1	0	0	0	1.58	BASSE
GR-OL-II-MT-03	Cala Saccaia	II	43	0	0	0	0	0	ABSENT
GR-OL-PL-II-MT-01	Banchina Isola Bianca	II	30	12	1	0	0	4.57	BASSE
GR-OL-PL-II-MT-02	Foce Padrongianus	II	34	9	0	0	0	1.59	BASSE
GR-OL-PL-II-MT-03	Cala Saccaia	II	43	0	0	0	0	0	ABSENT
GR-OL-PL-III-MT-01	Banchina Isola Bianca	III	34	8	1	0	0	4.35	BASSE
GR-OL-PL-III-MT-02	Foce Padrongianus	III	33	8	2	0	0	7.72	BASSE
GR-OL-PL-III-MT-03	Cala Saccaia	III	43	0	0	0	0	0	ABSENT

3.4 - LOE4 Biomarqueur

Les résultats des biomarqueurs obtenus pour les organismes transloqués ont été traités en appliquant des critères d'intégration pondérés qui résument un indice de danger basé sur le nombre et la pertinence toxicologique des biomarqueurs analysés, la signification statistique et l'ampleur des variations observées par rapport à des seuils de référence spécifiques.

Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau 3.5. Le niveau de danger élaboré pour les biomarqueurs était Absent/Faible pour le site "Banchina Isola Bianca" et le site "Cala Saccaia", tandis que le site "Foce Padrongianus" présentait un niveau de danger moyen.

Tableau 3.5. Résultats du traitement du danger global des biomarqueurs dans les moules du port d'Olbia.

Code Échantillon	Site	Campagne	Nombre de paramètres attribués aux différentes classes					Niveau de danger
			Absent	Basse	Moyen	Élevé	Très Élevé	
GR-OL-II-MT-01	Banchina Isola Bianca	II	4	2	0	0	0	BASSE
GR-OL-II-MT-02	Foce Padrongianus	II	4	1	0	0	1	MOYEN
GR-OL-II-MT-03	Cala Saccaia	II	6	0	0	0	0	ABSENT

3.5 - LOE5 Essais écotoxicologiques

Le tableau 3.6 présente les résultats globaux du traitement de la batterie de tests écotoxicologiques, qui comprenaient l'analyse de la bioluminescence de la bactérie *Aliivibrio fischeri* exposée à la phase solide, la croissance des algues chez *Phaeodactylum tricornutum* et l'embryotoxicité chez *Paracentrotus lividus*.

Les critères d'intégration pondérés permettent d'abandonner le principe d'une classification écotoxicologique déterminée par le plus mauvais résultat : le jugement de l'ensemble de la batterie dépend de la pertinence toxicologique du critère mesuré dans chaque essai, du seuil de sensibilité de l'espèce, de la signification statistique et de l'ampleur des variations mesurées, et des conditions d'essai.

La classe de danger écotoxicologique développée pour les échantillons de sédiments était Absente, à l'exception des échantillons GR-OL-II-SE-01 et GR-OL-II-SE-02 de la deuxième campagne, qui ont montré une classe de danger écotoxicologique Moyenne. En général, l'épreuve avec *P. lividus* est celle qui a le plus contribué à la toxicité globale de la batterie.

Tableau 3.6 Résultats de l'élaboration globale du danger écotoxicologique pour le port d'Olbia en utilisant des critères d'intégration pondérés sur les batteries d'essais constituées de *Paracentrotus lividus*, *Aliivibrio fischeri* et *Phaeodactylum tricornutum*.

Code Échantillon	Site	Campagne	Espèce	HQ Spécifique	HQ Batterie	Niveau de danger
GR-OL-I-SE-03	Area esterna	I	<i>P. lividus</i>	0.38	0.65	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0.71		
GR-OL-I-SE-01	Banchina Isola Bianca	I	<i>P. lividus</i>	1.04	0.38	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	0.34		
GR-OL-I-SE-02	Foce Padrongianus	I	<i>P. lividus</i>	1.75	0.86	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0.11		
GR-OL-II-SE-01	Banchina Isola Bianca	II	<i>P. lividus</i>	6.21	2.95	MOYEN
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-OL-II-SE-02	Foce Padrongianus	II	<i>P. lividus</i>	4.51	2.18	MOYEN
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0.07		
GR-OL-II-SE-03	Area esterna	II	<i>P. lividus</i>	0.01	0.38	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-OL-III-SE-01	Banchina Isola Bianca	III	<i>P. lividus</i>	0.02	0.75	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	1.23		
GR-OL-III-SE-02	Foce Padrongianus	III	<i>P. lividus</i>	0.01	0.97	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	3.3		
GR-OL-III-SE-03	Area esterna	III	<i>P. lividus</i>	1.57	0.55	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	0.29		

3.6 – LOE6 Communautés benthiques

Dans cette étude, l'application de l'indice AMBI a été jugée appropriée pour l'évaluation des communautés du port d'Olbia : cet indice a été optimisé pour résumer l'état écologique sur la base de la réponse des communautés benthiques des fonds mobiles aux perturbations anthropiques.

Les résultats globaux ont montré une classification du statut écologique entre bon et moyen pour tous les échantillons du port d'Olbia, et une gamme de valeurs de l'indice AMBI entre 1,4 (OL26) et 1,7 (OL17) (Tableau 3.7).

Le traitement global des données sur les communautés benthiques par le LOE 6 du modèle Weight Of Evidence a fourni une classe de danger faible ou moyen dans les trois échantillons du port d'Olbia (Tableau 3.7).

Tableau 3.7 Indice de qualité écologique (AMBI) élaboré pour le port d'Olbia. Classes de danger écologique obtenues par le traitement global de toutes les données disponibles pour les communautés benthiques.

Code Échantillon	AMBI					HQ	Niveau de danger
	Classification du statut écologique	IB media±dev.st	Classification des perturbations du site	Groupe écologique dominant	Conditions communautaires		
GR-OL-II-SE-01	Bon	1,5 ± 0,5	Légèrement perturbé	III	Déséquilibré	36.1	BASSE
GR-OL-II-SE-02	Moyen	1,7 ± 0,4	Modérément perturbé	III	Transition vers la pollution	45.4	MOYEN
GR-OL-II-SE-03	Bon	1,4 ± 0	Légèrement perturbé	III	Déséquilibré	25.4	BASSE

3.7 - Analyse et traitement du risque écologique par la méthode du poids de la preuve (Weight Of Evidence - WOE)

Les indices de danger du QG des différentes sources de preuves pour chaque site ont été intégrés les uns aux autres, en les normalisant à une échelle commune, afin de dériver un seul jugement global et sans ambiguïté du Weight Of Evidence (WOE).

Le tableau 3.8 montre, pour chaque site, à la fois l'indice de risque déjà développé et discuté pour chaque LOE, et l'indice de risque intégré des WOE. L'indice de risque WOE est absent ou faible pour tous les sites des trois campagnes, ce qui permet d'exclure les situations compromises tant au niveau des compartiments environnementaux individuels que des caractéristiques globales de la zone portuaire d'Olbia (Figures 3.1 - 3.2 - 3.3).

Prodotto n. T2.1.2

Tableau 3.8 Résumé des résultats pour les traitements individuels pondérés (LOE1, LOE2, LOE3, LOE4, LOE5 et LOE6) et l'intégration globale WOE (Weight of Evidence).

Site	Campagne	NIVEAU DE DANGER	WOE						
		chimique sédiments LOE 1	chimique colonne d'eau LOE 2	bioaccumulation LOE 3	biomarqueur LOE 4	tests écotoxicologiques LOE 5	communautés benthiques LOE 6		
Banchina Isola Bianca	I (juin 2018)	ABSENT		BASSE		ABSENT		ABSENT	
Foce Padrongianus		ABSENT		BASSE		ABSENT		ABSENT	
Area esterna		ABSENT		ABSENT		ABSENT		ABSENT	
Banchina Isola Bianca	II (mai 2019)	ABSENT		BASSE	BASSE	MEDIUM	BASSE	BASSE	
Foce Padrongianus		ABSENT		BASSE	MEDIUM	MEDIUM	MEDIUM	BASSE	
Area esterna		ABSENT		ABSENT	ABSENT	ABSENT	BASSE	ABSENT	
Banchina Isola Bianca	III	ABSENT	MEDIUM			ABSENT		BASSE	

Prodotto n. T2.1.2

Foce Padrongianus	(novembre 2019)	ABSENT	MEDIUM			ABSENT		BASSE	
Area esterna		ABSENT	MEDIUM			ABSENT		BASSE	



Figure 3.1 Traitement global du WOE (sortie du modèle Sediqualsoft®). Les classes de risque sont exprimées par des couleurs (blanc : absent ; bleu clair : faible ; jaune : moyen ; rouge : élevé ; noir : très élevé). Campagne I (juin 2018).



Figure 3.2 Traitement global du WOE (sortie du modèle Sediqualsoft®). Les classes de risque sont exprimées par des couleurs (blanc : absent ; bleu clair : faible ; jaune : moyen ; rouge : élevé ; noir : très élevé). Campagne II (mai 2019).



