



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

MANUEL POUR L'APPLICATION DES LIGNES DIRECTRICES SUR L'UTILISATION DE LA MODÉLISATION EN SOUTIEN DE LA GESTION DES ACTIVITÉS DE DRAGAGE DANS LE DOMAINE PORTUAIRE

ACTION T1.6 – PRODUIT T1.6.7

SEPTEMBRE 2019



La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au cœur de la Méditerranée

SE.D.Ri.Port – Sédiments, Dragages, Risques Portuaires

<http://interreg-maritime.eu/web/se.d.ri.port>

Responsable action T1.6 «Diagnostic, suivi et modélisation» : ARPAL

ARPAL - Agence régionale pour la protection de l'environnement ligure

Via Bombrini, 8 16149 – Gênes

www.arpal.liguria.it/

ISPRA - Institut Supérieur pour la Protection et la Recherche Environnementale

Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Rome

www.isprambiente.gov.it

Coordinateur ARPAL : Stefania Magri

Coordinateur ISPRA : Iolanda Lisi

Rédacteurs du rapport : Alessandra Feola¹, Iolanda Lisi¹, Stefania Magri², Andrea Salmeri¹, Francesco Venti¹

Remerciements : Simona Macchia, Maria Elena Piccione, Mauro Quagliati, Rosella Bertolotto, David Pellegrini, Andrea Pedroncini, Marcello di Risio et Antonello Bruschi

Graphisme de couverture : Elena Porrazzo

Photos de couverture : concession de l'Autorité du Système Portuaire de la Mer Tyrrhénienne Septentrionale

Veillez citer le document de la sorte :

ARPAL - ISPRA, AA.VV (2019). Manuel pour l'application des lignes directrices sur l'utilisation de la modélisation en soutien de la gestion des activités de dragage dans le domaine portuaire.

¹ ISPRA, ² ARPAL

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	4
1 INTRODUCTION	5
1.1 Encadrement de la problématique dans le contexte institutionnel et normatif	8
1.2 Objet et objectif de ce manuel applicatif	9
2 LA MODÉLISATION COMME OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION	11
2.1 Description de la méthodologie : l'approche de modélisation intégrée	12
2.2 Le module hydrodynamique	14
2.2.1 Définition du domaine de calcul	16
2.2.2 Définition des scénarios de modélisation	18
2.2.3 Définition et introduction des forces	21
2.2.3.1 <i>Données bathymétriques</i>	21
2.2.3.2 <i>Données sédimentologiques</i>	21
2.2.3.3 <i>Données météorologiques, climatiques et hydrodynamiques</i>	22
2.2.3.4 <i>Données océanographiques et hydrologiques</i>	25
2.2.3.5 <i>Turbidité et sédiments en suspension</i>	26
2.3 La modélisation des scénarios de libération pour les opérations de dragage	27
2.3.1 Analyse des modes opératoires de dragage	30
2.3.2 Analyse des fractions sédimentaires disponibles pour le transport	32
2.3.3 Fractionnement des sédiments fins disponibles en champ lointain.....	36
2.4 La modélisation du transport des sédiments	39
2.4.1 Application du terme source dans le domaine du calcul	40
2.5 Analyse et résumé des résultats	41
2.5.1. Objectifs de l'analyse des scénarios d'hydrodynamique de transport.....	42
2.5.2. Analyse et résumé des résultats pour les scénarios à long terme	43
3 L'INTERACTION ENTRE LA MODÉLISATION ET LE SUIVI	47
3.1 Le suivi pour soutenir la validation et la vérification des résultats	49
3.1.1 Objectifs du suivi ante operam	51
3.1.2 Objectifs du suivi en cours d'activité	52
3.1.3 Objectifs du suivi post operam	53
3.2 La modélisation en soutien du suivi	53
3.2.1 Modélisation opérationnelle en phase de chantier	54
3.3 Standardisation des mesures et du flux d'informations	55
4 CONCLUSIONS	58
5 BIBLIOGRAPHIE	60
ANNEXE 1 : EXEMPLE DE FICHES INFORMATIVES DE PROJET	65

AVANT-PROPOS

Le projet Se.D.Ri.Port (Sédiments, Dragages et Risques PORTuaires), financé par le programme de coopération Italie-France Maritime 2014-2020, se pose comme objectif principal d'identifier des solutions opérationnelles pour le problème de l'ensablement des ports de la zone transfrontalière. Le projet répond à la demande au niveau européen de réaliser des plans d'action communs, c'est-à-dire des études de faisabilité générale permettant de planifier les besoins, en termes quantitatifs, pour le dragage des ports et la réutilisation des sédiments dragués. En particulier, en capitalisant sur l'apport des projets précédents et en expérimentant des systèmes de suivi de l'état des ports, le partenariat Se.D.Ri.Port (mené par la Région Sardaigne, le département du VAR, les universités de Cagliari et de Toulon, la Province de Livourne, ARPAL Ligurie, ISPRA, l'Office des Transports de la Corse) agit conjointement pour identifier des procédures opérationnelles et des stratégies d'intervention communes, à la fois pour minimiser les effets négatifs de l'ensablement et du dragage, et pour obtenir une meilleure fiabilité des ressources portuaires dans toute la zone transfrontalière.

En effet, les phénomènes d'ensablement peuvent menacer la bonne fonctionnalité opérationnelle et économique des ports, compromettant ainsi les activités économiques liées au transport maritime. En outre, les activités de déplacement des sédiments, qui sont souvent nécessaires pour l'entretien et la restauration des fonds portuaires, peuvent avoir des effets négatifs sur l'environnement (tant sur l'aspect abiotique que biotique de l'écosystème marin) dans et autour des zones portuaires, en raison de l'éventuelle remise en suspension et du dépôt ultérieur de la partie la plus fine des sédiments déplacés (et des contaminants organiques et inorganiques qui sont souvent présents dans les sédiments portuaires).

Dans le cadre du projet Se.D.Ri.Port., l'ISPRA et l'ARPAL ont collaboré à la mise en œuvre de modèles numériques appliqués à l'étude de cas de la rade de La Spezia, dans le but de quantifier les effets environnementaux potentiels liés à la manipulation des sédiments portuaires avec la technique du nivellement. Cette technique, de manière générale, peut être résumée en termes d'excavation et de déplacement/redistribution des sédiments dragués au fond de la mer vers une zone adjacente, sans que la tête de l'engin de dragage sorte de la colonne d'eau. La description des applications de modélisation à l'étude de cas de La Spezia est rapportée dans le rapport du Se.D.Ri.Port «Document de synthèse de l'expérimentation de l'application de modélisation» (ARPAL et ISPRA, 2019, Task T1.6, produit T1.6.6, projet Se.D.Ri.Port), qui a permis de vérifier la possibilité de reproduire à de nouveaux contextes environnementaux et opérationnels les principes méthodologiques des techniques d'analyse proposées dans la méthode Dr-EAM (Feola *et al*, 2016), en bénéficiant de nouvelles données spécifiques aux sites. L'objectif de ce manuel est de rendre explicites, de manière schématique et fonctionnelle pour les applications de modélisation dans les bassins portuaires, les critères existants dans la littérature et adoptables dans les différents contextes portuaires transfrontaliers pour une approche correcte des études de modélisation en vue de l'analyse des effets environnementaux potentiels générés par les sédiments remis en suspension (et "redéposés") lors des opérations de dragage. Ces études peuvent servir aussi bien la conception des opérations de dragage des fonds portuaires qu'à la planification des systèmes de surveillance des éventuelles altérations de la qualité de l'écosystème marin pendant l'exécution des activités. À cette fin, les critères définis pour l'application de l'Approche de Modélisation Intégrée (ci-après « AMI ») proposée dans les lignes directrices (ci-après « L.D. »)

ISPRA «La modélisation mathématique dans l'évaluation des aspects physiques liés au déplacement des sédiments dans les zones marines et côtières» (Lisi *et al.*, 2017), édité par ISPRA en collaboration avec l'université de L'Aquila et DHI, ont été repris. En particulier, les indications opérationnelles décrites dans le L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) sont reproduites ci-dessous, parfois dans leur intégralité pour faciliter leur interprétation. Elles traitent des modalités de mise en œuvre des modèles mathématiques et des nécessaires interactions avec les données de suivi environnemental pour soutenir la gestion des interventions de dragage dans les bassins semi-fermés et les zones portuaires.

1 INTRODUCTION

Le déplacement des sédiments est une activité très importante pour maintenir ou améliorer la fonctionnalité des ports et des voies navigables.

En pratique, l'ensemble du cycle de traitement des sédiments (dûment caractérisé lorsque la réglementation l'exige) est généralement divisé en trois grandes phases opérationnelles : l'excavation (ou le dragage), le transport et le déversement (ou la localisation finale). Qu'il soit effectué dans les zones côtières ou en mer, les effets environnementaux chimiques, physiques et biologiques sur les écosystèmes marins peuvent être multiples, avec parfois des conséquences pour la santé publique (cf. Wilber & Clark, 2001; HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003; Erftemeijer and Lewis, 2006; Erftemeijer *et al.*, 2012; Nicoletti *et al.*, 2006; PIANC, 2006; Paganelli *et al.*, 2014; Lisi *et al.*, 2017 e 2019a,b; CEDA/IADC, 2018). En particulier, les effets sur les compartiments abiotiques (substrat et colonne d'eau) et biotiques (populations benthiques, poissons, etc.) peuvent être localisés:

- à l'intérieur des sites d'intervention, à proximité de l'engin de dragage, principalement en raison de l'action directe du prélèvement et du déversement des sédiments;
- à différentes distances des sites d'intervention, principalement en raison du transport et du dépôt de sédiments fins suite à la formation de panaches turbides (superficiels et profonds) pendant les activités.

À l'intérieur des sites d'intervention, l'action directe du prélèvement et du déversement de sédiments provoque des effets localisés principalement associés aux modifications de la morphologie et de la bathymétrie des fonds marins, ainsi qu'à la "défaunation" et aux phénomènes d'enfouissement et d'étouffement des populations benthiques présentes, entraînant une défaunation éventuelle des fonds. Les altérations morpho-bathymétriques peuvent également provoquer des changements de l'hydrodynamique locale (et donc des phénomènes d'érosion et de dépôt) et, lorsque le dragage et le déversement exposent des sédiments ayant des caractéristiques de granulométrie et de texture différentes, elles entraînent des changements dans la composition et la structure des communautés benthiques.

À différentes distances de la zone d'intervention, les principaux effets environnementaux sont généralement associés à une augmentation temporaire de la concentration de sédiments en suspension dans la colonne d'eau et à la variation possible des taux de dépôt et de la nature des sédiments déplacés vers le fond dans les zones touchées par l'extension du panache turbide. En particulier, les effets physiques directs sur le compartiment abiotique sont principalement dus à l'altération des caractéristiques physico-chimiques de la colonne d'eau (par exemple, diminution temporaire de la pénétration de la lumière et de la concentration

d'oxygène dissout, relâchement et solubilisation des contaminants éventuellement associés aux sédiments en suspension, etc.) et du fond (ex. pour le dépôt de sédiment fin sur des substrats de différentes typologies). En revanche, sur le compartiment biotique, les effets directs sont essentiellement liés aux éventuels phénomènes d'enfouissement et d'étouffement (piégeage et emprisonnement sur le fond, inefficacité de l'activité de filtration et colmatage des branchies, recouvrement, abrasion des tissus, etc.).

Les effets déjà mentionnés s'ajoutent à ceux de type indirect, tels que la perturbation des zones d'élevage, ceux associés aux changements de la quantité de matière organique présente dans les fractions sédimentaires les plus fines qui, en cas de déplacement de grands volumes de sédiments², peuvent conduire à des situations d'anoxie, et surtout en présence d'habitats sensibles tels que les prairies de Posidonies de Méditerranée ou la biocénose du Coralligène à proximité des zones d'intervention ; les altérations de la capacité photosynthétique (cf. Manzanera *et al.*, 1998). En outre, en cas de déplacement de sédiments contaminés, d'autres effets indirects sur le compartiment biotique peuvent être causés par la mobilisation des contaminants présents (par exemple, bioaccumulation de contaminants dans les tissus de l'organisme, bioamplification et transfert dans la chaîne trophique, altération microbiologique de l'eau et des sédiments, etc.).

L'identification des zones les plus critiques en termes d'ampleur des effets (attendus et/ou constatés) et d'importance des niveaux d'exposition doit tenir compte non seulement des caractéristiques hydrodynamiques locales, mais aussi des volumes et des types de sédiments à déplacer, des modalités techniques et opérationnelles utilisées et de la position, par rapport aux zones d'intervention, des objectifs sensibles et des contraintes environnementales qui peuvent être présentes.

Ainsi, bien que le choix des modalités techniques et opérationnelles soit souvent lié aux objectifs de l'intervention et à leur impact sur la durée et les coûts d'exécution (EPA, 1993; OMOE, 1994; IADC, 1998; USACE, 2003; Anchor Environmental, 2003; Eisma, 2006, CEDA/IADC, 2018), les différentes phases de conception et de gestion des interventions doivent être précédées d'études spécialisées visant à identifier les éventuels risques environnementaux³ (Lisi *et al.*, 2017) et les procédures d'exploitation à adopter pour réduire au minimum les effets environnementaux (physiques, chimiques, biologiques et écotoxicologiques) qui pourraient résulter, à différentes échelles spatiales et temporelles, des opérations de déplacement.

Dans ce cas particulier, des études internationales recommandent que, lors de la conception et de la gestion des interventions, les modèles mathématiques puissent reproduire les processus de génération et de développement des panaches nuageux (superficiels et de fond)

² L'importance des volumes à déplacer doit toujours être évaluée en fonction du contexte environnemental spécifique dans lequel l'intervention est effectuée (Lisi *et al.*, 2017). En outre, pour le cas spécifique des interventions impliquant la pulvérisation de sable de reconstitution, il est fait état dans le *D.M. italien 173/2016* qu'une distinction est faite pour ces pulvérisations entre : les petites interventions annuelles impliquant une quantité totale de sable inférieure à 5 000 m³, les interventions annuelles d'une quantité globale moyenne de plus de 5 000 m³ et jusqu'à 40 000 m³ de matériaux dragué et, enfin, les interventions d'une quantité considérable avec des volumes totaux de plus de 40 000 m³ par an.

³ Toute altération des paramètres environnementaux d'intérêt pouvant résulter des opérations de déplacement, à différentes échelles spatiales/temporelles, et susceptibles de produire des effets (ou stress) significatifs (réversibles ou irréversibles) sur les récepteurs et les cibles sensibles identifiés. Pour les besoins du présent manuel, cette définition inclut également les contraintes environnementales (voir définition correspondante) et les facteurs environnementaux (type de sédiment et de contaminants associés, volumes globaux à manipuler, etc.), auxquels pourraient être liées des altérations significatives des paramètres d'intérêt, qui conditionnent et limitent le choix des modalités opérationnelles (Lisi *et al.*, 2017).

où l'émergence d'éventuels problèmes environnementaux est reconnue. Ces modèles doivent permettre de reproduire la dynamique des sédiments remis en suspension à partir de l'analyse des interactions entre les facteurs opérationnels (type de drague, vitesse et productivité du cycle de dragage/dépôt, volumes totaux à déplacer, etc.) et les facteurs environnementaux (composition et granulométrie des sédiments à déplacer, caractéristiques hydrodynamiques et morpho-bathymétriques, etc.) qui conditionnent les processus de transport (dispersion, diffusion et dépôt) à différentes profondeurs et distances du site d'intervention (cf. Nakai, 1978; Herbich & Brahme, 1991; Collins, 1995; Pennekamp *et al.*, 1996; IADC, 1998; Johnson & Parchure 1999; Burt *et al.*, 2000; Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Palermo & Averett, 2003; USACE, 2003; Bridges *et al.*, 2008; Palermo *et al.*, 2008).

Les activités de manipulation des sédiments doivent être menées de manière à garantir la «non-détérioration» de l'état d'origine et la compatibilité avec les objectifs de qualité fixés.