Figure 3.3 Traitement global du WOE (sortie du modèle Sediquasoft®). Les classes de risque sont exprimées par des couleurs (blanc : absent ; bleu clair : faible ; jaune : moyen ; rouge : élevé ; noir : très élevé). Campagne III (novembre 2019)

4 - Port de Gênes : développement de l'analyse des risques écologiques

Les données recueillies dans la zone portuaire de Gênes se réfèrent à 5 LOE principaux : caractérisation chimique des sédiments en référence aux valeurs L2 du DM 173/2016 (LOE-1), caractérisation chimique de la colonne d'eau en référence aux NQE du D. Lgs 172/2015 (LOE-2), biodisponibilité des métaux, des composés organiques pour les moules et les poissons transplantés (LOE-3), effets sublétaux mesurés par des batteries de biomarqueurs chez les moules transplantées (LOE-4), caractéristiques écotoxicologiques des sédiments évaluées par une batterie de tests biologiques (LOE-5) (tableau 4.1).

Tableau 4.1. Type de données recueillies dans la zone portuaire de Gênes lors des différentes campagnes.

	LOE	Analyses	Période	Échantillons
1	Caractérisation chimique des sédiments	Granulométrie Métaux: Al - As - Cd- Cr _{tot} - Cu- Fe- Hg - Ni- Pb- Zn Composés organostanniques IPA hydrocarbures aromatiques polycycliques PCB biphényles polychlorés Pesticides	I Campagne (décembre 2018) II Campagne (mai 2019)	- Diga foranea imboccatura levante (SE-01) - Porto antico (SE-02) - Foce Polcevera (SE-03)
2	Caractérisation chimique de la Colonne d'eau	Métaux: Al - As - Cr _{tot} - Cu - Fe - Mn - Ni - Pb - V - Zn Autres par.: Chla - %OD - NO ₃ - PO ₄ - pH - Temp - Cond - Torb	I Campagne (décembre 2018) II Campagne (mai 2019)	Pt1 à Pt 15
3	Biodisponibilité <i>Mytilus galloprovincialis</i> (MT) <i>Liza aurata</i> (PE)	Métaux: Al (PE) - As - Cd - Cr _{tot} - Cu- Fe (PE) - Hg - Mn (PE) Ni- Pb - Sb (PE) - Zn Composés organostanniques (MT) IPA hydrocarbures aromatiques polycycliques (MT) PCB biphényles polychlorés (MT) Pesticides (MT)	I Campagne (décembre 2018) (MT) II Campagne (mai 2019) (MT - PE)	- Diga foranea imboccatura levante (MT-01 / PE-01) - Porto antico (MT-02 / PE-02) - Foce Polcevera (MT-03 / PE-03)
4	Biomarqueurs <i>Mytilus galloprovincialis</i> (MT) <i>Liza aurata</i> (PE)	Métallothionéine (MT) Acétylcholinestérase (MT) Micronoyaux (MT) LS NRRT (MT) % Phagocytose (MT) Rapport Gran/Ian (MT) Métabolites Pyr - Met. BaP - Met. NAP (PE) EROD (PE)	I Campagne (décembre 2018) (MT) II Campagne (mai 2019) (MT - PE)	- Diga foranea imboccatura levante (MT-01 / PE-01) - Porto antico (MT-02 / PE-02) - Foce Polcevera (MT-03 / PE-03)
5	Tests écotoxicologiques	Embryotoxicité - <i>Paracentrotus Lividus</i> Croissance des algues - <i>Phaeodactylum tricorutum</i> Bioluminescence - <i>Aliivibrio fischeri</i> en phase solide	I Campagne (décembre 2018) II Campagne (mai 2019)	- Diga foranea imboccatura levante (SE-01) - Porto antico (SE-02) - Foce Polcevera (SE-03)

4.1 - LOE1 Caractérisation chimique des sédiments

Les résultats chimiques ont été traités en utilisant le critère d'intégration pondéré qui, par rapport aux références réglementaires du DM 173/16 (L2), élabore un indice de danger chimique basé sur le nombre de contaminants dépassant la référence spécifique, la dangerosité de ces paramètres et l'ampleur des dépassements mesurés. Ces critères d'intégration pondérés abandonnent la logique du simple dépassement de la valeur tabulée, même par un minimum et par un seul paramètre, comme principe de classification chimique de la qualité des sédiments.

Comme indiqué dans le tableau 4.2, le traitement a fourni une classe de danger chimique allant d'Absent à Moyen pour les échantillons de la première campagne (GR-GE-I-SE-01 : Absent ; GR-GE-I-SE-02 : Faible et GR-GE-I-SE-03 : Moyen), tandis que le niveau de danger chimique de la deuxième campagne était Faible pour l'échantillon GR-GE-II-SE-01, Moyen pour l'échantillon GR-GE-II-SE-03 et Élevé pour l'échantillon GR-GE-II-SE-03. Lors de la première campagne, les composés qui ont apporté la contribution la plus élevée en pourcentage à l'indice de risque chimique ont été Ni pour le site "Foce Polcevera" et Zn pour le site "Porto antico" ; lors de la deuxième campagne également, les métaux ont été les composés qui ont apporté la contribution la plus élevée à l'indice de risque (Pb pour le "Diga foranea imboccatura levante" ; Hg pour le "Porto antico" ; Ni pour le "Foce Polcevera").

L'application de critères d'évaluation pondérés sur la caractérisation chimique des sédiments a permis d'observer quelques différences entre le danger chimique mis en évidence pour les trois sites de la première campagne par rapport à celui observé dans la deuxième campagne, avec un changement de classe mis en évidence pour les sites "Diga foranea imboccatura levante" et "Porto antico" ; aucune différence n'est en revanche

observée pour le "Foce Polcevera" qui présente un niveau de danger chimique moyen dans les deux campagnes.

Tableau 4.2. Niveaux de danger chimique obtenus à partir du traitement pondéré des données chimiques de tous les sédiments du port de Gênes en référence aux limites L2 (DM 173/2016).

Code Échantillon	Zone	Campagne	HQ	% max/RTR	N. param. dép.	Niveau de danger chimique
GR-GE-I-SE-01	Diga foranea imboccatura levante	I	0,23	-	0	ABSENT
GR-GE-I-SE-02	Porto antico	I	1,33	100 - Zn	1	BASSE
GR-GE-I-SE-03	Foce Polcevera	I	5,22	37,3 - Ni	3	MOYEN
GR-GE-II-SE-01	Diga foranea imboccatura levante	II	1,36	100 - Pb	1	BASSE
GR-GE-II-SE-02	Porto antico	II	6,72	33,8 - Hg	4	ÉLEVÉ
GR-GE-II-SE-03	Foce Polcevera	II	5,43	36,6 - Ni	3	MOYEN

4.2 - LOE2 Caractérisation chimique de la colonne d'eau

Comme pour la LOE1, l'application de critères d'évaluation pondérés sur la caractérisation chimique de la colonne d'eau, abandonne la logique de l'approche tabulaire et le dépassement unique d'une référence normative (même si elle est légère), en considérant plutôt les résultats dans leur ensemble, en donnant du poids au nombre de paramètres qui dépassent la valeur de référence, à l'ampleur de ces dépassements et à la dangerosité des composés en question. Comme objectifs de qualité, ceux définis dans les normes de qualité environnementale (NQE) du décret législatif 172/2015 ont été considérés dans cette étude.

Le tableau 4.3 présente les résultats obtenus à partir de la caractérisation chimique de la colonne d'eau, le traitement fournissant une classe de danger chimique absente ou faible pour presque tous les échantillons, à l'exception de l'échantillon Pt3 de la deuxième campagne qui présente un niveau de danger moyen.

Prodotto n. T2.1.2

En outre, le module LOE2 calcule l'indice TRIX, un indice d'état trophique permettant de définir l'état de qualité des eaux marines côtières. La classification de la qualité obtenue à partir de cet indice a montré pour les échantillons de la première campagne une classe de qualité allant de "Moyenne" à "Haute", à l'exception de deux échantillons (Pt1 et Pt10) qui présentent une classe "Mauvaise". Lors de la deuxième campagne, l'état trophique était "bon" à "élevé" à l'exception de l'échantillon Pt1 (état trophique : "mauvais").

Tableau 4.3. Niveaux de danger chimique obtenus à partir du traitement pondéré des données chimiques de la colonne d'eau du port de Gênes en référence aux limites EQS (décret législatif 172/2015).

Code Échantillon	Campagne	EQS (Décret Législatif 172/2015)				TRIX	CLASSE TRIX
		HQ	% max/RTR	N. param. dép.	Niveau de danger chimique		
Pt 1	I	0.1		0	ABSENT	6	Pauvre
Pt 2	I	0.14		0	ABSENT	5.8	Moyenne
Pt 3	I	0.11		0	ABSENT	5.6	Moyenne
Pt 4	I	0.09		0	ABSENT	5.5	Moyenne
Pt 5	I	0.06		0	ABSENT	4.9	Bonne
Pt 6	I	0.05		0	ABSENT	5.3	Moyenne
Pt 7	I	0.02		0	ABSENT	5.2	Moyenne
Pt 8	I	0.08		0	ABSENT	5.2	Moyenne
Pt 9	I	0.07		0	ABSENT	5.9	Moyenne
Pt 10	I	0.09		0	ABSENT	6.9	Pauvre
Pt 11	I	0.05		0	ABSENT	5.9	Moyenne
Pt 12	I	0.03		0	ABSENT	5.6	Moyenne
Pt 13	I	0.04		0	ABSENT	5.4	Moyenne
Pt 14	I	0.02		0	ABSENT	3.7	Élevée
Pt 15	I	0.02		0	ABSENT	3.5	Élevée
Pt 1	II	0.75		0	NÉGLIGEABLE	6	Pauvre
Pt 2	II	1.76	100 - Cr	1	BASSE	4	Bonne
Pt 3	II	3.77	50.6 - Cr	2	MOYEN	3.7	Élevée
Pt 4	II	0.58		0	ABSENT	3.6	Élevée
Pt 5	II	0.43		0	ABSENT	3.4	Élevée
Pt 6	II	0.4		0	ABSENT		
Pt 7	II	0.35		0	ABSENT	2.9	Élevée
Pt 8	II	0.48		0	ABSENT	3.8	Élevée
Pt 9	II	0.42		0	ABSENT	4.6	Bonne
Pt 10	II	0.53		0	ABSENT		
Pt 11	II	0.45		0	ABSENT	4.5	Bonne
Pt 12	II	0.45		0	ABSENT		
Pt 13	II	0.32		0	ABSENT	3.5	Élevée
Pt 14	II	0.28		0	ABSENT	3.3	Élevée
Pt 15	II	0.32		0	ABSENT	3.5	Élevée

4.3 - LOE3 Biodisponibilité

Le traitement global des résultats à l'aide des critères d'intégration pondérés a confirmé un niveau de bioaccumulation Absent ou Faible dans le site "Diga foranea

Prodotto n. T2.1.2

imboccatura levante" et "Foce Polcevera (II campagne)" et Moyen dans les moules transloquées dans le site "Porto antico", selon le nombre, l'étendue et la signification statistique des différences mesurées (Tableau 4.4).

En ce qui concerne les niveaux de bioaccumulation dans les tissus des poissons, elle était moyenne dans presque tous les échantillons, à l'exception de deux échantillons de la quatrième campagne (GR-GE-IV-PE-01-B-M, GR-GE-IV-PE-01-F-M) où elle était élevée (Tableau 4.5).

Tableau 4.4. Résultats du traitement global du risque de bioaccumulation dans les tissus des moules du port de Gênes.

Code Échantillon	Site	Campagne	Nombre de paramètres attribués aux différentes classes					HQ	Niveau de danger
			Absent	Basse	Moyen	Élevé	Très Élevé		
GR-GE-I-MT-01	Diga foranea imboccatura levante	I	43	0	0	0	0	0	ABSENT
GR-GE-I-MT-02	Porto antico	I	27	5	10	0	1	48.69	MOYEN
GR-GE-II-MT-01	Diga foranea imboccatura levante	II	43	0	0	0	0	0	ABSENT
GR-GE-II-MT-02	Porto antico	II	16	6	19	2	0	101.41	MOYEN
GR-GE-II-MT-03	Foce Polcevera	II	26	15	2	0	0	8.05	BASSE

Tableau 4.5. Résultats du traitement global du risque de bioaccumulation dans les tissus des poissons du port de Gênes.

Code Échantillon	Campagne	Nombre de paramètres attribués aux différentes classes					HQ	Niveau de danger
		Absent	Basse	Moyen	Élevé	Très Élevé		
GR-GE-II-PE-01-F-M	II	5	3	3	1	0	19.68	MOYEN
GR-GE-II-PE-01-M-M	II	5	4	2	0	0	7.81	MOYEN
GR-GE-II-PE-02-B-M	II	8	2	0	1	0	12.36	MOYEN
GR-GE-II-PE-02-F-M	II	5	3	3	1	0	19.68	MOYEN
GR-GE-II-PE-02-M-M	II	5	4	2	0	0	7.81	MOYEN
GR-GE-II-PE-03-B-M	II	8	2	0	1	0	12.36	MOYEN
GR-GE-II-PE-03-F-M	II	5	3	3	1	0	19.68	MOYEN
GR-GE-II-PE-03-M-M	II	5	4	2	0	0	7.81	MOYEN
GR-GE-IV-PE-01-B-M	IV	4	5	1	0	1	34.51	ÉLEVÉ
GR-GE-IV-PE-01-F-M	IV	5	3	3	0	1	28.72	ÉLEVÉ
GR-GE-IV-PE-01-M-M	IV	7	2	2	0	0	10.09	MOYEN

4.4 - LOE4 Biomarqueur

Pour l'analyse des effets biologiques induits par l'exposition aux contaminants, plusieurs biomarqueurs ont été sélectionnés dans les tissus des moules et des poissons utilisés comme organismes bio-indicateurs.

Les résultats des biomarqueurs obtenus pour les moules transloquées dans le port de Gênes sont présentés dans le tableau 4.6. Le niveau de danger développé pour les biomarqueurs était Absent/Faible pour tous les échantillons.

Le tableau 4.7 présente les résultats du traitement global des biomarqueurs obtenus dans les tissus de poisson. Les niveaux de danger pour les biomarqueurs étaient élevés dans tous les échantillons.

Tableau 4.6. Résultats du traitement du danger global des biomarqueurs dans les moules du port de Gênes.

Code Échantillon	Site	Campagne	Nombre de paramètres attribués aux différentes classes					Niveau de danger
			Absent	Basse	Moyen	Élevé	Très Élevé	
GR-GE-I-MT-01	Diga foranea imboccatura levante	I	6	0	0	0	0	ABSENT
GR-GE-I-MT-02	Porto antico	I	5	0	0	1	0	BASSE
GR-GE-II-MT-01	Diga foranea imboccatura levante	II	6	0	0	0	0	ABSENT
GR-GE-II-MT-02	Porto antico	II	5	1	0	0	0	BASSE
GR-GE-II-MT-03	Foce Polcevera	II	6	0	0	0	0	ABSENT

Tableau 4.7. Résultats du traitement du danger global des biomarqueurs dans les poissons du port de Gênes.

Code Échantillon	Site	Campagne	Nombre de paramètres attribués aux différentes classes					Niveau de danger
			Absent	Basse	Moyen	Élevé	Très Élevé	
GR-GE-II-PE-03-F-M	Ponte dei Mille	II	1	1	0	1	1	ÉLEVÉ
GR-GE-II-PE-02-F-M	Ponte dei Mille	II	1	1	0	1	1	ÉLEVÉ
GR-GE-II-PE-01-F-M	Ponte dei Mille	II	1	1	0	1	1	ÉLEVÉ

4.5 - LOE5 Essais écotoxicologiques

Le tableau 4.8 présente les résultats globaux de la batterie de tests écotoxicologiques réalisés sur les sédiments. Dans cette étude, la batterie utilisée comprend l'analyse de la bioluminescence des bactéries *Aliivibrio fischeri* exposées à la phase solide, la croissance algale de *Phaeodactylum tricornutum* et l'embryotoxicité chez *Paracentrotus lividus*.

La classe de danger écotoxicologique développée pour les échantillons de sédiments de la première campagne était Absent. Les échantillons de la deuxième campagne ont montré un niveau de danger écotoxicologique moyen/élevé. En général, l'épreuve d'embryotoxicité avec *P. lividus* est celle qui a le plus contribué à la toxicité globale de la pile.

Tableau 4.8 Résultats de l'élaboration globale du danger écotoxicologique pour le port de Gênes en utilisant des critères d'intégration pondérés sur les batteries d'essais constituées de *Paracentrotus Lividus*, *Aliivibrio fischeri* et *Phaeodactylum tricornutum*.

Code Échantillon	Site	Campagne	Espèce	HQ Spécifique	HQ Batterie	Niveau de danger
GR-GE-I-SE-01	Diga foranea imboccatura levante	I	<i>P. lividus</i>	0.06	0.02	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-GE-I-SE-02	Porto antico	I	<i>P. lividus</i>	0.01	0	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-GE-I-SE-03	Foce Polcevera	I	<i>P. lividus</i>	1.35	0.88	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	1.64		
GR-GE-II-SE-01	Diga foranea imboccatura levante	II	<i>P. lividus</i>	6.21	2.95	MOYEN
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-GE-II-SE-02	Porto antico	II	<i>P. lividus</i>	6.21	3.01	ÉLEVÉ
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0.11		
GR-GE-II-SE-03	Foce Polcevera	II	<i>P. lividus</i>	6.21	4.06	ÉLEVÉ
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	2.32		

4.6 - Analyse et traitement du risque écologique par la méthode du poids de la preuve (Weight Of Evidence - WOE)

Le tableau 4.9 montre, pour chaque site, à la fois l'indice de risque déjà élaboré et discuté pour chaque LOE, et l'indice de risque intégré WOE. L'indice de risque WOE pour les trois sites du port de Gênes est absent ou faible lors de la première campagne et moyen lors de la deuxième campagne. (Figures 4.1 - 4.2).