Une condition préalable essentielle à l'évaluation des effets sur l'environnement est d'identifier les effets potentiels des activités de déplacement (Becker *et al.*, 2015):

- sur le court terme, lors de la réalisation des interventions;
- sur le moyen terme, en cas de répétition des opérations dans le temps;
- sur le long terme, en raison de la configuration finale du projet.

La bonne approche des études environnementales nécessite donc de prévoir et de quantifier la variabilité des augmentations de la concentration de sédiments en suspension et des taux de sédimentation, dans le temps et dans l'espace, à travers une approche de modélisation appropriée (CEDA/IADC, 2018; Lisi *et al.*, 2019b).

Les récentes L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), à cet égard, fournissent des indications opérationnelles pour l'utilisation de modèles mathématiques comme outil de soutien aux différentes phases de la conception des opérations de déplacement, l'évaluation des alternatives de projet (par exemple dans le choix de la technologie de dragage, l'identification des meilleures fenêtres temporelles, etc.), ainsi que pour la planification des activités de surveillance, ce qui permet d'optimiser les ressources nécessaires pour assurer un contrôle précis des effets potentiels sur l'environnement. Les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) sont nées de la nécessité de surmonter le manque de méthodologies communes, au niveau national et international, pour l'analyse et la comparaison des effets environnementaux potentiels générés par les opérations de déplacement des sédiments dans différentes zones marines et côtières. En s'appuyant sur les études scientifiques menées au fil des ans par ISPRA en collaboration avec divers professionnels (Lisi *et al.*, 2012; 2016; Feola *et al.*, 2015; 2016; Di Risio *et al.*, 2017), les informations de la littérature ont été systématisées et des approches standardisées ont été définies pour la conception et la mise en œuvre d'études de modélisation (par exemple, définition du terme source, choix et durée des scénarios de modélisation, interactions avec la surveillance) par le biais de l'AMI (Lisi *et al.*, 2017; 2019a,b), en fonction des phases opérationnelles du cycle de traitement (excavation/transport/déversement), des particularités des zones d'intervention (zones côtières, y compris les zones de littoral et de transition, les bassins semi-fermés et les zones offshore) et du type d'effets environnementaux attendus à court et à long terme.

Une attention particulière a été accordée à la définition des techniques d'analyse et à la synthèse des résultats pour faciliter l'identification des zones les plus affectées par les variations, dans l'espace et dans le temps, de la concentration des matières en suspension (ci-après « SSC ») et du dépôt dans les fonds marins (ci-après « DEP »), en reprenant les principes méthodologiques des techniques d'analyse proposées dans Feola *et al.* (2016).

Dans le cadre du projet Se.D.Ri.Port, la synergie entre ISPRA et ARPAL visait à tester la reproductibilité des critères énoncés dans les L.D. ISPRA pour l'approche correcte des études de modélisation dans différents contextes portuaires et transfrontaliers et pour l'interaction avec le suivi environnemental dans les différentes phases de planification et de gestion des interventions. En particulier, des applications spécifiques ont été réalisées pour modéliser la dispersion de la fraction fine après le dragage et le déplacement des sédiments au moyen de la technique de nivellement des fonds marins dans l'environnement portuaire.

La synergie entre ISPRA et ARPAL a également conduit à la rédaction de la contribution «Synergie entre la modélisation mathématique et le suivi environnemental pour soutenir la gestion environnementale des opérations de déplacement des sédiments dans les zones portuaires et côtières : normalisation des méthodes à partir de cas d'application» rapportée dans le Rapport du Système National de Protection de l'Environnement (SNPA) - année 2018 (Pellegrini *et al.*, 2019b).

1.1 Encadrement de la problématique dans le contexte institutionnel et normatif

Dans le cadre des activités de ce projet, le cadre réglementaire actuel pour la manipulation des sédiments dans les environnements marins côtiers et leur gestion a été évalué, en partant des indications fournies par les conventions internationales.

On trouvera ci-dessous quelques brèves considérations concernant le cadre institutionnel et réglementaire italien proposé dans Pellegrini *et al.* (2019a) dans le cadre de l'atelier Se.D.Ri.Port organisé en collaboration avec la Central Dredging Association (CEDA), en avril 2019. Plus précisément, il a été signalé, en mettant en avant les similitudes et les différences, le cadre réglementaire italien régissant le déplacement des sédiments liés à l'environnement marin portuaire et côtier (art. 109 D.L. italien 152/09 et D.M. italien 173/2016) et au sein des sites de bonification d'intérêt national (art. 5-bis de la L. 84/1994, D.M. italien 7/11/2008 et D.M. italien 172/2016) avec un accent particulier sur les critères de préparation et de mise en œuvre des activités de suivi et sur l'utilisation éventuelle de modèles mathématiques comme outil de soutien.

Plus spécifiquement, l'Annexe Technique au D.M. italien 173/2016, qui met à jour les indications du Manuel APAT-ICRAM (2007), régit l'ensemble du parcours de caractérisation et de gestion des sédiments à traiter, y compris les phases d'échantillonnage, d'analyse de laboratoire (physique, chimique, écotoxicologique et biologique) et de classification de la qualité des sédiments, jusqu'aux indications techniques pour la gestion des matériaux, la caractérisation de la zone destinée à l'immersion, l'excavation, le transport et l'immersion des matériaux et le suivi environnemental.

Par ailleurs, l'art. 5-bis de la L. 84/1994, le D.M. italien 7/11/2008 et D.M. italien 172/2016 réglementent les principaux aspects du processus de manipulation des sédiments dans les Sites d'Intérêt National (ci-après « SIN »), de la caractérisation (échantillonnage, analyse en laboratoire, retour des résultats) aux méthodes d'intervention et de gestion des matériaux (technologies de dragage et de transport, gestion des matériaux de dragage, mesures d'atténuation et de surveillance).

Dans l'Annexe A au D.M. italien 172/2016, bien qu'il soit fait référence aux interventions de dragage dans les zones SIN, il est explicitement fait mention de l'utilisation de modèles mathématiques. En particulier:

- dans la gestion environnementale du processus de manipulation des sédiments (art. 2), *«les choix de projet, effectués conformément aux dispositions de l'article 3 du présent décret, peuvent également être adoptés [...] sur la base de modèles mathématiques adéquatement mis en œuvre, capables de prévoir, pour les différents scénarios envisagés, le comportement des sédiments manipulés dans le milieu aquatique et les processus de dispersion et/ou de diffusion de la contamination éventuellement présente. Les résultats de ces modèles, une fois appliqués, devraient faire partie intégrante du projet de dragage [...]»;*
- dans le cadre des activités de dragage (art. 5), *«Tous les types d'intervention doivent être effectués de manière à exclure les impacts mesurables et significatifs [...], en prévenant et en limitant toute dispersion et tout rejet accidentels de matériaux, en sauvegardant également les objectifs sensibles ou les zones protégées, et en respectant la législation régionale pertinente. En fonction de la complexité de l'intervention et du contexte environnemental dans lequel elle est réalisée, l'évaluation des effets doit couvrir toute la zone potentiellement affectée par les activités, en tenant compte de plusieurs facteurs dont, [...] les résultats de l'application de tout modèle mathématique, correctement mis en œuvre, capable de prévoir, pour les différents scénarios hypothétiques, le comportement des sédiments déplacés et les processus de dispersion et/ou de propagation de la contamination éventuellement présents;*
- *En ce qui concerne les mesures d'atténuation (art. 6) et les activités de suivi (art. 7), le décret mentionne les études des caractéristiques hydrodynamiques, les évaluations de la présence d'objectifs sensibles, les méthodes de dragage/transport et de localisation, ainsi que l'évaluation des options de gestion, qui pourraient certainement bénéficier de l'application de modèles pour évaluer l'évolution spatio-temporelle des effets induits par les mouvements.*

Pour une comparaison entre les réglementations existantes dans les pays impliqués dans le projet et la réalité européenne, veuillez-vous référer au document Se.D.Ri.Port « Étude comparative des réglementations en vigueur et en cours d'examen (italienne, française et européenne) sur le dragage des sédiments portuaires et identification des questions critiques (environnementales et technico-logistiques) liées à la gestion de la filière côtière maritime (gestion "aquatique") » rédigé par ISPRA dans le cadre de la tâche T1.2.

Sur la base de l'expérience acquise dans le domaine international, il est de plus en plus nécessaire d'utiliser des études de modélisation pour exclure les éventuels impacts dans la zone la plus large, et ce pendant l'exécution des interventions et pour vérifier la conformité des choix de projet avec les éventuelles exigences environnementales requises (Lisi *et al.*, 2017 et 2019b).

1.2 Objet et objectif de ce manuel applicatif

Dans ce manuel applicatif, les principaux contenus des L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) ont été repris, remodelés et généralisés notamment sur les aspects à prendre en compte pour le paramétrage correct des applications de modélisation dans la zone portuaire, afin de les rendre facilement applicables dans les différents types de ports présents dans la zone transfrontalière.

Plus précisément, les critères à l'appui de l'identification des forces et des conditions limites (bathymétriques, sédimentologiques, climatiques, hydrodynamiques) et de la caractérisation des sources de rejets du dragage (par exemple, comment les sédiments sont remis en suspension et/ou libérés dans la colonne d'eau par rapport au volume et à la distribution granulométrique initiale ; la profondeur de rejet, l'intensité du rejet par cycle de dragage) ont été mis en évidence.

Y sont notamment détaillés:

- les facteurs environnementaux et opérationnels à prendre en compte pour la mise en œuvre de l'approche de modélisation intégrée (AMI);
- les principales interactions avec le suivi environnemental, dont la planification doit permettre à la fois le contrôle des effets sur l'environnement et la vérification des résultats de la modélisation, conformément aux indications fournies dans le D.M. italien 172/2016 « [...] *le plan de suivi doit contenir la description du contexte environnemental dans lequel les interventions sont effectuées (caractéristiques morphologiques et hydrodynamiques, présence d'espèces sensibles et/ou de zones protégées) [...] »*;
- les modalités d'analyse et de synthèse des résultats pour la définition des « impacts potentiels » sur la base de la connaissance de la zone d'intervention (par exemple, présence et typologie d'espèces sensibles à protéger en cohérence avec les indications européennes et internationales, telles que *P. oceanica*, formations coralligènes, etc.);
- l'utilisation de Fiches Informatives de Projets (ci-après « FIP »), contenant les principales informations (environnementales et opérationnelles) qui devraient être acquises pour une meilleure application et vérification des études de modélisation et pour augmenter le nombre des données de terrain pour les projets futurs.

2 LA MODÉLISATION COMME OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION

Dans le cas de la formation d'un panache lors de l'excavation (Figure 1), la zone de formation peut être considérée comme coïncidant approximativement avec la position de la drague (ou zone de dragage). Les mécanismes de remise en suspension et/ou de libération dans la colonne d'eau de l'engin de dragage sont strictement dépendants des méthodes technico-opérationnelles utilisées (type de drague, vitesse, productivité et épaisseur de la coupe lors d'un cycle de dragage, profondeur de l'excavation, mesures environnementales d'exploitation, etc.), liées, à leur tour, aux caractéristiques des sédiments à déplacer. La limite extérieure de la zone de production du panache turbide délimite la zone dite de champ proche (ou *near-field zone*), dans laquelle les sédiments en suspension commencent à subir des processus de sédimentation différentielle (Hadfield, 2014), de sorte que seules les fractions granulométriques les plus fines contribuent à former le panache turbide dans la zone de champ lointain.

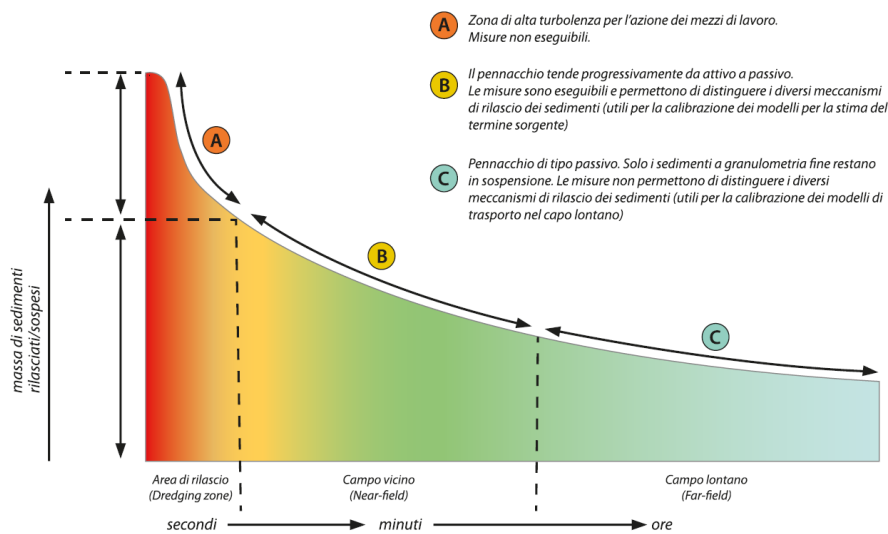


Figure 1: Schéma de la formation d'un panache turbide lors de la phase opérationnelle d'excavation (dragage). Extrait de Lisi *et al.*, 2017 (modifié par HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003).

Dans le champ lointain, les phénomènes de transport sont reproductibles avec des modèles mathématiques d'un bon niveau de fiabilité, la dynamique du panache étant passive⁴.

Les modèles mathématiques, calibrés et validés par l'utilisation de la littérature et des données de terrain, constituent un outil d'appui valable dans les différentes phases de conception et de gestion d'une intervention de manipulation des sédiments, et peuvent soutenir le choix comparatif de méthodes technico-opérationnelles capables de minimiser les effets sur l'environnement, et constituer une référence pour la planification des activités de surveillance

⁴ Les processus de transport sont principalement conditionnés par l'action des forces hydrodynamiques (par ex. les vagues, les marées, le vent, les gradients de densité) et sont caractérisés par des échelles spatiales de plusieurs kilomètres et des échelles de temps de plusieurs jours (par ex. HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003; John *et al.*, 2000).

de ces effets, en particulier lorsque l'on reconnaît les éventuels risques environnementaux qui peuvent résulter du transport et du dépôt de sédiments fins libérés pendant tout le cycle de dragage.

Conformément aux principes méthodologiques énoncés dans les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), pour une estimation fiable des processus physiques qui caractérisent la dynamique des sédiments (libération, dispersion, diffusion, dépôt et parfois remise en suspension par le fond) à différentes distances du site d'intervention, il convient que la sélection des modèles mathématiques à mettre en œuvre soit faite en fonction des objectifs du projet et des études environnementales et du type de résultat souhaité et/ou requis (Figure 2).

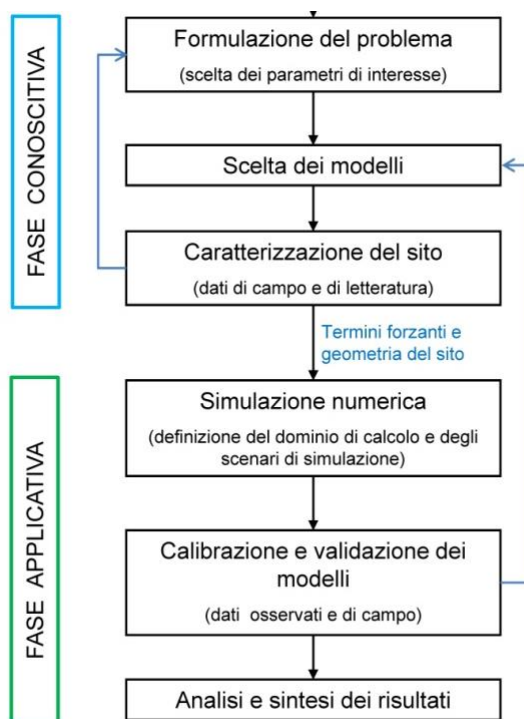


Figure 2: Diagramme de flux de l'approche de modélisation. Extrait de Lisi *et al.*, 2017 (modifié)

Vous trouverez ci-dessous les principales caractéristiques des modèles numériques qui peuvent être utilisés dans l'AMI. Veuillez consulter les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) et la littérature sectorielle pour de plus amples informations (par ex. Blumberg & Mellor, 1987; Pedlosky, 1996, 2003; Mei 1989; Chorin *et al.* 2000; Becker *et al.*, 2015; Shao *et al.*, 2016).

2.1 Description de la méthodologie : l'approche de modélisation intégrée

En référence au diagramme en Figure 2, les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) prévoit une phase cognitive préliminaire (FCP) basée sur la reconnaissance des informations et des données (opérationnelles et environnementales) existantes pour établir, éventuellement par le biais d'un jugement d'expert, la nécessité d'effectuer des études de modélisation et de vérifier l'adéquation des ensembles de données disponibles pour mettre en œuvre, calibrer et valider les modèles mathématiques et ainsi pour évaluer le besoin éventuel de nouvelles mesures. Il convient de noter que les études de modélisation ne sont nécessaires qu'en cas de présence d'un risque environnemental ou d'effets environnementaux significatifs attendus après la formation du panache turbide pendant les opérations.

S'il est nécessaire de faire des études de modélisation, les L.D. (2017) fournissent des indications pour la mise en œuvre de l'AMI composé de quatre modules (Figure 3) :

- un module hydrodynamique (H-M),
- un module pour l'estimation du terme source (ST-M),
- un module pour l'étude du transport des sédiments (T-M),
- un module d'évaluation de l'importance des effets, (EA-M) au moyen d'outils d'analyse et de synthèse des résultats.

Le module Figure 3, reformulé dans le cadre de Lisi *et al.* 2019 (a,b), montre également de manière schématique les informations et les données (modes environnementaux et opérationnels) nécessaires à la mise en œuvre de l'AMI et l'interaction constante entre les activités de modélisation et de suivi environnemental nécessaires dans les différentes phases de projet et de gestion des interventions pour fournir des indications sur l'ensemble des données à utiliser pour mettre en œuvre, calibrer, valider et vérifier les résultats de la modélisation (et donc la conformité environnementale des opérations de déplacement).

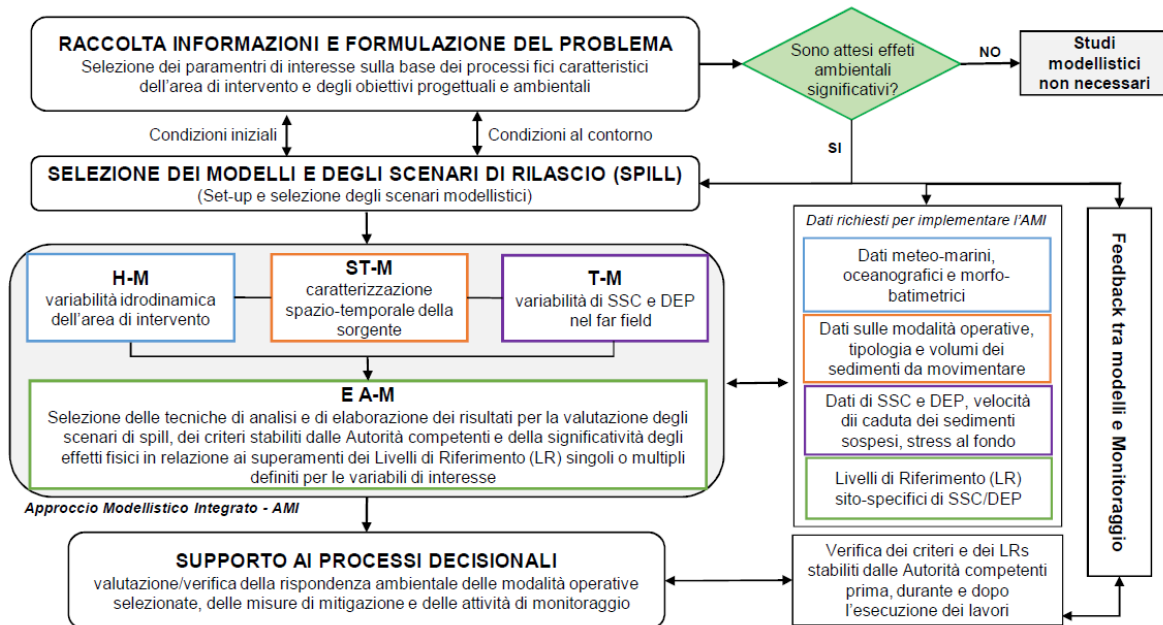


Figure 3: Schéma de l'approche du modèle intégré (AMI) et indication des informations et données environnementales et opérationnelles nécessaires, adapté par Lisi *et al.*, 2019 (a,b).

Enfin, le schéma de la Figure 4 montre le type de modèles de transition qui peuvent être utilisés dans les différents modules conceptuels de l'AMI (module hydrodynamique, module pour l'estimation du terme source et module de transport) et les résultats qui peuvent être obtenus en relation avec le contexte environnemental (zones côtières, bassins semi-fermés et zones offshore) et opérationnel (dragage, transport et déversement) de l'intervention. En particulier:

- le module hydrodynamique comprend des modèles de propagation des vagues et de circulation;
- le module d'estimation du terme source comprend des modèles (paramétriques et empiriques) différenciés en fonction des différentes phases opérationnelles de l'ensemble du cycle de dragage;

- le module de transport comprend des modèles pour l'étude des phénomènes de dispersion, de diffusion et de dépôt des sédiments qui alimentent le panache turbide dans le champ lointain.

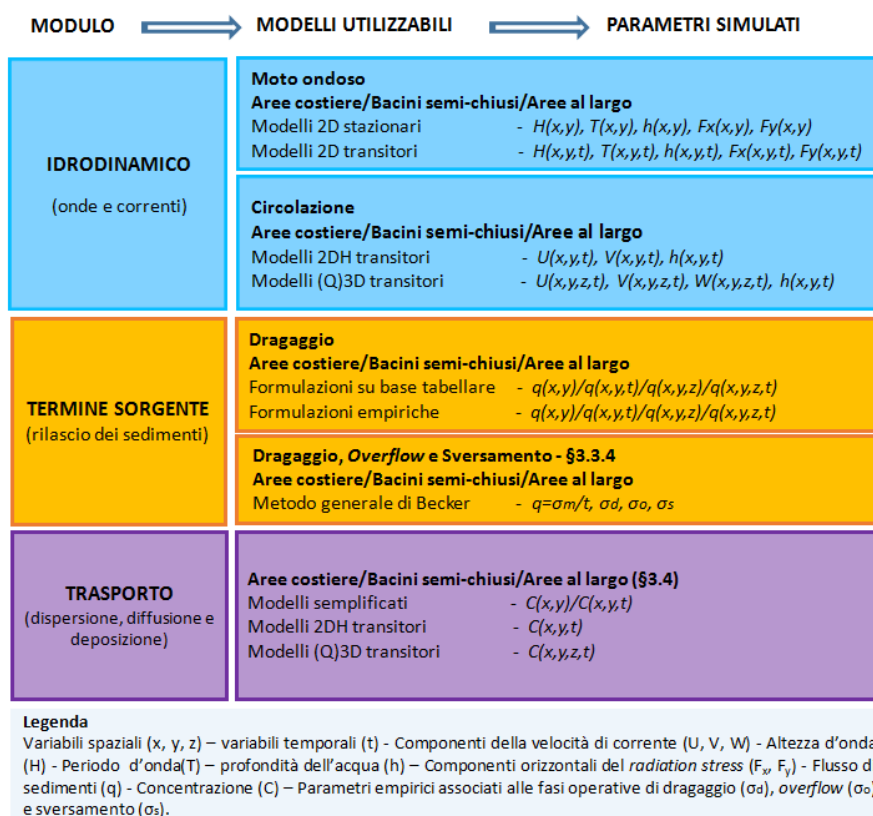


Figure 4: Type de modèles transitoires utilisables dans l'AMI et résultats qu'il est possible d'obtenir.
 Extrait de Lisi *et al.*, 2017 (modifié).

2.2 Le module hydrodynamique

Le module hydrodynamique est fonctionnel pour l'évaluation des paramètres météo-marins et hydrodynamiques (vagues, niveaux, courants, etc.) qui affectent le transport et le dépôt des sédiments remis en suspension. Pour la simulation de l'hydrodynamique, il est nécessaire de prendre en considération les forces présentes dans le domaine de calcul, et dans la zone entourant la zone d'intérêt, qui caractérisent typiquement les zones côtières généralement avec des profondeurs limitées ne dépassant pas 15 mètres⁵ (Lisi *et al.*, 2017).

Les facteurs qui affectent le plus la dynamique de la circulation dans le domaine du calcul, et par conséquent le transport des sédiments, sont les suivants:

- vent local;
- mouvement des vagues;
- oscillation de la marée;

⁵ Il est précisé que pour l'identification des zones côtières, il faut se référer à la profondeur locale plutôt qu'à la distance de la côte du site. En effet, sur la base de la pente locale du fond marin, deux sites situés à la même distance de la côte pourraient être considérés comme appartenant à des zones côtières ou non côtières et être caractérisés par des forces hydrodynamiques différentes.

- éventuels apports fluviaux et déchargements significatifs.

Les forces qui affectent la zone entourant la zone d'intérêt, qui sont considérées comme des forces à grande échelle par rapport au domaine considéré, sont généralement:

- les courants à grande échelle (par exemple, les courants côtiers ou de gradient qui interagissent avec l'embouchure d'un bassin semi-fermé);
- les courants et mouvements induits par les marées à l'échelle du bassin (par exemple, les seiches) si la zone d'intérêt en représente une partie.

En ce qui concerne le potentiel des modèles hydrodynamiques par rapport aux forces apparentées, on peut observer que:

- par rapport à l'action du vent: ils sont généralement capables de reproduire la génération de courants de surface induits, mais l'évaluation du champ de vent (compte tenu de la complexité du phénomène) doit être définie à l'aide d'autres outils de modélisation dans le cadre de la définition de scénarios de simulation (par exemple, les résultats de l'analyse statistique des mesures de terrain ou des données reconstituées à l'aide de modèles météorologiques numériques intégrés aux mesures satellitaires, par exemple CMEMS, CFSR, ECMWF);
- par rapport à l'action du mouvement des vagues: certains modèles hydrodynamiques résolvent directement la propagation des vagues, tandis que d'autres considèrent la composante vague comme une force externe, qui, de manière similaire à l'action du vent, représente un terme (un élément de force) des équations résolues par le modèle numérique;
- en relation avec la présence de bouches (ou de rejets importants): ils sont capables de reproduire les phénomènes d'interaction onde-courant (dans ces cas, il est important de fournir en entrée du modèle le champ de courant à l'embouchure/lieu du rejet).

Plus précisément, le modèle hydrodynamique doit être choisi en fonction des caractéristiques de la zone examinée et du détail requis pour les résultats attendus, afin de:

- évaluer l'influence d'un processus physique donné dans la production du champ hydrodynamique;
- prendre en compte les processus physiques liés à l'interaction de l'hydrodynamique avec tous les contours (par exemple le fond et toute la côte) ainsi qu'avec tous les éléments situés dans le domaine de calcul (par exemple les ouvrages de défense côtière, les structures morphologiques, les bancs de sable ou les dépôts alluvionnaires dans les zones d'embouchure).

Dans les bassins portuaires semi-fermés, la dynamique de la circulation est principalement associée à la combinaison du vent local et de l'oscillation des marées (cette dernière généralement dans une moindre mesure) en fonction de l'étendue du bassin⁶ (par ex. *Lisi et al.* 2009b; *Jouon et al.*, 2006).

Si les bassins portuaires sont de petite taille et caractérisés par des profondeurs supérieures à 5 mètres (c'est le cas dans la plupart des ports), l'effet du mouvement des vagues sur la

⁶ En général, dans les cas où la dimension verticale du domaine est beaucoup plus petite que la dimension horizontale (par exemple dans les environnements de transition, tels que les zones lagunaires et lacustres, caractérisées par des profondeurs de l'ordre du mètre), l'utilisation de modèles 2DH est particulièrement adaptée (cf. L.D. ISPRA, *Lisi et al.*, 2017).

circulation est généralement secondaire. En outre, pour les bassins portuaires de grande profondeur, la circulation présente des caractéristiques typiquement tridimensionnelles qui devraient être adéquatement représentées dans les modèles numériques (Lisi *et al.*, 2017).

Toutefois, il est toujours nécessaire de prêter attention aux cas où il peut y avoir des variations importantes des profils de courant le long de la verticale, comme les environnements caractérisés par d'importants processus de stratification (par exemple, les embouchures de fleuves, les zones où il y a une action importante du vent en surface).

Sur la base de ce qui précède, et en fonction des formules résolues par les modèles, certains modèles s'avèrent plus adaptés que d'autres à l'étude de certains phénomènes physiques, et d'autres à des applications à grande échelle plutôt qu'à des applications détaillées.

Dans le Tableau 1, on trouve les indications d'utilisation les plus appropriées pour les types de modèles les plus largement utilisés aux fins du présent manuel:

- des modèles tridimensionnels et stratifiés, qui considèrent le flux dans sa tridimensionnalité et sont donc capables de simuler des stratifications;
- Des modèles 2DH qui, en revanche, prennent une moyenne sur la verticale et fournissent une représentation du champ de courant bidimensionnel sur l'horizontale.

Tableau 1 : Applicabilité des modèles pour les principaux objectifs d'intérêt des opérations de déplacement. Légende : ++ : application recommandée (notamment en relation au calcul et à la qualité des résultats nécessaires) ; + : application possible ; ◯ : les résultats sont partiellement affectés par la formulation du modèle ; - : application non recommandée, les résultats sont fortement affectés par la formulation du modèle. Extrait de Lisi *et al.*, 2017 (modifié).

CAS D'ÉTUDE	TYPE DE MODÈLE	
	Modèle 3D, Q3D, à couches	Modèle 2DH
Libération de sédiments par dragage à des profondeurs limitées par rapport à la taille de la drague	+	++
Libération de sédiments par dragage à des profondeurs importantes par rapport à la taille de la drague	++	-
Rejet de sédiments par dragage de ports situés à proximité des embouchures des fleuves et présentant des rejets importants	++	-
Influence significative du vent dans les bassins semi-fermés	++	+
Influence significative des vagues et marées dans les bassins semi-fermés	+	++

2.2.1 Définition du domaine de calcul

Le bon réglage de la résolution du domaine de calcul est la base d'un bon niveau de fiabilité des résultats. Dans les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), des indications sont apportées pour définir la résolution spatiale à adopter en fonction de la taille du domaine de calcul, de la complexité de la bathymétrie et de la durée prévue de la simulation (et donc de la part de stockage des données). Dans la simulation de la dispersion des sédiments, la dimension

spatiale du domaine de calcul est généralement de l'ordre du kilomètre et la dimension temporelle de l'ordre de la semaine⁷.

Il est possible de construire une grille découpée à partir de la bathymétrie qui nous intéresse. Il est ainsi possible d'optimiser la conception de la grille en termes de précision et de réduction du temps de calcul. Naturellement, il faudra réduire ou agrandir la grille si la durée de la simulation est longue (amincissement) ou en cas de régions à forts gradients bathymétriques (épaississement).

Une fois la grille de calcul (maillage) définie, les données bathymétriques à associer aux différents éléments de celle-ci peuvent être définies à partir de toutes les bases de données bathymétriques disponibles (voir par. 2.2.3.1), généralement à haute résolution dans la zone la plus proche de la côte ou des structures qui définissent le bassin semi-fermé et à résolution plus grossière en s'en éloignant, en interpolant les données sur les nœuds de calcul de la grille. Dans de nombreuses applications, en fonction également du "résolveur" utilisé, il sera nécessaire de procéder à une phase de "réglage" de la bathymétrie. Cette opération, nécessaire à la précision de la simulation, doit être effectuée de manière à ne pas altérer les caractéristiques morphologiques dans le domaine du calcul.