Prodotto n. T2.1.2

Tableau 4.9 Résumé des résultats pour les traitements individuels pondérés (LOE1, LOE2, LOE3, LOE4 et LOE5) et l'intégration globale WOE (Weight of Evidence).

Site	Campagne	NIVEAU DE DANGER					WOE	
		chimique sédiments LOE 1	chimique colonne d'eau LOE 2	bioaccumulo LOE 3	biomarker LOE 4	chimique sédiments LOE 1		
Diga foranea imboccatura levante	I (décembre 2018)	ABSENT	ABSENT	ABSENT	ABSENT	ABSENT	ABSENT	
Porto antico		BASSE	ABSENT	MOYEN	BASSE	ABSENT	BASSE	
Foce Polcevera		MOYEN	ABSENT			ABSENT	BASSE	
Diga foranea imboccatura levante	II (mai 2019)	BASSE	ABSENT	MOYEN	MOYEN	MOYEN	MOYEN	
Porto antico		ÉLEVÉ	TRASCURABILE	MOYEN	MOYEN	ÉLEVÉ	MOYEN	
Foce Polcevera		MOYEN	ABSENT	MOYEN	ÉLEVÉ	ÉLEVÉ	MOYEN	

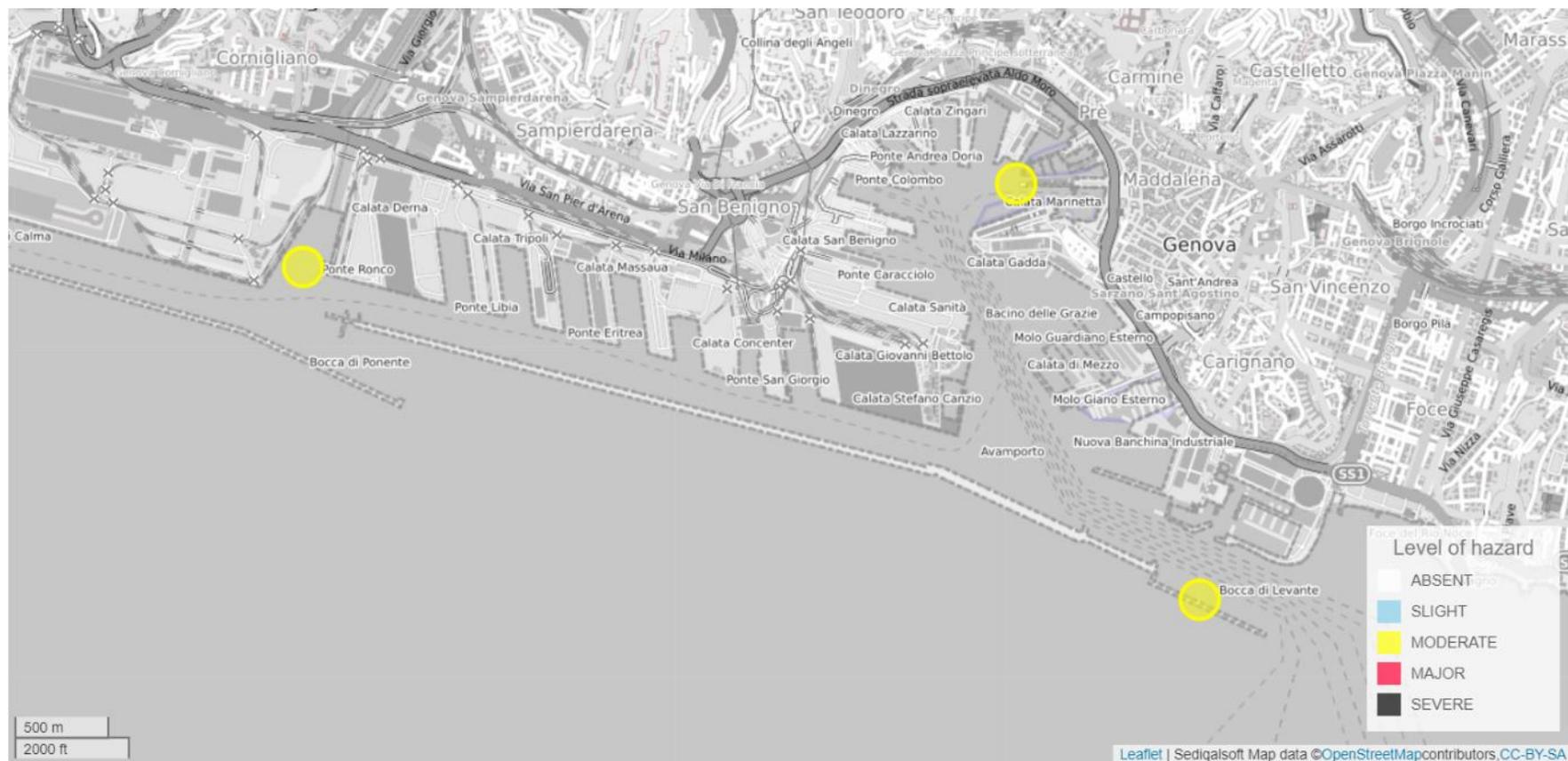


Figure 4.2 Traitement global du WOE (sortie du modèle Sediqualsoft®). Les classes de risque sont exprimées par des couleurs (blanc : absent ; bleu clair : faible ; jaune : moyen ; rouge : élevé ; noir : très élevé). Campagne II (mai 2019).

5 - Port de La Spezia : développement de l'analyse des risques écologiques

Les données recueillies dans la zone portuaire de La Spezia se réfèrent à 5 LOE principaux : caractérisation chimique des sédiments en référence aux valeurs L2 du DM 173/2016 (LOE-1), caractérisation chimique de la colonne d'eau en référence aux NQE du D. Lgs 172/2015 (LOE-2), biodisponibilité des métaux, composés organiques pour les moules transplantées (LOE-3), effets sublétaux mesurés par des batteries de biomarqueurs chez les moules transplantées (LOE-4), caractéristiques écotoxicologiques des sédiments évaluées par une batterie de tests biologiques (LOE-5) (tableau 5.1).

Tableau 5.1. Type de données recueillies dans la zone portuaire de La Spezia lors des différentes campagnes.

	LOE	Analyses	Période	Échantillons
1	Caractérisation chimique des sédiments	Granulométrie Métaux: Al - As - Cd- Cr _{tot} - Cu- Hg - Ni- Pb- Zn Composés organostanniques IPA hydrocarbures aromatiques polycycliques PCB biphényles polychlorés Pesticides	I Campagne (novembre 2017) II Campagne (mai 2019) III Campagne (septembre 2019)	- Molo Garibaldi / Molo Fornelli (SE-01) - Cadimare (SE-02) - Centro Rada (SE-03) - Imboccatura di levante (SE-04)
2	Caractérisation chimique de la Colonne d'eau	Métaux: Al - As - Cr _{tot} - Cu - Fe - Mn - Ni - Pb - V - Zn Autres par.: Chla - %OD - NO ₃ - PO ₄ - pH - Temp - Cond - Turb	II Campagne (mai 2019)	Pt 1 à Pt 15
3	Biodisponibilité <i>Mytilus galloprovincialis</i>	Métaux: As - Cd - Cr _{tot} - Cu - Hg - Ni- Pb - Zn IPA hydrocarbures aromatiques polycycliques PCB biphényles polychlorés Pesticides	I Campagne (novembre 2017) II Campagne (mai 2019) III Campagne (septembre 2019)	- Molo Fornelli (MT-01) - Molo Garibaldi2 (MT-01) - Cadimare (MT-03) - Scuola di vela Santa Teresa (MT-04)
4	Biomarqueurs <i>Mytilus galloprovincialis</i>	Métallothionéine Acétylcholinestérase Micronoyaux LS NRRT % Phagocytose Rapport Gran/Ian	II Campagne (mai 2019) III Campagne (septembre 2019)	- Molo Fornelli (MT-01) - Molo Garibaldi2 (MT-01) - Cadimare (MT-03) - Scuola di vela Santa Teresa (MT-04)
5	Tests écotoxicologiques	Embryotoxicité - <i>Paracentrotus Lividus</i> Croissance des algues - <i>Phaeodactylum tricornutum</i> Bioluminescence - <i>Aliivibrio fischeri</i> en phase solide	I Campagne (novembre 2017) II Campagne (mai 2019) III Campagne (septembre 2019)	- Molo Garibaldi / Molo Fornelli (SE-01) - Cadimare (SE-02) - Centro Rada (SE-03) - Imboccatura di levante (SE-04)

5.1 - LOE1 Caractérisation chimique des sédiments

La zone du port de La Spezia, lors de la première campagne, a présenté un niveau de danger chimique absent, tandis que lors des deux autres campagnes (II - III), le niveau de danger chimique élaboré était moyen ou élevé, très élevé pour l'échantillon GR-SP-II-SE-02 (Tableau 5.2).

Les composés qui ont fourni le pourcentage le plus élevé de contribution à l'indice de danger chimique dans les deuxième et troisième campagnes étaient les métaux (Zn, Hg et Pb) et la somme des polychlorobiphényles pour l'échantillon SE-02 dans la troisième campagne.

Tableau 5.2 Niveaux de danger chimique obtenus à partir du traitement pondéré des données chimiques de tous les sédiments du port de La Spezia, en référence aux limites L2 (DM 173/2016).

Code Échantillon	Zone	Campagne	HQ	% max/RTR	N. param. dép.	Niveau de danger chimique
MF01	Tra Molo Garibaldi e Molo Fornelli	I	0,03	-	0	ABSENT
MF02	Antistante Cadimare	I	0,03	-	0	ABSENT
MF03	Centro Rada	I	0,03	-	0	ABSENT
MF04	Imboccatura di levante	I	0	-	0	ABSENT
GR-SP-II-SE-01	Tra Molo Garibaldi e Molo Fornelli	II	6,87	64,5 - Zn	3	ÉLEVÉ
GR-SP-II-SE-02	Antistante Cadimare	II	15,1	24,7 - Hg	6	TRÈS ÉLEVÉ
GR-SP-II-SE-03	Centro Rada	II	5,22	28,2 - Zn	4	MOYEN
GR-SP-II-SE-04	Imboccatura di levante	II	4,4	7,1 - Pb	3	MOYEN
GR-SP-III-SE-01	Tra Molo Garibaldi e Molo Fornelli	III	7,39	82,8 - Zn	2	ÉLEVÉ
GR-SP-III-SE-02	Antistante Cadimare	III	10,7	31 - S PCB	5	ÉLEVÉ
GR-SP-III-SE-03	Centro Rada	III	5,31	28,2 - Zn	4	MOYEN
GR-SP-III-SE-04	Imboccatura di levante	III	5,34	28,3 - Zn	4	MOYEN

5.2 - LOE2 Caractérisation chimique de la colonne d'eau

Le tableau 5.3 présente les résultats obtenus à partir de la caractérisation chimique de la colonne d'eau ; le traitement a donné une classe de danger chimique absente ou faible pour presque tous les échantillons, à l'exception de l'échantillon MT03 de la deuxième campagne qui a un niveau de danger moyen.

Le calcul de l'indice TRIX a montré une classe de qualité de "bonne" à "élevée" pour tous les échantillons

Tableau 5.3. Niveaux de danger chimique obtenus à partir du traitement pondéré des données chimiques de la colonne d'eau du port de La Spezia en référence aux limites EQS (décret législatif 172/2015).

Code Échantillon	Campagne	EQS (Décret Législatif 172/2015)				TRIX	CLASSE TRIX
		HQ	% max/RTR	N. param. dép.	Niveau de danger chimique		
MT01	II	0.75		0	NÉGLIGEABLE		
MT02	II	1.76	100 - Cr	1	BASSE		
MT03	II	3.77	50.6 - Cr	2	MOYEN		
MT04	II	0.58		0	ABSENT		
Pt 1	II	0.43		0	ABSENT	2.9	Élevée
Pt 2	II	0.4		0	ABSENT	2.9	Élevée
Pt 3	II	0.35		0	ABSENT	3.4	Élevée
Pt 4	II	0.48		0	ABSENT		
Pt 5	II	0.42		0	ABSENT	4.1	Bonne
Pt 6	II	0.53		0	ABSENT	4.1	Bonne
Pt 7	II	0.45		0	ABSENT	4	Bonne
Pt 8	II	0.45		0	ABSENT	3.7	Élevée
Pt 9	II	0.32		0	ABSENT	3.7	Élevée
Pt 10	II	0.28		0	ABSENT	4	Bonne
Pt 11	II	0.32		0	ABSENT	4.1	Bonne
Pt 12	II					3.3	Élevée
Pt 13	II					3.7	Élevée
Pt 14	II					4.5	Bonne
Pt 15	II					4.1	Bonne

5.3 - LOE3 Biodisponibilità

Le traitement global des résultats au moyen des critères d'intégration pondérés a souvent montré un niveau de bioaccumulation absent ou faible dans les tissus des moules du port de La Spezia : à l'exception des échantillons GR-SP-II-MT-02, GR-SP-PL-II-MT-06 et GR-SP-III-MT-03 avec un niveau moyen de risque de bioaccumulation, et des échantillons MT01, MT02, MT03 de la première campagne et du site " Molo Garibaldi " de la troisième campagne avec un niveau " élevé " (Tableau 5.4).

Tableau 5.4. Résultats du traitement global du risque de bioaccumulation dans les tissus des moules du port de La Spezia.

Code Échantillon	Site	Campagne	Nombre de paramètres attribués aux différentes classes					HQ	Niveau de danger
			Absent	Basse	Moyen	Élevé	Très Élevé		
GR-SP-I-MT-01	Molo Fornelli	I	16	5	16	6	0	124.81	ÉLEVÉ
GR-SP-I-MT-02	Molo Garibaldi	I	16	8	12	6	1	122.44	ÉLEVÉ
GR-SP-I-MT-03	Cadimare molo aeronautica militare	I	13	8	14	7	1	132.83	ÉLEVÉ
GR-SP-PL-I-MT-05	Diga ponente interna	I	24	17	2	0	0	7.83	BASSE
GR-SP-PL-I-MT-06	Diga levante interna	I	27	15	1	0	0	5.09	BASSE
GR-SP-PL-I-MT-07	Diga levante esterna	I	43	0	0	0	0	0	ABSENT
GR-SP-II-MT-01	Molo Fornelli	II	40	3	0	0	0	1.56	BASSE
GR-SP-II-MT-02	Molo Garibaldi	II	32	4	7	0	0	26.65	MOYEN
GR-SP-II-MT-03	Cadimare molo aeronautica militare	II	40	3	0	0	0	1.7	BASSE
GR-SP-II-MT-04	Scuola di vela Santa Teresa	II	43	0	0	0	0	0	ABSENT
GR-SP-PL-II-MT-05	Diga ponente interna	II	24	17	2	0	0	7.68	BASSE
GR-SP-PL-II-MT-06	Diga levante interna	II	26	11	6	0	0	20.2	MOYEN
GR-SP-PL-II-MT-07	Diga levante esterna	II	43	0	0	0	0	0	ABSENT
GR-SP-III-MT-02	Molo Garibaldi	III	20	13	1	3	6	170.95	ÉLEVÉ
GR-SP-III-MT-03	Cadimare molo aeronautica militare	III	18	8	14	3	0	88.33	MOYEN
GR-SP-III-MT-04	Scuola di vela Santa Teresa	III	43	0	0	0	0	0	ABSENT
GR-SP-PL-III-MT-05	Diga ponente interna	III	27	13	3	0	0	10.57	BASSE
GR-SP-PL-III-MT-06	Diga levante interna	III	27	13	3	0	0	10.7	BASSE
GR-SP-PL-III-MT-07	Diga levante esterna	III	43	0	0	0	0	0	ASSENTE

5.4 - LOE4 Biomarqueur

Les résultats des biomarqueurs obtenus pour les moules transloquées dans le port de La Spezia sont présentés dans le tableau 5.5, qui montre un niveau de danger élaboré d'Absent ou faible pour tous les échantillons.

Tableau 5.5. Résultats du traitement du danger global des biomarqueurs dans les moules du port de La Spezia.

Code Échantillon	Site	Campagne	Nombre de paramètres attribués aux différentes classes					Niveau de danger
			Absent	Basse	Moyen	Élevé	Très Élevé	
GR-SP-II-MT-01	Molo Fornelli	II	6	0	0	0	0	ABSENT
GR-SP-II-MT-02	Molo Garibaldi	II	5	0	1	0	0	BASSE
GR-SP-II-MT-03	Cadimare molo aeronautica militare	II	6	0	0	0	0	ABSENT
GR-SP-II-MT-04	Scuola di vela Santa Teresa	II	6	0	0	0	0	ABSENT
GR-SP-III-MT-02	Molo Garibaldi	III	4	0	1	0	0	BASSE
GR-SP-III-MT-03	Cadimare molo aeronautica militare	III	4	0	1	0	0	BASSE
GR-SP-III-MT-04	Scuola di vela Santa Teresa	III	5	0	0	0	0	ABSENT

5.5 - LOE5 Tests écotoxicologiques

Le tableau 5.6 présente les résultats globaux de la batterie de tests écotoxicologiques réalisés sur les sédiments. Dans cette étude, la batterie utilisée comprend l'analyse de la bioluminescence des bactéries *Aliivibrio fischeri* exposées à la phase solide, la croissance algale de *Phaeodactylum tricornutum* et l'embryotoxicité chez *Paracentrotus lividus*.