Selon l'objectif et le niveau de détail des études, tous les travaux présents dans le domaine peuvent être insérés par le biais de formulations paramétriques qui varient d'un modèle à l'autre. Si la grille de calcul a une résolution suffisante, certains ouvrages pourraient également être insérés après avoir apporté les modifications bathymétriques appropriées.

Le domaine de calcul doit inclure les zones sujettes à d'éventuels risques environnementaux et couvrir une zone suffisamment large pour éviter les effets de bord dus à l'imposition de conditions limites se produisant éventuellement à proximité de la zone d'intervention. L'ensemble du domaine doit être discrétisé avec une résolution adéquate pour reproduire la complexité des flux de courant et les différents processus physiques affectant la dynamique du panache turbide (processus de dispersion, de diffusion et de sédimentation) depuis le site de déplacement vers le champ lointain (Bridges et al., 2008). Une analyse de sensibilité est également souhaitable pour évaluer si la discrétisation choisie pour le domaine de calcul est adéquate pour représenter les phénomènes en jeu. Le domaine de calcul doit également inclure toutes les contributions des flux fluides et solides (par exemple, les apports fluviaux dans les bassins ou les zones côtières, les rejets industriels dans les ports, etc.) considérées comme significatives par rapport aux dynamiques d'intérêt.

Dans le cas des corps hydriques stratifiés, il est nécessaire de prendre en compte les variations tridimensionnelles du champ de mouvement et leurs effets sur les processus de transport du panache turbide, en utilisant des modèles tridimensionnels (cf. Davies et al., 2002; Bai et al., 2003; Lumborg, 2005; De Marchis et al., 2014; DHI, 2017c). Dans ce cas, l'ensemble du domaine doit être discrétisé, avec une résolution appropriée, à la fois en termes planimétriques et dans le sens vertical.

⁷ Par conséquent, il est techniquement (et économiquement) impossible de résoudre le système d'équations des modèles les plus complexes (par exemple avec le DNS - *Direct Numerical Simulation*) qui, en résolvant directement le système d'équations non simplifié, ne conviennent pas pour simuler de manière extensive des cas réels, car ils nécessitent une très petite résolution spatiale et une étape d'intégration minimale (Lisi et al., 2017).

2.2.2 Définition des scénarios de modélisation

Pour que le système d'équations régissant le problème puisse être résolu numériquement, il est nécessaire de fournir les conditions initiales des variables considérées et les conditions entourant le domaine de calcul. Ces conditions ont pour effet de prendre en compte les actions de toutes les forces agissant à l'extérieur du domaine de calcul. Leur définition fait partie de la définition des scénarios de simulation. Pour discerner les effets attendus à court et à long terme, l'AMI, présenté dans les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) prévoit la mise en œuvre de différents types de scénarios:

- synthétiques-climatologiques: basé sur des forces statistiques qui synthétisent les conditions représentatives d'un ensemble de données (composé de données observées ou reconstruites) liées à un intervalle de temps spécifique;
- réalistes à court terme: visant à étudier uniquement les conditions spécifiques considérées comme défavorables, c'est-à-dire susceptibles d'induire des situations critiques (scénarios critiques), elles sont indiquées dans la phase préliminaire de modélisation;
- réaliste à long terme: indiqué dans les études de modélisation détaillées, le modèle est intégré pour de longues périodes, de manière à représenter la variabilité d'une année sur l'autre et, dans le cas de simulations pluriannuelles, la variabilité entre plusieurs années;
- prédictives: elles permettent d'intervenir rapidement sur les modes opératoires choisis afin d'éviter les risques liés à des conditions environnementales jugées défavorables (par exemple, adoption en temps utile de mesures technico-opérationnelles ou interruption des opérations de déplacement) et d'optimiser les activités de suivi prévues pour maîtriser les effets attendus.

L'analyse et la définition des scénarios, ainsi que les outils de modélisation à adopter, jouent un rôle essentiel dans la réalisation des objectifs de l'étude. À cette fin, il faut d'abord déterminer quelles phénoménologies physiques sont strictement nécessaires pour une représentation réaliste des conditions locales et lesquelles peuvent être considérées comme secondaires.

Ces considérations découlent notamment des aspects liés à:

- des caractéristiques locales (par exemple météo-marines, morpho-bathymétriques et hydrodynamiques) et la distance de la côte;
- des échelles spatio-temporelles (en fonction des phénomènes physiques caractérisant le site et des paramètres opérationnels et environnementaux de l'intervention).

Il est également nécessaire de prendre en considération le fait que:

- la composante de dispersion et de transport des sédiments liée au mouvement des vagues prend une plus grande importance proportionnellement à la proximité du littoral;
- la caractérisation de la composante hydrodynamique doit inclure des évaluations de la circulation générale à grande échelle, à moins qu'il n'y ait une déconnexion entre la circulation en mer et à petite échelle et les zones à l'intérieur du bassin portuaire, ce qui doit toutefois être vérifié et justifié de manière adéquate.

En tout état de cause, la sélection des processus physiques considérés comme significatifs dans la définition des scénarios doit toujours être étayée par des preuves analytiques justifiant

leur choix. En général, l'augmentation du niveau de détail fourni par les modèles mathématiques augmente le degré d'adhésion à la réalité, mais elle doit être évaluée au cas par cas, notamment par rapport à l'identification de tout risque environnemental dans les phases préliminaires de reconnaissance et de modélisation, en recherchant le juste équilibre entre la capacité du modèle à adhérer à la réalité et les ressources nécessaires.

Dans ce qui suit, les méthodologies d'approche pour la définition des scénarios de modélisation de l'adoption possible dans l'AMI, regroupées dans les quatre typologies générales ci-dessus, sont définies en fonction des différents objectifs des études (Tableau 2).

Tableau 2: Schéma de comparaison des principales caractéristiques des approches de modélisation décrites (d'après Lisi et al., 2017)

APPROCHE DE MODÉLISATION	OBJECTIF DE L'UTILISATION	LES CONDITIONS ET LES LIMITES D'APPLICATION	DONNÉES REQUISES
Climatologique	Des scénarios spécifiques représentatifs des conditions à analyser plus en détail, par exemple : - des conditions statistiquement plus récurrentes ; - les conditions saisonnières ; - conditions extrêmes (par exemple, tempêtes, apports intenses des fleuves) ; - des conditions climatiques non extrêmes, mais néanmoins défavorables (par exemple, en cas de forces impliquant des courants à la sortie des ports ou vers des récepteurs sensibles).	Il ne reproduit pas fidèlement les effets dus à l'interaction entre les forces, car chacune d'entre elles est sélectionnée sur la base de caractéristiques statistiques et non en fonction de leur simultanéité réelle. Il ne permet pas de calibrer/valider le modèle avec des données de terrain. Il peut être utilisé principalement dans la phase de modélisation préliminaire et éventuellement dans la phase de détail pour une analyse spécifique approfondie	Statistiques pour : - les forces atmosphériques ; - les forces hydrodynamiques
Scénarios réalistes	Scénarios représentatifs de: - conditions statistiquement plus récurrentes ; - conditions saisonnières ; - conditions extrêmes (par exemple, tempêtes, apports intenses des fleuves) ; - conditions climatiques non extrêmes, mais néanmoins défavorables (par exemple, en créant des courants à la sortie des ports ou vers des récepteurs sensibles). Par rapport au scénario climatologique, il permet une reproduction plus réaliste de l'interaction entre les différentes forces physiques, sur la base de données réelles. De plus, il permet de faire correspondre les résultats de la modélisation avec les données de terrain.	Il n'est pas toujours possible de trouver des données réalistes correspondant à des situations d'intérêt particulier (par exemple, des événements extrêmes avec des délais de retour particuliers). Indiqué dans la phase de modélisation préliminaire pour des évaluations globales rapides et dans la modélisation détaillée pour des analyses spécifiques approfondies	Données observées ou reconstituées à l'aide de bases de données modèles
Réaliste à long terme	Il reproduit des situations réalistes sur de longues périodes, de manière à représenter la variabilité d'une année sur l'autre, et dans le cas de simulations pluriannuelles, sur plusieurs années. Il permet de reproduire la variabilité physique complète des processus hydrodynamiques et de procéder à une analyse statistique des résultats, par exemple - le moment et la fréquence du dépassement de certains niveaux de référence pour les variables d'intérêt ; - les intensités maximales atteintes par les variables sur une période représentative ; - l'évolution spatio-temporelle des variables simulées, fournissant des informations utiles sur les périodes plus ou moins indiquées au cours de l'année pour les activités de dragage.	Il est nécessaire de vérifier que les forces correspondant à la période choisie sont représentatives de la variabilité climatique du site, tant en termes de conditions moyennes que de conditions extrêmes. Indiqué dans le cadre d'études détaillées.	Données observées ou reconstituées à l'aide de bases de données modèles
Prévisions opérationnelles	Prévision en cours d'opération des conditions météorologiques, hydrodynamiques et de transport afin d'intervenir rapidement en cas de conditions environnementales considérées comme particulièrement défavorables par rapport aux modes de fonctionnement sélectionnés et ainsi établir si et quand il convient d'adopter des mesures opérationnelles afin d'éviter les risques mis en évidence lors de la phase de projet	L'adoption de cette approche nécessite une planification adéquate des activités de modélisation en cours afin de rendre les résultats utilisables dans un délai compatible avec la réalisation des opérations de manutention.	Données de prévision à partir de modèles à grande échelle

2.2.3 Définition et introduction des forces

2.2.3.1 Données bathymétriques

Comme mentionné ci-dessus, il est nécessaire de fournir aux modèles la valeur de la profondeur dans le domaine de calcul à chaque point de grille et il est essentiel que la résolution des données bathymétriques soit suffisamment représentative de la variabilité du fond en fonction de la résolution utilisée. Si le fond marin d'une certaine zone, par exemple au large, a un gradient spatial limité, des données bathymétriques à une résolution appropriée sont suffisantes pour représenter la variabilité naturelle du fond marin, quelle que soit la résolution de la grille utilisée.

Il est également utile d'avoir la conformation et la position de toutes les infrastructures (ports, ouvrages de défense, etc.) présentes. De telles structures, en fait, interagissent avec l'hydrodynamique et donc avec les processus de transport des sédiments en suspension (et des contaminants, s'ils sont présents) et doivent être insérées de manière adéquate dans le domaine de calcul.

Les données bathymétriques des zones d'intervention sont essentielles pour tous les types de modèles hydrodynamiques et de transport. Ces données peuvent être obtenues à partir de cartes nautiques, de relevés effectués précédemment (par exemple pour la gestion de la logistique portuaire et pour la construction de nouvelles structures), ou autres.

Si la bathymétrie ne décrit pas en détail l'étendue de la côte jusqu'au rivage, une ligne de côte détaillée peut être obtenue à partir d'orthophotos, d'images satellites ou de relevés sur le terrain. De cette façon, il est possible d'interpoler les données de profondeur de la bathymétrie la plus proche du littoral disponible (au moins -5 m dans le cas des mers et des lacs) et du rivage. Il est clair que cela doit être fait en utilisant les données bathymétriques les plus récentes et les relevés du littoral temporellement les plus proches les uns des autres.

La mise en œuvre d'études de modélisation à moyenne/grande échelle nécessite la disponibilité de jeux de données bathymétriques homogènes, capables d'assurer une large couverture spatiale (Tableau 3).

Pour l'application de modèles à petite échelle, utiles pour les études relevant du présent manuel, et lorsqu'il est nécessaire d'analyser avec précision les processus hydrodynamiques et les phénomènes de génération et de transport de sédiments en suspension, il faut disposer d'ensembles de données détaillés. Les instruments généralement utilisés pour la reconstruction de la bathymétrie sont les sondeurs mono ou multi-faisceaux et les données des scanners laser *LiDAR*.

2.2.3.2 Données sédimentologiques

Les caractéristiques granulométriques des sédiments de la zone d'intervention sont fondamentales dans la planification des opérations de manutention, car elles donnent des informations importantes sur l'environnement de dépôt et les paramètres sédimentologiques qui régissent la dynamique de la sédimentation. Les données acquises par la mise en place de pièges à sédiments (déposimètres) jouent également un rôle crucial dans l'étalonnage et la validation des modèles de transport lorsqu'il est nécessaire d'analyser avec précision les taux de dépôt de sédiments.

Comme indiqué dans les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), dans le but d'effectuer des études de modélisation pour étudier la dispersion de la fraction fine des sédiments en suspension, il est nécessaire d'effectuer des analyses granulométriques pour déterminer le diamètre moyen des

classes de taille qui, en fonction des caractéristiques du site (hydrodynamique et taux d'érodibilité), sont considérées comme susceptibles d'être transportées dans le champ lointain pendant les opérations de dragage (et ensuite par remise en suspension de l'élévation redéposée au fond) par l'action des courants locaux.

La définition de la courbe granulométrique représentative du sédiment qui sera déplacé est d'une importance considérable pour la détermination des diamètres moyens des particules et du pourcentage d'abondance de la fraction fine, $<63 \mu\text{m}$ (selon l'échelle de Wentworth) ou $<74 \mu\text{m}$ (selon l'USCS - Unified Soil Classification System), nécessaire à la modélisation du panache. Ces informations peuvent être obtenues à partir d'analyses granulométriques antérieures effectuées dans la zone d'intérêt ou, si possible, un échantillonnage ciblé peut également être fourni par un godet ou "box corer", si la profondeur de dragage est limitée, ou par carottage si une manipulation plus profonde des sédiments est prévue.

2.2.3.3 Données météorologiques, climatiques et hydrodynamiques

La caractérisation météo-marine peut être réalisée par la reconstruction historique de séries chronologiques marémotrices, anémométriques (intensité et direction du vent) et ondamétriques (hauteur significative des vagues, période de pointe et direction moyenne de propagation) à partir des données mesurées à proximité du site d'intérêt (stations marémotrices, anémomètres, bouées à vagues, etc.).

Les données ondamétriques peuvent également être utilisées comme référence à une certaine distance du site d'intérêt, si l'exposition aux tempêtes pour les différents secteurs directionnels peut être considérée comme similaire entre le site examiné et le site accueillant la bouée ondamétrique.

Il n'est pas toujours possible de se fier aux mesures du vent et des vagues en raison de la nature fragmentaire des séries chronologiques, des périodes de dysfonctionnement ou de maintenance des instruments, de l'absence ou de la non-représentativité de la zone examinée en raison de la distance par rapport au site d'intérêt, ou de la couverture d'un petit intervalle de temps insuffisant pour représenter les conditions climatiques de la zone (représentativité statistique des observations typiquement acceptables pour des périodes d'observation supérieures à 5-10 ans).

Afin de pallier le manque d'ensembles de données représentatives, une reconstruction historique des conditions météorologiques et maritimes est souvent utilisée par le biais de la modélisation mathématique. Cette approche, communément appelée « wind/wave hindcast », permet d'obtenir des séries chronologiques (intensité et direction du vent; hauteur, période et direction des vagues) sur un point précis. Si ce type de données est utilisé, il est important de souligner l'importance d'avoir des reconstructions de modèles robustes, précises et validées avec des observations *in situ* ou à distance.

Pour la caractérisation des niveaux, en particulier en ce qui concerne la composante météorologique de la marée, les mêmes problèmes que ceux mentionnés pour les données sur les vagues et le vent se posent, parfois en raison de la couverture spatiale limitée des marégraphes présents à proximité du site d'étude et/ou de la disponibilité de jeux de données excessivement fragmentés en raison de dysfonctionnements ou de la maintenance en cours. Dans ce cas également, l'absence de mesures sur le terrain peut être partiellement compensée par l'utilisation de modèles mathématiques. Il existe notamment de nombreux logiciels gratuits, accessibles au public et faciles à mettre en œuvre qui permettent de reconstituer des séries de marées astronomiques, passées et futures, en tout point du globe, à des fréquences inférieures parfois même à une heure. La qualité de ces produits est

désormais très élevée, et l'erreur commise est normalement bien inférieure à 10 % des données mesurées. Les logiciels actuellement disponibles fournissent, en plus de l'oscillation de la surface libre, également la vitesse de la marée barotrope, un paramètre qui est d'une grande importance pour une bonne intégration des modèles hydrodynamiques à haute résolution.