La classe de danger écotoxicologique élaborée pour les échantillons de sédiments était soit absente soit faible, à l'exception de l'échantillon GR-SP-II-SE-01 avec un niveau très élevé, et des échantillons de la troisième campagne GR-SP-III-SE-01 et GR-SP-III-SE-04 avec un niveau de danger écotoxicologique Moyen et Élevé respectivement.

Tableau 5.6 Résultats de l'élaboration globale du danger écotoxicologique pour le port de La Spezia au moyen de critères d'intégration pondérés sur les batteries d'essais constituées de *Paracentrotus lividus*, *Aliivibrio fischeri* et *Phaeodactylum tricornutum*.

Code Échantillon	Site	Campagne	Espèce	HQ Spécifique	HQ Batterie	Niveau de danger
GR-SP-II-SE-01	Tra Molo Garibaldi e Molo Fornelli	II	<i>P. lividus</i>	6.21	9	TRÈS ÉLEVÉ
			<i>P. tricornutum</i>	9.32		
			<i>A. fischeri</i>	4.64		
GR-SP-II-SE-02	Antistante Cadimare	II	<i>P. lividus</i>	0.43	0.78	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0.92		
GR-SP-II-SE-03	Centro Rada	II	<i>P. lividus</i>	0.63	0.87	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	1.03		
GR-SP-II-SE-04	Imboccatura di levante	II	<i>P. lividus</i>	0.79	0.61	ABSENT
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-SP-III-SE-01	Tra Molo Garibaldi e Molo Fornelli	III	<i>P. lividus</i>	1.52	2.74	MOYEN
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	4.24		
GR-SP-III-SE-02	Antistante Cadimare	III	<i>P. lividus</i>	0.02	1.17	BASSE
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	2.45		
GR-SP-III-SE-03	Centro Rada	III	<i>P. lividus</i>	1.04	1.25	BASSE
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	1.6		
GR-SP-III-SE-04	Imboccatura di levante	III	<i>P. lividus</i>	6.21	3.69	ÉLEVÉ
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	1.54		

5.6 - Analyse et traitement des risques écologiques par la méthode du Weight Of Evidence (WOE)

Le tableau 5.7 montre, pour chaque site, à la fois l'indice de risque déjà élaboré et discuté pour chaque LOE, et l'indice de risque intégré WOE. L'indice de risque WOE est absent ou faible pour les sites des deux premières campagnes, à l'exception du site "Molo Fornelli" qui présente une classe de risque moyen.

Prodotto n. T2.1.2

En ce qui concerne la troisième campagne, le site Imboccatura di levante entre dans la classe de risque faible, le site "Molo Fornelli" présente une classe de risque élevé, et les sites militaires "Cadimare molo aeronautica" et "Centro Rada" une classe de risque moyen (Figures 5.1 - 5.2 - 5.3).

Prodotto n. T2.1.2

Tableau 5.7 Résumé des résultats pour les traitements individuels pondérés (LOE1, LOE2, LOE3, LOE4 et LOE5) et l'intégration globale WOE (Weight of Evidence).

Site	Campagne	NIVEAU DE DANGER					WOE	
		chimique sédiments LOE 1	chimique colonne d'eau LOE 2	bioaccumulation LOE 3	biomarqueur LOE 4	tests écotoxicologiques LOE 5		
Molo Fornelli	I (novembre 2017)	ABSENT		ÉLEVÉ		ABSENT	BASSE	
Cadimare molo aeronautica militare		ABSENT		ÉLEVÉ		ABSENT	BASSE	
Centro Rada		ABSENT				ABSENT	ABSENT	
Imboccatura di levante		ABSENT				ABSENT	ABSENT	
Molo Fornelli	II (mai 2019)	ÉLEVÉ	ABSENT	BASSE	ABSENT	TRÈS ÉLEVÉ	MOYEN	
Cadimare molo aeronautica militare		TRÈS ÉLEVÉ	BASSE	BASSE	BASSE	ABSENT	BASSE	
Centro Rada		MOYEN	ABSENT			ABSENT	BASSE	

Site	Campagne	NIVEAU DE DANGER					WOE	
		chimique sédiments LOE 1	chimique colonne d'eau LOE 2	bioaccumulation LOE 3	biomarqueur LOE 4	tests écotoxicologiques LOE 5		
Imboccatura di levante		MOYEN	ABSENT	ABSENT	ABSENT	ABSENT	BASSE	
Molo Fornelli	III (septembre 2019)	ÉLEVÉ		ÉLEVÉ		MOYEN	ÉLEVÉ	
Cadimare molo aeronautica militare	III (septembre 2019)	ÉLEVÉ		MOYEN		BASSE	BASSE	
Centro Rada		MOYEN				BASSE	BASSE	
Imboccatura di levante		MOYEN		ABSENT	ABSENT	ÉLEVÉ	BASSE	



Figure 5.1 Traitement global du WOE (sortie du modèle Sediqualssoft®). Les classes de risque sont exprimées par des couleurs (blanc : absent ; bleu clair : faible ; jaune : moyen ; rouge : élevé ; noir : très élevé). Campagne I (novembre 2017).



Figure 5.2 Traitement global du WOE (sortie du modèle Sediqualssoft®). Les classes de risque sont exprimées par des couleurs (blanc : absent ; bleu clair : faible ; jaune : moyen ; rouge : élevé ; noir : très élevé). Campagne II (mai 2019).



Figure 5.3 Traitement global du WOE (sortie du modèle Sediqualsoft®). Les classes de risque sont exprimées par des couleurs (blanc : absent ; bleu clair : faible ; jaune : moyen ; rouge : élevé ; noir : très élevé). Campagne III (septembre 2019).

6 - Port de Toulon : développement de l'analyse du risque écologique

Les données recueillies dans la zone portuaire de Toulon se réfèrent à 3 LOE principaux : caractérisation chimique des sédiments en référence aux valeurs L2 du DM 173/2016 (LOE-1), caractérisation chimique de la colonne d'eau en référence aux NQE du décret législatif 172/2015 (LOE-2), caractéristiques écotoxicologiques des sédiments évaluées par une batterie de tests biologiques (LOE-5) (Tableau 6.1).

Tableau 6.1. Type de données collectées dans la zone portuaire de Toulon lors des différentes campagnes.

	LOE	Analyses	Période	Échantillons
1	Caractérisation chimique des sédiments	Granulométrie Métaux: Al - As - Cd- Cr _{tot} - Cu- Fe- Hg - Ni- Pb- Zn Composés organostanniques IPA hydrocarbures aromatiques polycycliques PCB biphényles polychlorés Pesticides	I Campagne (février 2019) II Campagne (octobre 2019)	Banchina Corsica Ferries (SE-01) La Tour Royale (SE-02) Impianti di mitilicoltura (Lazaret) (SE-03)
2	Caractérisation chimique de la Colonne d'eau	Métaux: Al - As - Cr _{tot} - Cu - Fe - Mn - Ni - Pb - V - Zn Autres par.: Chla - %OD - NO ₃ - PO ₄ - pH - Temp - Cond - Turb	I Campagne (février 2019)	Pt 1 à Pt 18
5	Tests écotoxicologiques	Embryotoxicité - <i>Paracentrotus Lividus</i> Croissance des algues - <i>Phaeodactylum tricorutum</i> Bioluminescence - <i>Aliivibrio fischeri</i> en phase solide	I Campagne (février 2019) II Campagne (octobre 2019)	Banchina Corsica Ferries (SE-01) La Tour Royale (SE-02) Impianti di mitilicoltura (Lazaret) (SE-03)

6.1 - LOE1 Caractérisation chimique des sédiments

Comme indiqué dans le tableau 6.2, le traitement global de tous les résultats par rapport à L2 (DM 173/2016) lors de la première campagne a fourni une classe de danger chimique Absent/Transcendant pour les échantillons GR-TL-I-SE-02 et GR-TL-I-SE-03 et Très élevé pour l'échantillon GR-TL-I-SE-01. Lors de la deuxième campagne, l'échantillon GR-TL-I-SE-01 était à nouveau dans une classe de danger chimique très élevée et les échantillons GR-TL-I-SE-02 et GR-TL-I-SE-03 sont passés d'un niveau de danger chimique absent/transcendant à un niveau moyen.

Les composés qui ont le plus contribué en pourcentage à l'indice de risque chimique lors des deuxième et troisième campagnes sont le Hg et la somme des polychlorobiphényles.

Tableau 6.2. Niveaux de danger chimique obtenus à partir du traitement pondéré des données chimiques de l'ensemble des sédiments du port de Toulon en référence aux limites L2 (DM 173/2016).