Vous trouverez ci-dessous une revue des données disponibles utiles pour la modélisation des applications dans les zones portuaires, en vous référant aux L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) pour une description plus détaillée du type de données et d'outils disponibles.

- *Vagues*

Si l'influence du mouvement de la vague est considérée comme non négligeable, une estimation du champ de mouvement de la vague entrante aux abords du domaine de calcul doit être fournie. Les informations sur le champ du mouvement des vagues au large à un point donné sont généralement représentatives des conditions de la zone vaste. Compte tenu de la taille typique des applications considérées, cela signifie que l'information en un point au large peut être suffisante pour caractériser les conditions du large pour l'ensemble du domaine de calcul. En cas de proximité de la côte, et donc d'effets de blindage sensibles dus à la présence de structures portuaires (ou de promontoires, d'îles et d'autres infrastructures si elles sont présentes à proximité du champ d'intervention), il est nécessaire, à l'inverse, de caractériser le mouvement des vagues de manière plus détaillée, soit par un modèle mathématique qui part des conditions au large, soit par un système de mesure approprié.

Les paramètres de mouvement des vagues peuvent être mesurés par les radars côtiers (principalement les radars en bande X), les satellites (principalement les capteurs d'élévation et les capteurs SAR, mais aussi les diffusiomètres), les ADCP, les capteurs de pression ou les bouées ondamétriques. Les radars et les satellites peuvent produire des champs de mouvement des vagues sur de grandes zones marines. En particulier, les données radar sont caractérisées par une haute résolution spatiale et temporelle, tandis que les données satellitaires sont caractérisées par des résolutions plus faibles avec une plus grande couverture spatiale (bien qu'elles ne soient que peu fiables près des côtes). L'ADCP, les capteurs de pression et les bouées à vagues produisent des données précises et généralement suffisantes, surtout en haute mer, pour caractériser le mouvement des vagues dans une zone au large. Afin de représenter correctement le phénomène, les séries historiques doivent avoir une discrétisation temporelle n'excédant pas 6 heures.

- *Vent*

Le chiffre mentionné dans les modèles numériques est celui du vent à 10 m au-dessus du niveau de la mer. Comme dans le cas de la variabilité des données sur les vagues, les données sur le champ de vent peuvent être représentatives de grandes zones, bien que cela ne puisse pas être considéré comme valable s'il existe des caractéristiques morphologiques (par exemple la présence de promontoires) capables de modifier le champ de vent à l'échelle locale.

Contrairement au champ de vagues et de courants, le champ de vent n'est jamais résolu par le modèle hydrodynamique, il ne peut donc pas se limiter à fournir des conditions aux abords du domaine, car des valeurs d'intensité et de direction du vent dans tout le domaine de calcul sont nécessaires.

Les instruments qui peuvent être utilisés pour ces mesures sont les satellites (principalement les diffusiomètres radar, mais aussi les capteurs altimétriques et SAR), les radars (radar en bande X) et les anémomètres (de différents types).

Il faut garder à l'esprit que, bien qu'elles soient d'une importance primordiale pour les applications de modélisation dans les ports, les mesures du vent sur le corps hydrique sont rarement disponibles et que les modèles numériques pour la météorologie ont généralement tendance à sous-estimer l'intensité du champ de vent en mer, en particulier près des côtes.

- *Niveau de la mer*

La valeur du niveau de la mer est influencée par des forces astronomiques, les vents et les variations de la pression atmosphérique (cf. Pasquali et al., 2015). Dans les bassins fermés ou semi-fermés, des processus d'oscillation (seiches) peuvent également se produire avec des périodes et des effets similaires à ceux des marées astronomiques.

Le niveau de la mer est un paramètre sensiblement uniforme sur grande échelle. Il n'est donc généralement pas nécessaire, pour des zones de la taille typique de celles utilisées dans les études numériques concernant les processus de mouvement des sédiments, d'acquérir sa valeur de manière spatialisée.

Pour les zones pouvant être assimilées à des bassins semi-fermés, si le domaine de calcul inclut l'ensemble du bassin, il est important que les données relatives au niveau de la mer proviennent d'un point de mesure suffisamment représentatif du niveau présent à proximité des bouches de communication du bassin avec la haute mer. Si le domaine de calcul ne représente qu'une partie du bassin lui-même, alors le point de mesure doit se trouver à l'intérieur du bassin et près des limites du domaine de calcul. La fréquence temporelle avec laquelle les données sont acquises doit être représentative de la variabilité du phénomène qui est à l'échelle diurne ou semi-diurne pour les marées, et de l'ordre de quelques heures pour les phénomènes de *storm surge* et de *set up* du mouvement des vagues, avec un ordre de grandeur conséquent de l'heure pour les intervalles temporels entre les mesures.

Les instruments qui peuvent être utilisés pour mesurer le niveau de la mer sont les satellites (capteurs altimétriques radar) et les marégraphes (il en existe de différents types, mécaniques, à ultrasons, radar, etc.).

- *Courants*

Les courants peuvent être induits par différentes forces (vent, vagues, marée, etc.) et être caractérisés par différentes mesures d'échelle. Selon la taille du domaine de calcul, certains types de courants peuvent être inclus comme des forces dans le processus de calcul, incluant la cause génératrice (par ex. le vent, les vagues) dans la formulation du modèle, tandis que d'autres devront être simulés comme forces externes (par ex. la circulation thermohaline au niveau du bassin, les marées, les seiches, etc.).

Dans le premier cas, il n'est pas nécessaire de disposer d'informations de terrain spécifiques concernant les données actuelles, car celles-ci seront calculées dans le modèle numérique à partir des données d'autres paramètres physiques. Dans le second cas, il est nécessaire de disposer des données actuelles produites par une mesure ou une simulation numérique spécifique.

Les outils qui peuvent être utilisés pour obtenir des mesures de la vitesse et de la direction du courant sont divers. Pour mesurer les courants de surface, on dispose de données satellitaires (principalement des capteurs d'altitude et des capteurs SAR, mais aussi des diffusiomètres) et de données provenant de radars côtiers (principalement en bande HF). Ces instruments présentent l'avantage de produire des informations pour une zone spatiale étendue, bien que limitée à la surface. Les profils de courant verticaux, en revanche, sont produits par d'autres instruments qui effectuent des mesures qui ont tendance à être ponctuelles (elles peuvent être répétées en différents points pour obtenir des informations spatiales). Nous pouvons

notamment citer les ADCP (instruments qui exploitent l'effet Doppler), des dériveurs ARGO (qui exploitent le positionnement GPS), des courantomètres mécaniques équipés de bouées flottantes ou de sondes larguées dans l'eau par bateau. Plus précisément, les dériveurs ARGO sont utilisés pour acquérir des données en haute mer et ont l'avantage d'atteindre de grandes profondeurs, mais la production de données est inégale tant dans l'espace que dans le temps. L'utilisation de radars côtiers produit des champs avec une bonne fréquence temporelle et avec une couverture de zones marines suffisamment grandes, mais les mesures sont limitées aux couches superficielles de la colonne d'eau. L'information satellitaire produit des champs de courant de surface généralement plus grands que ceux produits par le radar, mais avec une résolution spatiale et temporelle plus faible. Enfin, les ADCP et les courantomètres mécaniques fixes produisent des données continues sur l'intensité et la direction du courant en un point (particulièrement adaptés à la mesure du courant à l'embouchure des rivières ou des rejets), tandis que, lorsqu'ils sont installés à bord des navires, ils peuvent produire des informations spatiales au détriment, toutefois, de la continuité temporelle.

En ce qui concerne les intervalles d'échantillonnage, les grands courants liés à la circulation thermohaline ont une variabilité qui peut également être représentée par des données mensuelles ou quotidiennes. Dans le cas où les données actuelles doivent également prendre en compte les effets liés à la présence de vent ou de vagues (parce qu'ils ne sont pas directement inclus dans la formulation du modèle), il est alors nécessaire que l'intervalle d'échantillonnage soit capable de représenter la variabilité de ces autres phénomènes (cf. chaque paragraphe pour la description).

2.2.3.4 Données océanographiques et hydrologiques

- *Température et salinité de l'eau*

L'acquisition de données de température et de salinité le long de la colonne d'eau est importante pour vérifier la présence éventuelle, même dans le cas de faibles profondeurs, de stratifications dues à des masses d'eau de densités différentes. Dans ces cas, il sera nécessaire d'utiliser un modèle 3D ou quasi 3D pour décrire également la densité variable le long de la colonne d'eau. Cela se fait en entrant les valeurs de température et de salinité dans le modèle, à la fois comme conditions initiales et limites. En général, ces valeurs peuvent être obtenues à partir de modèles océanographiques numériques, bien que pour des études détaillées, il soit important de prendre en compte les embouchures ou les rejets d'eau à différentes densités (par exemple en eau douce). La présence de corps hydriques ou de rejets dans le domaine du calcul peut en effet déterminer une variation locale importante de la salinité et de la température. Il faut donc les inclure dans les forces en termes de débit, de température et de salinité ou de différence de température et de salinité par rapport au corps récepteur.

Malheureusement, les produits des modèles numériques liés à la température et à la salinité sont souvent proches de la réalité en surface, car ils peuvent assimiler les données satellitaires, mais le long de la colonne d'eau, des divergences considérables peuvent se produire. Afin de remédier à cette limite, il est conseillé de disposer de mesures de la salinité et de la température le long de la verticale, qui peuvent représenter la situation dans le domaine de calcul (en général, cela revient à considérer les mesures effectuées dans la zone couverte par le domaine lui-même).

Les mesures de la température de surface sont produites avec un bon degré de précision par des capteurs satellitaires, tandis que le produit lié à la salinité, étant d'introduction plus récente, est moins précis. Le long de la colonne d'eau, il est nécessaire d'utiliser à la place des

instruments tels que les sondes multiparamètres CTD et ADCP, qui peuvent acquérir des mesures continues dans une position fixe ou, si elles sont équipées sur des bateaux, fournir des mesures en plusieurs points du domaine au détriment de la continuité temporelle.

Dans le cas des zones marines au large, la variation des paramètres de température et de salinité est très lente et les données mensuelles ou quotidiennes peuvent être suffisamment représentatives du phénomène (par exemple les dériveurs ARGO décrits ci-dessus pour les courants). Près de la côte, en revanche, ces variations, surtout en cas de présence de stratifications, peuvent présenter une plus grande variabilité en raison des processus de mélange déclenchés principalement par la présence du mouvement des vagues. En général, la stratification n'est envisagée que pour la création de la condition initiale avant le lancement du modèle. Les exceptions sont les modèles particulièrement avancés qui assimilent en cours d'exécution les données mesurées pour corriger ensuite les champs qu'ils produisent.

2.2.3.5 Turbidité et sédiments en suspension

Dans les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) il est généralement fait référence à la concentration de solides en suspension (SSC) comme un paramètre lié à la fraction en suspension et généralement utilisé par le modèle de transport.

Les mesures de turbidité et de concentration de solides en suspension dans la colonne d'eau ne sont pas des paramètres directement utilisés pour la mise en œuvre des modèles numériques, mais sont d'une importance primordiale pour la vérification des résultats de la modélisation et pour leur éventuel étalonnage ultérieur, afin d'assurer une plus grande conformité avec les données de terrain.

Le solide en suspension est composé d'une fraction organique et d'une fraction inorganique, qui peuvent être séparées par traitement thermique. Par définition, les solides totaux en suspension (TSS) représentent la matière présente en suspension dans un échantillon d'eau qui peut être séparée par des filtres ou des membranes de taille standardisée. Pour estimer la concentration du composant inorganique (ISS), les solides collectés sur le filtre sont séchés à une température de 103 - 105 °C jusqu'à poids constant.

Le paramètre TSS, qui nécessite la collecte et l'analyse d'échantillons d'eau et n'est donc pas facile à mesurer, est souvent remplacé par le paramètre plus général de turbidité. Différents types de sondes peuvent être utilisés pour la mesure de la turbidité, permettant l'acquisition de mesures (directes et indirectes) de la turbidité. Il s'agit par exemple de sondes basées sur des technologies optiques (par ex. OBS), acoustiques (par ex. ADCP) ou laser (par ex. LISST). À partir des mesures sur le terrain et des opérations d'étalonnage, on peut établir une corrélation entre les deux paramètres. Cette corrélation doit être mise à jour lors des activités de manipulation, car elle dépend fortement des caractéristiques du sédiment remis en suspension (diamètre des particules, composition, indice de réfraction, etc.).

Les valeurs de concentration des solides totaux en suspension peuvent également être quantifiées par d'autres techniques d'usage moins fréquent, comme par exemple les mesures de densité du mélange eau et sédiments (mais cette méthode n'est fonctionnelle qu'en présence de fortes concentrations de sédiments en suspension) et par lecture indirecte à partir de la détection des paramètres pH et OD (oxygène dissout) dont les valeurs sont altérées par la présence de solides en suspension.

Enfin, il est possible d'utiliser des instruments à distance (tels que les photos aériennes ou les données provenant de capteurs satellitaires multi-spectraux) pour obtenir une représentation de l'extension de la surface du panache turbide.

Tableau 3: Vue d'ensemble des sources de données topo-bathymétriques et météo-marines disponibles en libre accès. Extrait de Lisi *et al.*, 2017

TYPE DE DONNÉE	SOURCE DE LA DONNÉE	LINK/GESTIONNAIRE DE LA DONNÉE
Données topo-bathymétriques nationales	Cartographie IIM échelle : 1:25.000/1:50.000/1:100.000	Istituto Idrografico della Marina Militare (IIM)
	Cartographie IGM échelle : 1:25.000/1:50.000/1:100.000	Istituto Geografico Militare (IGM)
	Bathymétrie EMODNET	http://portal.emodnet-bathymetry.eu/help/help.html
	CTR régionales, échelle 1:100.000	
	Bathymétrie GEBCO	http://www.gebco.net
	Feuilles de la "Carte des éléments de dangerosité géologique des mers italiennes" à l'échelle 1:50000 du projet MaGIC	http://www.magicproject.it/index.php/it
	Données LiDAR	http://www.pcn.minambiente.it/geoportal/
	Images satellitaires SAR (Sentinel)	http://copernicus.eu/main/sentinels
Courants	CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/
Vagues	ECMWF	http://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets
	CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/
	KASSANDRA	http://www.ismar.cnr.it/kassandra
	RON	http://dati.isprambiente.it/dataset/ron-rete-ondametrica-nazionale/
	NOAA	http://www.noaa.gov/
Vent	ECMWF	http://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets
	Aeronautica Militare	http://www.meteoam.it/dati_in_tempo_reale
	RMN	http://dati.isprambiente.it/dataset/rmn-la-rete-mareografica-nazionale/
	RON	http://dati.isprambiente.it/dataset/ron-rete-ondametrica-nazionale/
Niveaux de la mer	KASSANDRA	http://www.ismar.cnr.it/kassandra
	CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/
	RMN	http://dati.isprambiente.it/dataset/rmn-la-rete-mareografica-nazionale/
Température et salinité	CMEMS	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/
	RMN	http://dati.isprambiente.it/dataset/rmn-la-rete-mareografica-nazionale/
Contraintes environnementales	SIN	http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/siti-contaminati/siti-di-interesse-nazionale-sin/
		http://www.bonifiche.minambiente.it/
	SIC, ZSC E ZPS	http://www.minambiente.it/pagina/sic-zsc-e-zps-italia/
	Zones protégées (parcs et zones marines protégés)	http://www.minambiente.it/pagina/aree-naturali-protette/ http://www.minambiente.it/pagina/aree-marine-protette/
	Zones archéologiques et architecturales historiques	http://www.beniculturali.it/mibac/opencms/MiBAC/sito-MiBAC/MenuPrincipale/LuoghiDellaCultura/Ricerca/index.htm !#/#

2.3 La modélisation des scénarios de libération pour les opérations de dragage

Les opérations de mise en mouvement des sédiments sont schématisées comme une source de libération/rejet. Le terme source, en particulier, dépend des méthodes techniques et opérationnelles utilisées, des caractéristiques hydrodynamiques et environnementales à proximité immédiate de l'engin de dragage (champ proche) et du volume et des caractéristiques des sédiments déplacés, telles que la densité, la distribution granulométrique,

le pourcentage de la fraction fine (cf. Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Becker *et al.*, 2015; Lisi *et al.*, 2016).

L'estimation du terme source lors des opérations de déplacement, et la caractérisation des différentes phases dans lesquelles il se développe (excavation, transport, déversement), a fait l'objet d'une attention particulière dans la littérature technique du secteur, notamment pour la phase d'excavation (cf. Nakai, 1978; Hayes, 1986; Collins, 1995; Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Palermo *et al.*, 2008; Becker *et al.*, 2015; Lisi *et al.*, 2017 e 2019b). Elle doit être entendue comme l'estimation de l'intensité du flux (q) de la masse de sédiments fins en suspension dans l'unité de temps (kg/s) entrant dans le domaine de calcul. La Figure 5 présente une schématisation illustrative des principales sources de libération des sédiments lors de la manipulation (excavation) des sédiments du fond avec les techniques de dragage hydraulique et mécanique classiques. La technique du nivellement, envisagée dans le cadre du projet, peut être représentée schématiquement comme l'excavation et le déplacement ou la redistribution ultérieurs des sédiments dragués du fond vers une zone adjacente sans que la tête de l'engin de dragage ne sorte de la colonne d'eau.

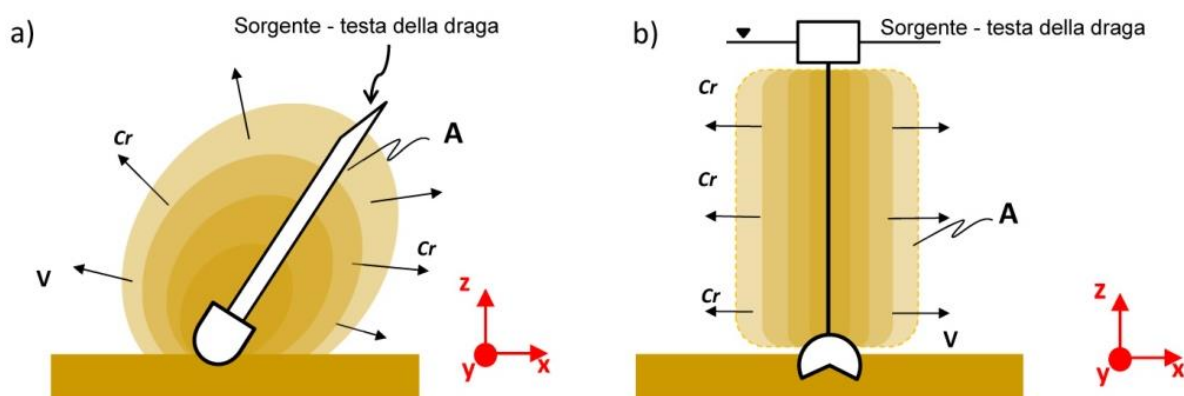


Figure 5 : Schéma conceptuel du phénomène de libération des sédiments pour : a) l'excavation avec drague hydraulique ; b) l'excavation avec drague mécanique ; les horizontaux (o,x,z) et (o,y,z) les verticaux. Extrait de Lisi *et al.*, 2017.

Comme illustré dans le détail dans les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), la quantité de sédiments réellement disponibles pour la dispersion à grande distance (voir Figure 1) est basée sur l'analyse des paramètres suivants (voir Figure 5) :

- la concentration (Cr , kg/m^3) des sédiments remis en suspension et/ou libérés à proximité de l'engin de dragage;
- la géométrie (forme et taille) de la source;
- la vitesse du courant (v , m/s) à proximité de la source;
- la vitesse à laquelle les sédiments tombent;
- le pourcentage de sédiments fins contenus dans l'ensemble des sédiments;
- la fraction de sédiment fin qui quitte la source, éventuellement décomposable dans les différentes phases où se développe l'action de mise en mouvement (excavation, transport, déversement).

Pour l'étude de la dynamique des panaches turbides à de grandes échelles spatiales et temporelles (donc pour les besoins des applications de modélisation proposées dans ce manuel, dans les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), l'utilisation de modèles dits en champ lointain

est suggérée (*far-field models*, Figure 1). Ces modèles fournissent une estimation des sédiments qui restent disponibles pour le transport en champ lointain (où la dynamique du panache est passive), mais ne fournissent pas l'estimation des sédiments libérés directement dans la zone de dragage (*dredging zone*) et ne modélisent pas la phase dynamique du panache turbide dans la zone de champ proche (*near-field zone*). À cet égard, dans Lisi et al. (2016, 2017 et 2019a,b) on donne un aperçu des principales formulations disponibles, divisées, en fonction de l'approche utilisée pour déduire les formules, en formules paramétriques (utilisables sous forme de tableaux) et en formules empiriques (basées sur l'utilisation de groupes adimensionnels).

Il convient de préciser que le terme source est difficile à modéliser, d'une part en raison de l'intime corrélation avec le champ proche et, d'autre part, parce que, lors de la phase de planification préliminaire des interventions, on ne dispose parfois pas de certaines informations sur le volume total de sédiments à déplacer ainsi que sur les paramètres (géométriques et cinématiques) représentatifs des modes opératoires utilisés⁸.

Afin de limiter les incertitudes liées à la définition du terme source, en reprenant les concepts décrits dans Becker et al. (2015), les L.D. ISPRA (Lisi et al., 2017) proposent une méthodologie qui s'articule autour des étapes suivantes:

1. Analyse des méthodes de travail, dont dépendent la typologie du terme source et le calendrier des opérations de traitement ;
2. Quantification du volume total de sédiments fins (V_{sed}) effectivement disponibles pour le transport dans le champ lointain ;
3. Fractionnement du terme source (c'est-à-dire distribution du volume total de sédiments fins disponibles, V_{sed}) dans l'ensemble du cycle de dragage (phases opérationnelles de : excavation, débordement possible pendant le chargement ; et déversement).



extrait de Lisi et al. (2018)

Pour une définition correcte du terme source, il est toutefois conseillé de le partager avec l'entreprise de dragage, afin de disposer d'informations plus précises et plus complètes sur les méthodes techniques et opérationnelles spécifiques à prendre en considération pour la modélisation du terme source.

⁸ Par conséquent, il est habituel d'estimer l'intensité, la durée et le lieu de la libération des sédiments en utilisant des méthodes empiriques faisant appel à des mesures de terrain, fruit d'interventions similaires.

2.3.1 Analyse des modes opératoires de dragage

L'analyse des modes de fonctionnement est une condition préalable à la définition du terme source. Les différentes phases de fonctionnement d'un cycle de dragage complet (excavation, chargement/transport avec débordement éventuel, et déversement) peuvent, en fait, être considérées comme des sources de remises en suspension « fractionnées et/ou multiples » jusqu'à la fin des opérations de déplacement (cf. Becker *et al.*, 2015; Lisi *et al.* 2017; 2019b). Le terme source doit être caractérisé en termes de variation dans l'espace (le long de la verticale et dans le plan) et dans le temps selon les modes opératoires utilisés.

En ce qui concerne la caractérisation spatiale, les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) définissent:

- source ponctuelle : source de rejet occupant une petite surface par rapport au maillage du domaine de calcul;
- Source de type distribué: une source de diffusion qui occupe une zone d'extension non négligeable par rapport au maillage du domaine de calcul et qui, par conséquent, doit être schématisée en tenant compte de toute son extension.

En ce qui concerne la variation de la position de la source de libération/rejet (et par conséquent de sa durée) dans le temps, il est possible d'identifier les possibilités suivantes:

- source stationnaire (fixe dans le temps) : si la dimension de translation caractéristique de la source de remise en suspension/relâchement est inférieure au maillage du domaine de calcul, par exemple dans le cas d'activités de nivellement pour lesquelles l'excavation peut être considérée comme proche et simultanée au relâchement;
- source de type non stationnaire (variable temporelle): si la dimension de translation caractéristique de la source de remise en suspension/relâchement est comparable au maillage du domaine de calcul et si sa position peut également être décrite en fonction de sa variabilité dans le temps, par exemple dans le cas du dragage hydraulique avec une drague automotrice de type TSHD.ISPRA, Lisi *et al.*, 2017).

En termes de variations de l'intensité de la source dans le temps, les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) identifient, en fonction du type d'effets à évaluer, les possibilités suivantes:

- si la simulation a pour objectif d'évaluer les effets à long terme, et que par conséquent la durée des opérations est sensiblement plus courte que la durée de la simulation, l'intensité peut être considérée comme constante et de durée finie (égale à la durée des opérations);
- si la simulation a pour objectif d'évaluer les effets à court terme, c'est-à-dire si la durée des opérations est comparable à la durée de la simulation, selon les modes de fonctionnement utilisés, l'intensité de la source peut être considérée comme constante dans le temps (par exemple dans le cas du dragage mécanique pour lequel le relâchement le long de la couche de la colonne d'eau considérée est constant) ou variable dans le temps (par exemple, lors de la surcoupe et de la sous-coupe d'un dragage hydraulique avec un broyeur, ou pour les différentes phases d'excavation et de relâchement d'une opération de nivellement au cours desquelles une variation de l'intensité de la source peut se produire).

La même technique opérationnelle peut être schématisée de manière différente en fonction de l'objectif des simulations, c'est-à-dire la durée, le laps d'intégration temporelle et la discrétisation spatiale (tant planimétrique que verticale) du domaine de calcul. À titre d'exemple, un dragage mécanique peut être schématisé comme étant localisé, stationnaire, de durée finie et d'intensité constante si l'on veut évaluer les effets à long terme et à grande

échelle dans les zones au large. Le même type de technique opérationnelle, en revanche, peut être schématisé comme extension finie, non stationnaire, de durée finie et d'intensité variable (intermittente) si l'on veut évaluer les effets à court terme dans des bassins semi-fermés (par ex. Di Risio *et al.*, 2017).

Voici quelques considérations pratiques tirées des L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), fonctionnelles à la caractérisation adéquate du terme source dans l'AMI pour les principales techniques de dragage conventionnelles:

1. Selon les méthodes techniques utilisées (dragage hydraulique ou mécanique), pour l'estimation réaliste du flux de sédiments fins rejetés par la source (fractionnés), il est important de définir la durée moyenne de chaque phase du cycle de travail (excavation, débordement lors du chargement et déversement), identifiée comme une source importante de remise en suspension.
2. Les dragues mécaniques conventionnelles se caractérisent généralement par :
 - un cycle de dragage ouvert et discontinu;
 - une densité de sédiments déplacés proche de celle d'origine;
 - des niveaux de libération importants lors de l'excavation, en raison de l'action mécanique du grappin (ou du godet) sur le fond et lors de sa remontée à la surface;
 - débordement négligeable lors du chargement.

La libération en suspension de la fraction fine des sédiments est généralement considérée comme constante et homogène le long de la verticale. La définition des durées des différentes phases du cycle de travail considérées pour les dragues mécaniques (excavation et déversement) permet d'estimer l'intensité moyenne ($\text{kg/m}^3/\text{s}$) du terme source.

3. Les dragues hydrauliques conventionnelles se caractérisent généralement par:
 - un cycle de dragage fermé et continu (les matériaux sont enlevés sous forme de mélange d'eau et de sédiments et transportés directement dans le réservoir de la drague ou au site de destination par des pompes centrifuges);
 - une densité des sédiments déplacés inférieure à celle d'origine (le mélange d'eau et de sédiments est généralement constitué de 5 à 25 % pendant l'excavation et le transport, mais peut être augmenté, avec des mesures techniques appropriées, en fonction de la destination finale des sédiments);
 - des niveaux importants de rejets pendant la phase d'excavation, qui peuvent se produire près du fond, car une partie des sédiments s'échappe des pompes d'aspiration;
 - débordement important lors du chargement de la drague.

Le flux de sédiments libérés près de la section finale de la conduite d'aspiration pendant la phase d'excavation est généralement considéré comme constant⁹ et localisé près du fond, la taille de la zone de libération pouvant être obtenue en fonction de la taille des paramètres géométriques et cinématiques de la tête de la drague. Il faut tenir compte du fait que le débordement éventuel se produit lorsque la drague atteint sa capacité de charge maximale, et que pendant les cycles de dragage, il y a une alternance entre les périodes de pleine charge et de vidange de la coque.

⁹ En particulier dans le cas du dragage de sédiments homogènes (cf. Collins, 1995; Bridges *et al.*, 2008; Palermo *et al.*, 2008; Lisi *et al.*, 2015).

4. Conformément au principe de conservation de la masse, la quantité totale de sédiments fins présents dans le volume total à traiter et disponibles pour le transport en champ lointain doit être entièrement répartie (fractionnée) entre le terme source représentatif des phases d'excavation et/ou de débordement lors du chargement et/ou du déversement dans lequel l'ensemble du cycle de travail peut être décomposé, en fonction des techniques de dragage et du programme de travail¹⁰.

Les considérations pratiques rapportées aux points 1-4 peuvent également être appliquées dans le cas spécifique des opérations de déplacement des sédiments avec la technique de nivellement qui, dans le cadre du projet, a été conçue de manière schématique dans l'excavation et dans le déplacement/la redistribution ultérieurs des sédiments dragués du fond de la mer vers une zone adjacente (dans un rayon de 300 m), sans que la tête de l'engin de dragage ne sorte de la colonne d'eau. Plus précisément, dans le cas d'interventions de nivellement de ce type, la source de remise en suspension du sédiment peut être approximative en supposant que la phase d'excavation et la phase de libération/redistribution ont lieu simultanément (lorsque le temps pour atteindre l'endroit à proximité immédiate peut être considéré comme négligeable). Les niveaux de remise en suspension pour les deux phases dépendront des modes de fonctionnement utilisés.

2.3.2 Analyse des fractions sédimentaires disponibles pour le transport

Il est de pratique établie d'estimer le flux de sédiments rejetés par la source à partir de rapports fournissant le volume total de sédiments fins (en m³) disponibles pour le transport dans le champ lointain en fonction du volume total (en m³) et des caractéristiques (par exemple la densité et la distribution granulométrique) des sédiments à déplacer (cf. Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Becker *et al.*, 2015).

Pour l'application de l'AMI, les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), suggèrent que l'estimation du volume total de sédiments fins disponibles pour le transport soit faite, au moins dans un premier temps, en appliquant la méthode générale de Becker *et al.* (2015), largement utilisé dans Lisi *et al.* (2019b).

Afin de ne pas tenir compte de l'augmentation possible (autrement difficile à quantifier) résultant de l'action perturbatrice de la drague, l'estimation de la masse totale de sédiments fins (m_i , en kg de poids sec) potentiellement disponibles pour le transport dans le champ lointain peut être exprimée, en première approximation, par rapport au volume total de sédiments à déplacer¹¹ :

¹⁰ Conformément au principe de conservation de la masse, la fraction fine disponible pour le transport en champ lointain dans les différentes phases d'un cycle de dragage peut être soumise à des variations lorsque des expédients techniques sont utilisés (par exemple pour limiter la remise en suspension près de la tête de la drague et/ou le débordement pendant le chargement, pour limiter la quantité de sédiments fins transférés vers le site de déversement).