Code Échantillon	Zone	Campagne	HQ	% max/RTR	N. param. dép.	Niveau de danger chimique
GR-TL-I-SE-01	Banchina Corsica Ferries	I	38,4	41,7 - Hg	6	TRÈS ÉLEVÉ
GR-TL-I-SE-02	La Tour Royale	I	0,13	-	0	ABSENT
GR-TL-I-SE-03	Impianti di mitilicoltura (Lazaret)	I	1,25	100 - As	1	NÉGLIGEABLE
GR-TL-II-SE-01	Banchina Corsica Ferries	II	28,8	49,1 - Hg	5	TRÈS ÉLEVÉ
GR-TL-II-SE-02	La Tour Royale	II	3,78	62,4 - Hg	2	MOYEN
GR-TL-II-SE-03	Impianti di mitilicoltura (Lazaret)	II	6,08	100 - S PCB	1	MOYEN

6.2 - LOE2 Caractérisation chimique de la colonne d'eau

Le tableau 6.3 montre les résultats obtenus à partir de la caractérisation chimique de la colonne d'eau ; le traitement a donné une classe de danger chimique absente ou faible pour tous les échantillons.

La classification de la qualité obtenue à partir de l'indice TRIX a montré une classe de qualité de l'état trophique allant de "bon" à "élevé" pour tous les échantillons.

Tableau 6.3. Niveaux de danger chimique obtenus à partir du traitement pondéré des données chimiques de la colonne d'eau du port de Toulon en référence aux limites EQS (décret législatif 172/2015).

Code Échantillon	Campagne	EQS (Décret Législatif 172/2015)				TRIX	CLASSE TRIX
		HQ	% max/RTR	N. param. dép.	Niveau de danger chimique		
Pt 1	I	0.33		0	ABSENT	3.4	Élevée
Pt 2	I	0.28		0	ABSENT	2.2	Élevée
Pt 3	I	0.29		0	ABSENT	-	Élevée
Pt 4	I	0.28		0	ABSENT	-	Élevée
Pt 5	I	0.33		0	ABSENT		
Pt 6	I	0.27		0	ABSENT	2.6	Élevée
Pt 7	I	0.30		0	ABSENT	-	Élevée
Pt 8	I	0		0	ABSENT	-	Élevée
Pt 9	I	1.75	100 - Cr	1	BASSE	3.4	Élevée
Pt 10	I	0.40		0	ABSENT	2.8	Élevée
Pt 11	I	0.41		0	ABSENT	3	Élevée
Pt 12	I	0.39		0	ABSENT	3.6	Élevée
Pt 13	I			0	ABSENT	3.7	Élevée
Pt 14	I	0		0	ABSENT	3.8	Élevée
Pt 15	I	2.18	100 - Cr	1	BASSE	3.9	Élevée
Pt 16	I	0.43		0	ABSENT	4	Bonne
Pt 17	I	0.56		0	ABSENT	4.1	Bonne
Pt 18	I	0.59		0	ABSENT	5.2	Moyenne

6.3 - LOE5 Essais écotoxicologiques

Le tableau 6.4 présente les résultats globaux de l'élaboration de la batterie de tests écotoxicologiques réalisés sur les sédiments, qui comprenaient l'analyse de la bioluminescence de la bactérie *Aliivibrio fischeri* exposée à la phase solide, la croissance algale de *Phaeodactylum tricorutum* et l'embryotoxicité de *Paracentrotus lividus*.

La classe de danger écotoxicologique développée pour tous les échantillons de sédiments des première et deuxième campagnes était Absent.

Tableau 6.4 Résultats de l'élaboration du danger écotoxicologique global pour le port de Toulon en utilisant des critères d'intégration pondérés sur les batteries d'essais constituées de *Paracentrotus Lividus*, *Aliivibrio fischeri* et *Phaeodactylum tricorutum*.

Codice Campione	Sito	Campagna	Specie	HQ Specifico	HQ Batteria	Livello di pericolo
GR-TL-I-SE-01	Banchina Corsica Ferries	I	<i>P. lividus</i>	2.49	0.73	ABSENT
			<i>P. tricorutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-TL-I-SE-02	La Tour Royale	I	<i>P. lividus</i>	0.58	0.21	ABSENT
			<i>P. tricorutum</i>	0.14		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-TL-I-SE-03	Impianti di mitilicoltura (Lazaret)	I	<i>P. lividus</i>	1	0.29	ABSENT
			<i>P. tricorutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-TL-II-SE-01	Banchina Corsica Ferries	II	<i>P. lividus</i>	0.92	0.65	ABSENT
			<i>P. tricorutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-TL-II-SE-02	La Tour Royale	II	<i>P. lividus</i>	0.87	0.63	ABSENT
			<i>P. tricorutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-TL-II-SE-03	Impianti di mitilicoltura (Lazaret)	II	<i>P. lividus</i>	0.58	0.64	ABSENT
			<i>P. tricorutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0.32		

6.4 - Analyse et traitement des risques écologiques par la méthode du poids de la preuve (WOE)

Le tableau 6.5 montre, pour chaque site, à la fois l'indice de risque déjà élaboré et discuté pour chaque LOE, et l'indice de risque intégré WOE. L'indice de risque WOE est Absent ou Faible pour le port de Toulon à l'exception de deux sites de la troisième campagne (" quai Corsica Ferries " et " parcs à moules du Lazaret ") qui présentent une classe de risque Moyen. (Figures 6.1 - 6.2).

Prodotto n. T2.1.2

Tableau 6.5 Résumé des résultats pour les traitements individuels pondérés (LOE1, LOE2, LOE3, LOE4 et LOE5) et l'intégration globale WOE (Weight of Evidence).

Site	Campagne	NIVEAU DE DANGER			WOE	
		chimique sédiments LOE 1	chimique colonne d'eau LOE 2	tests écotoxicologiques LOE 5		
Banchina Corsica Ferries	I (février 2019)	TRÈS ÉLEVÉ	ABSENT	ABSENT	BASSE	
La Tour Royale		ABSENT	ABSENT	ABSENT	ABSENT	
Impianti di mitilicoltura (Lazaret)		TRASCURABILE	ABSENT	ABSENT	ABSENT	
Banchina Corsica Ferries	II (octobre 2019)	TRÈS ÉLEVÉ		ABSENT	MOYEN	
La Tour Royale		MOYEN		ABSENT	BASSE	
Impianti di mitilicoltura (Lazaret)		MOYEN		ABSENT	MOYEN	



Figure 6.1 Traitement global du WOE (sortie du modèle Sediqualsoft®). Les classes de risque sont exprimées par des couleurs (blanc : absent ; bleu clair : faible ; jaune : moyen ; rouge : élevé ; noir : très élevé). Campagne I (février 2019).



Figure 6.2 Traitement global du WOE (sortie du modèle Sediqualsoft®). Les classes de risque sont exprimées par des couleurs (blanc : absent ; bleu clair : faible ; jaune : moyen ; rouge : élevé ; noir : très élevé). Campagne II (octobre 2019).

7 - Indices intégrés spécifiques pour les ports impliqués dans le projet

Les résultats obtenus confirment l'importance de l'approche multidisciplinaire dans la surveillance et l'évaluation du risque dû aux contaminants dans des environnements complexes, caractérisés par une grande hétérogénéité des conditions environnementales comme les sites portuaires ; cette approche est capable de fournir des informations importantes sur les effets des contaminants chimiques sur le biote et leur capacité de transfert trophique, constituant ainsi un outil fondamental dans la procédure d'évaluation du risque écologique. Dans ce projet, l'utilisation du modèle d'intégration pondérée a permis d'évaluer à travers différentes lignes de preuve un seul jugement global du risque environnemental, lié par exemple à la mobilisation des sédiments portuaires, facilement utilisable pour la gestion des zones portuaires, en soulignant comment les activités qui insistent sur ces zones peuvent être différentes les unes des autres et conduire à différents degrés de risque environnemental.

Cette intégration a été réalisée pour toutes les campagnes afin de pouvoir évaluer et mettre en évidence la tendance des conditions de danger environnemental dans le temps.

Le modèle a permis d'obtenir une classe de risque écologique en intégrant une grande quantité de données hétérogènes disponibles dans les différents ports, respectivement :

- environ 4200 résultats pour le port d'Olbia ;
- environ 3600 résultats pour le port de Gênes ;
- environ 2300 résultats pour le port de La Spezia ;
- environ 700 résultats pour le port de Toulon ;

Prodotto n. T2.1.2

En ce qui concerne la première campagne, tous les sites d'enquête des différents ports présentaient une condition de risque écologique absente ou faible.

Lors de la deuxième campagne, les conditions environnementales des ports montrent généralement un changement de classe : le port d'Olbia passe d'une condition de risque nul à une classe de risque faible ; le port de Gênes passe d'une classe de risque faible à une classe de risque moyen ; le port de La Spezia montre une situation similaire par rapport à la campagne précédente avec une classe de risque faible, à l'exception du site "Molo Fornelli" qui montre une classe de risque moyen ; le port de Toulon passe également d'une condition environnementale avec un risque absent/faible à un risque faible/moyen (Tableau 7.1).

Tableau 7.1 Classe de risque écologique des ports d'Olbia, Gênes, La Spezia et Toulon dans les 3 campagnes. Les classes de risque sont exprimées par des couleurs (blanc : absent ; bleu clair : faible ; jaune : moyen ; rouge : élevé ; noir : très élevé).