¹¹ Le rapport fait référence au pourcentage de sédiments fins présents dans le volume total de sédiments à déplacer dans des conditions non perturbées et ne tient pas compte de l'augmentation possible du pourcentage de sédiments fins résultant de l'action mécanique (perturbatrice) exercée par les engins de travail (notamment lors du dragage). Dans ce dernier cas, il est possible d'utiliser des formules empiriques qui visent à fournir directement l'intensité du terme source en fonction, entre autres, des caractéristiques du sédiment et de la technique de manipulation (voir Lisi *et al.*, 2016 et les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) pour une revue des formulations de la littérature disponible).

(eq. 1)

$$m_t = (1 - n) \rho_s V_{tot} f_{63\mu m}$$

où n est la porosité, ρ_s est la densité du grain, V_{tot} est le volume total de sédiment déplacé (dragué ou déplacé) et $f_{63\mu m}$ est la fraction de sédiment fin (inférieur au diamètre caractéristique de 63 μm).

On note cependant que seule une fraction de V_{tot} est effectivement libérée dans le champ lointain. Par conséquent, selon une approche totalement empirique, il est possible d'exprimer comme suit la masse totale de sédiments fins réellement (et non potentiellement) disponibles pour le transport en champ lointain:

$$m_{eq} = \sigma_{eq} m_t \quad (\text{eq. 2})$$

dans laquelle le coefficient σ_{eq} est un paramètre empirique associé à la technique de dragage et à la phase du cycle de travail considérée, à préciser en fonction des choix de projet. Le concept de facteur de remise en suspension est identifiable dans cette approche, même s'il se réfère à la masse de sédiments fins disponible (m_{eq} , au lieu de la masse totale de sédiments déplacés, m_t).

Comme déjà partiellement indiqué au paragraphe 2.3.1, l'estimation du flux de sédiments rejeté par la source peut être définie en identifiant la durée (Δt) de chaque phase du cycle de travail et en évaluant une valeur moyenne:

$$q = \frac{m_{eq}}{\Delta t} \quad (\text{eq. 3})$$

dans laquelle q est la fonction source relative à la phase de travail générique de durée (Δt) pour laquelle il existe une masse finale disponible égale à m_{eq} .

Par conséquent, l'identification des phases du cycle de travail pour lesquelles on peut supposer un rejet important de sédiments (dragage/excavation, débordement pendant le chargement/transport et déversement) est une étape cruciale de la méthode et doit présupposer l'analyse des méthodes de dragage utilisées (cf. par. 2.3.3).

Dans le cas des opérations de déplacement avec des dragues hydrauliques, le terme source est calculé en divisant la masse de sédiments fins disponibles pour le transport en champ lointain à différents points et moments représentatifs des phases opérationnelles: 1)excavation/traînement; 2) débordement pendant le chargement/transport; 3) déversement.

En particulier, grâce à des relations conceptuellement similaires à l'éq. 1, on calcule:

1) la fraction libérée lors du dragage (m_d):

$$m_d = \sigma_d m_t \quad (\text{eq. 4})$$

2) la fraction libérée par débordement lors du chargement (m_o)¹²:

$$m_o = \frac{t_2 - t_1}{t_2 - t_0} (1 - f_{sed})(1 - f_{trap}) m_h$$

¹²Dans l'équation (5), les instants temporels t_0 , t_1 et t_2 caractérisent les phases temporelles du cycle de travail, où : t_0 représente le début du cycle de dragage et le début du processus de chargement ; à l'instant t_1 , la drague atteint sa pleine capacité de chargement et le débordement commence et la quantité de sédiments à l'intérieur de la drague peut augmenter ; à l'instant t_2 , le processus de chargement et le débordement s'arrêtent.

(eq. 5)

où $m_h = (m_t - m_d)$ est la masse de sédiments fins transportés dans le puits de chargement de la drague (c'est-à-dire la masse totale moins la masse perdue pendant la phase de dragage), tandis que la fraction (m_o) des sédiments fins soumis au débordement est calculée sans les phénomènes de sédimentation (f_{sed}) et du piégeage (f_{trap}) des sédiments transportés dans le puits de chargement, qui se produisent entre t_0 et t_1 (sédimentation) et t_0 et t_2 (piégeage). En outre, une partie (m_{od}) de la fraction (m_o) des sédiments fins soumis au débordement atteint le fond dans le cadre d'un processus de panache dynamique (m_{od}):

$$m_{od} = (1 - \sigma_o)m_o \quad (\text{eq. 6})$$

et seul le reste sert à alimenter le panache passif (m_{op}) dans le champ lointain:

$$m_{op} = \sigma_o m_o \quad (\text{eq. 7})$$

3) la fraction de rejet lors de la phase de déversement, où la masse de sédiments fins $m_s = (m_h - m_o)$ est rejetée dans la colonne d'eau pendant la phase de déversement, déduction faite de la perte finale lors de la phase de chargement par débordement. Comme pour l'étape précédente, une partie de la fraction rejetée pendant la phase de déversement (m_s) atteint le fond dans un processus dynamique (m_{sd}):

$$m_{sd} = (1 - \sigma_s)m_s \quad (\text{eq. 8})$$

et seul le reste sert à alimenter le panache passif dans le champ lointain:

$$m_{sp} = \sigma_s m_s \quad (\text{eq. 9})$$

Dans le cas du déplacement avec des dragues mécaniques, le rejet dû au débordement est négligeable, c'est pourquoi le terme source peut être divisé en deux parties:

- 1) la fraction de la masse finale libérée lors du dragage/de l'excavation (m_d);
- 2) la fraction de la masse fine libérée lors du déversement (m_s).

La définition des durées des différentes phases qui génèrent un flux de sédiments au cours du cycle de travail considéré pour les dragues hydrauliques (dragage, débordement et déversement) et mécaniques (dragage et déversement) permet d'estimer l'intensité moyenne (kg/s) du terme source.

Enfin, on observe que la définition correcte des paramètres empiriques (σ_d , σ_o , σ_s) du terme source fractionné (eq. 4-9), coïncidant conceptuellement avec σ_{eq} de l'eq. 2, joue un rôle crucial dans l'application correcte de la méthode.

Ces paramètres peuvent être estimés à travers les formulations de la littérature introduites et décrites précédemment (cf. Nakai, 1978; Hayes, 1986; Collins, 1995; Hayes *et al.*, 2000; Hayes & Wu, 2001; Palermo *et al.*, 2008; Becker *et al.*, 2015). Cependant, la déduction de ces paramètres avec un bon niveau de fiabilité nécessite l'exécution de mesures ad hoc sur le terrain ou l'utilisation de modèles détaillés (voir par. 3.1.2 et 3.3).

Le Tableau 4 signale l'ordre de grandeur des paramètres σ (dragage: σ_d ; débordement: σ_o ; déversement: σ_s) pour les différentes phases opérationnelles, tiré de Becker *et al.* (2015).

Tableau 4 Intervalle de variation des paramètres empiriques associés aux différentes phases opérationnelles (dragage : σ_d ; débordement : σ_o ; déversement : σ_s). Tiré de Becker *et al.*, (2015) modifié par Lisi *et al.*, 2017

PHASE OPÉRATIONNELLE	VALEURS CARACTÉRISTIQUES
Dragage/excavation (σ_d)	0,00 – 0,03
Coefficient de sédimentation (f_{sed})	0,00 – 1,00
Coefficient de piégeage (f_{trap})	0,01 – 0,05
Tête draguante avec broyeur (σ_d)	0,01 – 0,05
Drague mécanique avec grapin ou godet (σ_d, σ_b)	0,00 – 0,04
Débordement (σ_o)	0,00 – 0,20
Déversement (dragage hydraulique, σ_s)	0,00 – 0,10
Déversement (dragage mécanique, σ_s)	0,00 – 0,05

Dans le cas des opérations de manutention avec la technique de nivellement qui implique la distribution de matériel d'une zone à une zone adjacente au fond marin, la source peut être estimée de manière schématique:

- 1) la fraction fine disponible pour le transport lors de l'excavation dans la zone de dragage (m_d);
- 2) la fraction fine disponible pour le transport lors du déversement dans la zone de libération (m_s).

Pour les opérations de nivellement, la caractérisation de la source en termes de variabilité dans le temps doit être effectuée en considérant si la distance de la zone d'excavation et de libération rend acceptable l'hypothèse de contemporanéité des deux phases.

Enfin, en ce qui concerne les valeurs des coefficients de déversement indiqués dans le Tableau 4, il est à noter qu'il n'existe pas de repères bibliographiques dérivant de l'acquisition de données en lien avec les opérations de nivellement. Par conséquent, il pourrait parfois être raisonnable et prudent de considérer les coefficients de déversement pour la phase d'excavation (σ_d) et pour le déversement (σ_s) avec une plage de variabilité plus élevée que celles indiquées dans le tableau 4 ci-dessus. Dans ces cas, le choix des coefficients de déversement doit être fait en fonction des modes opératoires et des caractéristiques granulométriques du sédiment à déplacer et doit être étayé par des analyses de sensibilité appropriées.

Les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) attirent également l'attention sur d'autres considérations pratiques:

- il est important de disposer, dans la phase de planification des interventions, d'informations fiables sur la quantité et le type de sédiments à déplacer (souvent disponibles uniquement par l'exécution d'enquêtes spécifiques);
- la taille des grains représentant la composante fine n'est pas définie de manière univoque et peut varier en fonction des données disponibles. En général, la limite utilisée pour distinguer la composante fine varie entre 63 μm (conformément à l'échelle de *Wentworth*) et 74 μm (conformément à l'*USCS - Unified Soil Classification System*);
- la vitesse de sédimentation est un paramètre important en ce qui concerne la dispersion potentielle des sédiments en suspension; il est donc conseillé de prendre en compte un nombre limité de fractions granulométriques des sédiments en spécifiant les vitesses de sédimentation correspondantes. Il faut garder à l'esprit que, contrairement à un modèle 3D, dans un modèle 2DH, la vitesse de sédimentation est souvent utilisée comme paramètre de calibrage et nécessite donc des analyses spécifiques pour permettre des

ajustements de valeur afin d'arriver à des estimations fiables des concentrations de SSC en champ lointain;

- il est nécessaire de se référer à la masse de sédiments secs (poids sec) pour réduire les erreurs possibles dues à la conversion entre les valeurs de concentration, de densité et de volume;
- les rapports utilisés (par exemple, Becker *et al.*, 2015) sont souvent basés sur l'hypothèse que la fraction de sédiments fins présents dans les sédiments à déplacer dans des conditions non perturbées (V_{situ}) est constante dans le temps, alors qu'en réalité la fraction de sédiments fins disponibles pour le transport en champ lointain peut varier en fonction des techniques utilisées pour le déplacement dans les différentes phases d'un cycle de travail et des caractéristiques sédimentologiques dans différentes sous-zones. En général, la fraction de sédiments fins peut augmenter pour la production de volume supplémentaire en raison de l'action mécanique des engins pendant les opérations (davantage pendant l'excavation en raison de l'action directe du broyeur de fond) ; au contraire, elle peut diminuer en raison de la formation d'agglomérats argileux des sédiments en suspension;
- si l'épaisseur des sédiments à enlever est inégale (cas fréquent), il faut les diviser en couches homogènes (c'est-à-dire ayant des caractéristiques sédimentologiques similaires) et estimer le volume de sédiments fins disponibles pour chaque couche, en additionnant/mélangeant tous les résultats obtenus;
- les rapports existants peuvent être utilisés pour estimer la quantité de sédiments appartenant à différentes classes granulométriques, en remplaçant la fraction $f_{63\mu\text{m}}$ (c'est-à-dire f_{fine}) par la fraction liée aux classes souhaitées. Pour la définition du nombre de classes de taille des particules, on peut se référer aux classifications de Shepard (1954) et Nota (1958);
- il est important que lors du chargement sur les dragues autochargeuses, le processus d'analyse soit basé sur le volume à déplacer, et non sur le volume des puits de chargement, car le niveau de compactage peut être sensiblement différent.

2.3.3 Fractionnement des sédiments fins disponibles en champ lointain

Comme mentionné ci-dessus, l'analyse des méthodes de travail (en termes physiques et en termes de durée) permet de fractionner le terme source entre les différentes phases des opérations de déplacement en fonction des techniques de dragage et du programme de travail. En particulier, pour chaque possible remise en suspension, il faut définir (cf. par. 2.3.2):

1. la fraction de la masse totale de sédiments fins disponible pour le transport en champ lointain
2. le flux de sédiments fins qui quitte la source dans le temps et l'espace.

Voici quelques considérations pratiques tirées des L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) :

- il existe des incertitudes inhérentes à l'estimation du terme source liées à son fractionnement; en particulier, l'utilisation de paramètres de formules déduites empiriquement peut conduire à des estimations susceptibles de présenter des inexactitudes d'environ un ordre de grandeur. Dans ce contexte, il est donc souhaitable de procéder à un suivi ultérieur de la vérification en cours d'opération (cf. chapitre 3, par. 3.1.2);
- Les heures de travail hebdomadaires (qui dépendent de la durée d'un cycle de travail) et la productivité des techniques utilisées (qui dépendent du volume de sédiments déplacés par

cycle de travail) peuvent affecter le nombre de cycles hebdomadaires; toutefois, ces aspects ne sont pas considérés comme critiques à un stade précoce du processus décisionnel si les informations fournies sur le volume total de sédiments sont correctes (Becker et al., 2015);

- en ce qui concerne la durée des phases opérationnelles de l'ensemble du cycle de traitement au cours desquelles le terme source peut être fractionné, il est important de noter que:
 - o une durée égale à la durée totale de la phase d'excavation doit être appliquée au terme source à la suite de la remise en suspension par action directe de la tête de la drague depuis le fond;
 - o au terme source reconductible au débordement pendant la phase de chargement, une durée égale à l'intervalle entre le moment où la drague atteint sa pleine capacité de charge (et où le débordement commence) et le moment où le processus de chargement (donc le débordement) est interrompu doit être appliquée. Il est suggéré que le terme source lié au débordement soit modélisé comme une valeur moyenne plutôt que comme une variable temporelle afin de garantir l'exactitude des résultats (Becker *et al.*, 2015). Voir également à cet égard les considérations mentionnées au par. 2.3.2 précédent.
- en général, il est souhaitable de mener des campagnes de surveillance dans la phase *ante operam* (voir par. 3.1.1) pour étayer l'hypothèse de la définition du terme source à des fins de modélisation et des campagnes de suivi continu en cours d'activité (voir par. 3.1.2) pour vérifier les hypothèses formulées et les résultats des prévisions obtenus. Les campagnes de surveillance spécifiques en cours sont une source précieuse pour enrichir les bases de données utilisées pour obtenir des formulations empiriques sur l'estimation du terme source et étendre leurs intervalles de validité (USACE, 2002; VBKO, 2003; Aarninkhof *et al.*, 2008; Van Koningsveld *et al.*, 2010, 2013; Lisi *et al.*, 2016; Di Risio *et al.*, 2017). Dans ce contexte, la prise de mesure dans les stations mobiles des bateaux est considérée comme une méthode valable pour la vérification du flux de sédiments quittant la source de rejet (ou la zone de dragage);
- Les mesures sur place de la densité et de la vitesse à proximité de la tête de dragage et des conduites d'aspiration, au cours de l'activité, permettent de vérifier et/ou de modifier (si nécessaire) les estimations obtenues sur la productivité (en kg/m³) exprimée en fonction de la durée et du nombre de cycles de dragage/travail nécessaires pour mener à bien les opérations de déplacement ;
- s'il est nécessaire de modéliser le terme source (fractionné) avec plus de détails, il est souhaitable, en plus de la vérification par des activités de suivi spécifiques, d'utiliser des modèles plus complexes qui permettent de prendre en compte la contribution des taux de sédimentation du mélange d'eau et de sédiments (et de modéliser le champ proche avec plus de détails (cf. Van Rhee, 2002; De Wit, 2010; De Wit *et al.*, 2014; Becker *et al.*, 2015);
- Sur la base des recommandations précédentes, une grande attention doit être accordée dans tous les cas où les formules d'estimation du terme source (fractionné) ne sont pas basées sur un large éventail d'expériences et/ou de mesures de terrain. En particulier, si les projets doivent être réalisés à proximité de zones à haute valeur environnementale/d'une sensibilité environnementale élevée, il est suggéré d'appliquer une approche de précaution en envisageant les scénarios les plus défavorables (Sunstein, 2003).