Port	Site	Classe de Risque Écologique		
		I Campagne	II Campagne	III Campagne
Olbia	Banchina Isola Bianca	ABSENT	BASSE	BASSE
	Foce Padrongianus	ABSENT	BASSE	BASSE
	Area esterna	ABSENT	ABSENT	BASSE
Gênes	Diga foranea imboccatura levante	ABSENT	MOYEN	
	Porto antico	BASSE	MOYEN	
	Foce Polcevera	BASSE	MOYEN	
La Spezia	Molo Fornelli	BASSE	MOYEN	ALTO
	Cadimare molo aeronautica militare	BASSE	BASSE	MOYEN
	Centro Rada	ABSENT	BASSE	MOYEN
	Imboccatura di levante	ABSENT	BASSE	BASSE
Toulon	Banchina Corsica Ferries	BASSE	MOYEN	
	La Tour Royale	ABSENT	BASSE	
	Impianti di mitilicoltura (Lazaret)	ABSENT	MOYEN	

En général, cette aggravation de la classe de risque est principalement due aux LOE suivants :

- Port d'Olbia : l'aggravation du risque d'Absent à Faible qui est observée entre la première (juin 2018) et la deuxième campagne (mai 2019) est due à la fois à un nombre plus élevé de LOEs investigués et à une augmentation du niveau de danger écotoxicologique (LOE5) dans la campagne II. La plus grande contribution de la classe de risque faible pour la campagne III (novembre 2019) est due au niveau de danger chimique moyen de la colonne d'eau (LOE2) ;

- Port de Gênes : la classe de risque moyen observée lors de la deuxième campagne (mai 2019) est généralement due à une augmentation du niveau de danger de LOE 3, LOE 4 et LOE 5 ;

- Port de La Spezia : l'augmentation de la classe de danger observée au fil du temps est principalement due à une augmentation du niveau de danger chimique des sédiments (LOE 1) et également au LOE des essais écotoxicologiques (LOE5) ;

- Port de Toulon : l'augmentation de la classe de danger observée lors de la campagne II est principalement due à une augmentation du niveau de danger chimique des sédiments (LOE 1).

8 - Bibliographie

- Bebiano M.J., Pereira C.G., Rey F., Cravo A., Duarte D., D'Errico G., Regoli F. (2015). Integrated approach to assess ecosystem health in harbor areas. *Science of The Total Environment* 514, 92-107.
- Benedetti M., Ciaprini F., Piva F., Onorati F., Fattorini D., Notti A., Ausili A., Regoli F. (2012). A multidisciplinary weight of evidence approach for classifying polluted sediments: Integrating sediment chemistry, bioavailability, biomarkers responses and bioassays. *Environmental International* 38, 17-28.
- Benedetti M., Gorbi S., Fattorini D., d'Errico G., Piva F., Pacitti D., Regoli F. (2014). Environmental hazards from natural hydrocarbons seepage: integrated classification of risk from sediment chemistry, bioavailability and biomarkers responses in sentinel species. *Environmental Pollution* 185, 116-126.
- Borja A., Franco J., Perez V. (2000). A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Marine Pollution Bulletin* 40, 1100-1114.
- Chapman P.M., Wang F., Caeiro S.S. (2013). Assessing and managing sediment contamination in transitional waters. *Environment international* 55, 71-91.
- Chapman P.M. (2007). Determining when contamination is pollution - weight of evidence determinations for sediments and effluents. *Environmental International* 33, 492-501.
- Dauvin J.C., Ruellet T. (2007). Polychaete/amphipod ratio revisited. *Marine Pollution Bulletin* 55, 215-224.

Decreto Ministeriale 173/2016, 15 luglio 2016. Regolamento recante modalità e criteri tecnici per l'autorizzazione all'immersione in mare dei materiali di escavo di fondali marini.

Decreto Ministeriale 260/2010. Regolamento recante i Criteri tecnici per la classificazione dello stato dei corpi idrici superficiali, per la modifica delle norme tecniche del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale, predisposto ai sensi dell'articolo 75, comma 3, del medesimo decreto legislativo. G.U. 30 del 7 Febbraio 2011.

Frantzen M., Regoli F., Ambrose W. G., Nahrgang J., Geraudie P., Benedetti M., Camus L. (2016). Biological effects of mechanically and chemically dispersed oil on the Icelandic scallop (*Chlamys islandica*). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 127, 95-107.

Galloway T.S., Brown R.J., Browne M.A., Dissanayake A., Lowe D., Jones M.B., Depledge M.H. (2004). A multibiomarker approach to environmental assessment. *Environmental Science and Technology* 38, 1723-1731

Hagger J.A., Jones M.B., Leonard D.R., Owen R., Galloway T.S. (2006). Biomarkers and integrated environmental risk assessment: are there more questions than answers? *Integrated Environmental Assessment and Management* 2, 312-329

Lehtonen K., d'Errico G., Korpinen S., Regoli F., Ahkola H., Kinnunen T., Lastumäki T. (2019). Mussel Caging and the Weight of Evidence Approach in the Assessment of Chemical Contamination in Coastal Waters of Finland (Baltic Sea). *Frontiers in Marine Science* 6, 688.

Margalef, R. (1969). *Perspectives in Ecological Theory*. The University of Chicago Press, Chicago.

- Marigómez I., Garmendia L., Soto M., Orbea A., Izagirre U., Cajaraville, M.P. (2013). Marine ecosystem health status assessment through integrative biomarker indices: a comparative study after the Prestige oil spill “Mussel Watch”. *Ecotoxicology* 22(3), 486-505.
- Mestre N.C., Rocha T.L., Canals M., Cardoso C., Danovaro R., Dell’Anno A., Gambi C., Regoli F., Sanchez-Vidal A., Bebianno M.J. (2017). Environmental hazard assessment of a marine mine tailings deposit site and potential implications for deep-sea mining. *Environmental Pollution* 228, 169-178.
- Mistri M., Munari C. (2008). BITS: a SMART indicator for soft-bottom, non-tidal lagoons. *Marine Pollution Bulletin* 56, 587-599
- Moore M.N., Icarus Allen J., McVeigh A. (2006). Environmental prognostics: An integrated model supporting lysosomal stress responses as predictive biomarkers of animal health status. *Marine Environmental Research* 61, 278-304
- Morrone L., d’Errico G., Sacchi M., Molisso F., Armiento G., Chiavarini S., Rimauro J., Guida M., Siciliano A., Ceparano M., Aliberti F., Tosti E., Gallo A., Libralato G., Patti F.P., Gorbi S., Fattorini D., Nardi A., Di Carlo M., Mezzelani M., Benedetti M., Pellegrini D., Musco L., Danovaro R., Dell’Anno A., Regoli F. (2020). Integrated characterization and risk management of marine sediments: The case study of the industrialized Bagnoli area (Naples, Italy). *Marine Environmental Research* 160, 104984.
- Muxika I., Borja A., Bald J. (2007). Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin* 55, 16-29
- Pielou E.C. (1969). *An Introduction to Mathematical Ecology*. Wiley-Interscience, New York.

- Piva F., Ciaprini F., Onorati F., Benedetti M., Fattorini D., Ausili A., Regoli F. (2011). Assessing sediment hazard through a Weight Of Evidence approach with bioindicator organisms: a practical model to elaborate data from sediment chemistry, bioavailability, biomarkers and ecotoxicological bioassays. *Chemosphere* 83, 475-485
- Regoli F., d'Errico G., Nardi A., Mezzelani, M., Fattorini, D., Benedetti M., Di Carlo M., Pellegrini D., Gorbi S. (2019). Application of a weight of evidence approach for monitoring complex environmental scenarios: The case-study of off-shore platforms. *Frontiers in Marine Science* 6, 377.
- Regoli F., Pellegrini D., Cicero A. M., Nigro M., Benedetti M., Gorbi S., Fattorini D., d'Errico G., Di Carlo M., Nardi A., Gaion A., Scuderi A., Giuliani S., Romanelli G., Berto D., Trabucco D., Gui-di P., Bernardeschi M., Scarcelli V., Frenzilli G. (2014). A multidisciplinary weight of evidence approach for environmental risk assessment at the Costa Concordia wreck: integrative indices from Mussel Watch. *Marine Environmental Research* 96, 92-104.
- Shannon C.E., Weaver W. (1963). *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana, Illinois.
- Simboura N., Zenetos A. (2002). Benthic indicators to use in Ecological Quality classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystems, including a new Biotic Index. *Mediterranean Marine Science* 3, 77-111.
- Viarengo A., Lowe D., Bolognesi C., Fabbri E., Koehler A. (2007). The use of biomarkers in biomonitoring: A 2-tier approach assessing the level of pollutant-induced stress syndrome in sentinel organisms. *Comparative Biochemistry & Physiology C* 146, 281-300.

Prodotto n. T2.1.2

Vincent C., Heinrich H., Edwards A., Nygaard K., Haythornthwaritej. (2002). Guidance on typology, reference conditions and classification systems for transitional and costal waters, CIS Working Group 2.4(Coast) Common Implementation *Strategy of the Water Framework Directive, European Commission.*