Voici un résumé des principaux paramètres numériques à prendre en compte pour l'estimation du flux de sédiments qui quittent la source (fractionnés) lors de l'exécution des opérations de déplacement avec les dragues mécaniques (Tableau 5) et hydrauliques (

Tableau 6).

Tableau 5 : Quelques paramètres à prendre en compte pour définir le terme de drague mécanique. Extrait de Lisi *et al.*, 2017

PHASE OPÉRATIONNELLE	PARAMÈTRES	SYMBOLE	UNITÉ DE MESURE
DRAGAGE	Volume total <i>in situ</i> à déplacer	V_{situ}	m ³
	Densité du sédiment sec	ρ_d	kg/m ³
	Pourcentage du sédiment fin	$f < 63\mu$	%
	Productivité	P_{situ}	m ³ /h
	Durée du dragage	T	Gg
	Nombre de dragues		
	Temps de chargement du chaland		min/drague
	Nombre de chalands complètement chargés	n_c	
	Volume par chaland complètement chargé		m ³ /chaland
	Volume total de sédiment fin déplacé	V_t	m ³
	Pourcentage de sédiments fins relâchés par le godet (grapin)	σ_b	%
	Masse de sédiments fins pour le transport en champ lointain	m_b	Kg
	Flux de sédiments abandonnant la source en phase d'excavation	q_{dp}	kg/s
DÉVERSEMENT	Masse de sédiments fins dans le chaland complètement chargé	m_h	Kg
	Pourcentage de sédiments fins relâchés par le godet (grapin)	σ_s	%
	Masse de sédiments fins pour le transport en champ lointain	m_{sp}	kg/chaland
	Masse de sédiments fins non disponibles pour le transport en champ lointain	m_{sd}	kg/chaland
	Flux de sédiments abandonnant la source en phase de déversement	q_{sp}	kg/s

Tableau 6 : Quelques paramètres à prendre en compte pour définir le terme de drague hydraulique. Extrait de Lisi *et al.*, 2017

PHASE OPÉRATIONNELLE	PARAMÈTRES	SYMBOLE	UNITÉ DE MESURE
DRAGAGE	Volume total <i>in situ</i> à déplacer	V_{situ}	m ³
	Densité du sédiment sec	ρ_d	kg/m ³
	Pourcentage du sédiment fin	$f < 63\mu$	%
	Productivité	P_{situ}	m ³ /h
	Durée du dragage	T	Gg
	Durée de l'ensemble du cycle de déplacement		Min
	Fraction de sédiments fins relâchés à proximité de la tête de la drague	σ_d	%
	Flux de sédiments abandonnant la source en phase d'excavation	q_{dp}	kg/s
DÉBORDEMENT	Temps de chargement		min/cycle
	Nombre de cycles de chargement	n_c	
	Durée de chaque chargement		min

	Volume total de sédiments fins chargés		m ³
	Productivité par cycle	P _c	m ³ /s
	Masse de sédiments fins pour le transport	m _t	kg
	Sédiments fins chargés dans le réservoir de la drague	m _h	kg/cycle
	Fraction de sédiments fins déposés dans le réservoir	f _{sett}	%
	Sédiments fins retenus dans le réservoir	m _r	kg/cycle
	Sédiments fins disponibles pour le débordement	m _o	kg/cycle
	Masse de sédiments fins pour le débordement	σ _o	%
	Durée du débordement		min/cycle
	Masse de sédiments fins pour le transport en champ lointain	m _{op}	kg/cycle
	Masse de sédiments fins non disponibles pour le transport en champ lointain	m _{od}	kg/cycle
	Flux de sédiments abandonnant la source en phase de débordement	Q _{op}	kg/s
DÉVERSEMENT	Fraction de sédiments fins pour le débordement	σ _s	%
	Masse de sédiments fins pour le transport en champ lointain	m _{sp}	kg/cycle
	Masse de sédiments fins non disponibles pour le transport en champ lointain	m _{sd}	kg/cycle
	Flux de sédiments abandonnant la source en phase de déversement	Q _{sp}	kg/s

2.4 La modélisation du transport des sédiments

Une modélisation adéquate des phénomènes de transport du panache turbide nécessite la définition de scénarios de modélisation (voir par. 2.2.2) et les facteurs environnementaux dans le domaine d'intérêt (cf. par. 2.2.3) afin de reproduire les caractéristiques hydrodynamiques et une définition appropriée du terme source (voir par. 2.3). À cela s'ajoute l'importance de la définition du taux de dépôt dans la mise en œuvre du modèle de transport.

Comme déjà mentionné, dans le cas des bassins semi-fermés (ou en tout cas dans des zones confinées), les phénomènes de transport sont liés aux activités de déplacement (définition du terme source) et à la circulation hydrodynamique induite principalement par les fluctuations locales des vents et des marées (cf. Bilgili *et al.*, 2005; Lumborg, 2005), généralement dans une moindre mesure et en fonction de la taille du bassin et de sa dynamique. L'importance de l'action du mouvement des vagues, qui tend généralement à jouer un rôle mineur, doit être évaluée par rapport à l'exposition et à la taille typiques des bassins confinés où se produisent des mouvements de sédiments (cf. Lisi *et al.*, 2017; 2019a, b). Dans ces cas, l'importance de la tridimensionnalité des phénomènes de transport doit être soigneusement évaluée (cf. Bai *et al.*, 2003; De Marchis *et al.*, 2014 ; Feola *et al.*, 2015).

L'AMI se prête à la simulation de multiples scénarios de mouvements à la variation des conditions météorologiques et climatiques et à la variation des choix technico-opérationnels. En général, il est important d'évaluer et de comparer l'influence des conditions environnementales (définies dans la sélection des scénarios de simulation) sur les processus de transport du panache turbide généré par le déplacement des sédiments:

1. disposer, dès le stade de la planification, d'un calendrier fiable des activités;
2. reproduire de multiples scénarios de simulation qui tiennent compte du caractère saisonnier des conditions environnementales et qui ont une durée suffisante pour

- évaluer la sédimentation de la plupart des sédiments remis en suspension en raison des activités de déplacement;
3. supposer une durée réaliste des scénarios de modélisation pour les opérations d'excavation et/ou de nivellement;
 4. considérer de manière appropriée la turbidité naturelle du site (à partir de la bibliographie ou d'enquêtes de terrain) pour comparer la variation de turbidité induite par les opérations de déplacement avec celle induite par d'autres causes naturelles (par exemple, apports fluviaux, poches d'eau en présence de nappes phréatiques, action du mouvement des vagues, etc.) et anthropiques (autres projets déjà réalisés, par ex.). Dans les cas où les données ne sont pas disponibles, il convient de modéliser, en utilisant des approches "scénario" (cf. Liu *et al.*, 2002), les conditions considérées comme représentatives sur la base d'une caractérisation préliminaire de la zone (par exemple, modélisation de scénarios de remise en suspension induite par des conditions extrêmes, des crues de rivière, etc.);
 5. considérer l'interférence de tout milieu, quelle que soit son activité actuelle (par exemple un bateau, une barge, un ponton) qui pourrait devenir une source de remise en suspension (Erm & Soomere, 2006) interagissant de manière plus ou moins cohérente avec le fond (par exemple remise en suspension par action de l'hélice, reptation à marée basse, aspiration par déplacement de volumes d'eau).

2.4.1 Application du terme source dans le domaine du calcul

L'évolution de la concentration des sédiments en suspension dans le champ lointain dépend du type de source (fixe/mobile et continue/variable dans le temps) et du flux de sédiments libérés à certains points du domaine de calcul et pour certains instants du scénario de simulation (cf. Shao *et al.* 2015, 2016; Di Risio *et al.*, 2017; Lisi *et al.* 2017; 2019a, b).

La quantité de sédiments fins disponibles en champ lointain introduite dans une cellule de la grille dans un laps de temps de calcul est égale au flux de sédiments (en kg/s) estimé pour cette cellule intégrée pendant la durée du laps de temps.

Les aspects à prendre en compte pour la bonne mise en œuvre du terme source et, par conséquent, les phénomènes de transport de sédiments rejetés/remis en suspension dans le champ lointain, comme détaillé dans les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) sont:

1. la taille des cellules de la grille de calcul, qui doit être choisie afin de caractériser adéquatement les processus de dispersion, de diffusion et de sédimentation d'un panache généré lors d'une opération de déplacement spécifique. En particulier, si les cellules de la grille sont trop grandes, un terme de diffusion numérique artificiel peut être généré, tandis que si elles sont trop petites, des zones avec des niveaux de concentration irréalistes pourraient être créées (en particulier pour les sources fixes et continues);
2. la durée du laps de temps de calcul, qui doit être soigneusement choisie pour éviter l'introduction de SSC irréalistes à certains moments et en certains points de la grille de calcul, qui peuvent affecter les niveaux de concentration simulés par le modèle: en utilisant un laps de temps dynamique (c'est-à-dire en faisant varier la durée du laps de temps pendant une simulation), il est possible d'augmenter la précision de la simulation;

3. le déplacement éventuel de la drague dans la zone de travail, qui doit être représenté avec une résolution spatiale appropriée (par exemple pour l'évaluation des effets à court terme dans les bassins semi-fermés);
4. le flux correct de sédiments en suspension doit être réparti sur les différentes cellules de la grille au prorata du temps de permanence du terme source (dûment fractionné) sur chaque cellule pendant un intervalle de temps donné; il est donc nécessaire de caractériser la source par la succession des coordonnées des positions sur les cellules occupées par la tête de dragage au fil du temps. Le temps de permanence de la tête de dragage sur la même zone dépend de la productivité horaire de la machine d'exploitation spécifique (par exemple, une drague mécanique d'une productivité de 2400 m³/jour met un peu plus d'une journée pour draguer une unité de surface moyenne de 2500 m² pour une épaisseur de dragage de 1 m);
5. dans l'application dans la grille de calcul du terme source, parmi les conditions limites imposées par le modèle, le choix de la taille minimale des éléments de la grille à proximité du terme source est fondamental, car il peut influencer la fiabilité des résultats du transport en champ lointain (les grandes mailles provoquent une "diffusion numérique immédiate" qui affecte le niveau de détail des étapes numériques suivantes).
6. Pour obtenir des résultats fiables, le terme source doit être appliqué lorsque le modèle hydrodynamique a atteint une solution stationnaire, à moins que le comportement transitoire dû à des champs hydrodynamiques environnementaux non stationnaires ne soit analysé;
7. les différents modes de libération le long de la verticale doivent être mis en œuvre de manière appropriée dans la définition du modèle de transport en fonction de la discrétisation verticale choisie (voir par. 2.2.1);
8. l'estimation de l'empreinte surfacique de la source permet l'estimation du flux de concentration en sédiments (par exemple, g/m³/s) à utiliser comme élément de force de l'équation de conservation des sédiments en suspension (voir par. 2.3).

2.5 Analyse et résumé des résultats

Comme mentionné dans les paragraphes précédents, l'AMI doit pouvoir soutenir le choix de modes de fonctionnement capables de limiter la dispersion de la fraction sédimentaire fine dans la colonne d'eau. Par conséquent, les résultats de la modélisation doivent être analysés et traités de manière à être fonctionnels pour l'évaluation de l'importance des effets environnementaux sur le milieu physique résultant des augmentations des SSC et des DEP. Ces évaluations sont préparatoires aux évaluations de la gravité des impacts, et aux analyses de risques plus spécifiques, qui doivent être effectuées lorsque la présence de récepteurs environnementaux sensibles est constatée.

Conformément à Feola et al. (2016) et Lisi et al. (2017 et 2019b), on reconnaît l'importance d'un retour synthétique des résultats de la modélisation, obtenus au moyen de techniques d'analyse et de synthèse standardisées et reproductibles, pour quantifier les effets environnementaux par une analyse combinée des dépassements, en termes d'intensité, de durée et de fréquence, de valeurs prédéterminées pour les variables environnementales d'intérêt (par exemple, intensité du courant, SSC, DEP, oxygène dissout) considérés comme

représentatifs de la variabilité des paramètres d'intérêt dans des conditions non perturbées (par exemple avant le début des opérations de manutention ou, ultérieurement, dans des zones non touchées par les travaux), conformément aux L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) définies ci-dessous comme aux niveaux de référence (ci-après « NR »).

2.5.1. Objectifs de l'analyse des scénarios d'hydrodynamique de transport

En général, la mise en œuvre de l'AMI peut servir à :

1. délimiter la zone d'influence;
2. évaluer l'importance des effets physiques résultant de la formation du panache turbide dans la zone d'influence ;
3. soutenir le choix des modes de fonctionnement;
4. évaluer les conditions critiques pour lesquelles il peut être nécessaire de prévoir des mesures d'atténuation appropriées;
5. obtenir des résultats fonctionnels à l'optimisation des activités de suivi.

Pour atteindre ces objectifs environnementaux et de projet, les résultats de la modélisation peuvent être présentés au moyen de graphiques et de cartes récapitulatives (cf. SKM, 2013; Feola *et al.*, 2016, Lisi *et al.*, 2017) qui signalent:

1. des situations instantanées et jugées critiques en termes de:
 - situations spécifiques de conditions météorologiques et climatiques (moyennes et/ou extrêmes);
 - quantification de l'intensité maximale du phénomène de dispersion sans évaluation de la durée ou de la fréquence;
 - quantification possible de la durée totale des événements dépassant les niveaux de référence sans évaluation de l'effet cumulé de plusieurs événements d'intensité et de durée différentes.
2. un résumé des résultats de multiples scénarios à long terme:
 - par l'élaboration combinée d'indices et d'indicateurs statistiques visant à représenter la complexité spatiale et temporelle des paramètres d'intérêt (par exemple, identification des zones caractérisées par une plus grande hydrodynamique et une plus grande variabilité de la SSC et de la DEP) et, si nécessaire, l'évaluation des effets en termes d'intensité, de temps de permanence et de fréquence des écarts par rapport aux niveaux de référence (NR) préétablis.

Pour soutenir l'évaluation du début des éventuels risques environnementaux et la quantification de l'importance des effets résultant de la formation du panache turbide, les NR (définis avant le début des activités ou, par la suite, dans les zones non touchées par les travaux) peuvent être différenciés en une succession de niveaux de danger environnemental croissant pour être fonctionnels à une caractérisation (spatiale et temporelle) des écarts observés pour les paramètres d'intérêt, et consécutifs à la formation du panache turbide pendant l'exécution du projet en question (cf. Sofonia & Unsworth, 2010; Feola *et al.*, 2016, Lisi *et al.*, 2017; 2019b).

Si les niveaux de référence ne peuvent être définis sur la base des informations de la littérature ou des données de suivi, il est souhaitable de procéder à une estimation prudente de ces valeurs lors de la phase préliminaire de modélisation, qui peut être révisée lors des phases ultérieures de projet et de modélisation, notamment sur la base de la nouvelle disponibilité des données de suivi (Lisi *et al.*, 2017).

Pour la transposition de la quantification de l'importance des effets physiques sur les récepteurs environnementaux identifiés comme sensibles aux éventuelles altérations induites sur l'écosystème marin par l'augmentation de la concentration de solides en suspension et des taux de dépôt, notamment en termes d'intensité, de durée et de fréquence, il est pertinent de connaître la nature des espèces et des habitats présents à proximité des sites d'intervention et de vérifier leur statut avant le début des opérations de déplacement (cf. Clarke & Wilber, 2000; Wilber & Clarke, 2001; Feola *et al.*, 2016; Fraser *et al.*, 2017; Jones *et al.*, 2016; Fisher *et al.*, 2017).

En particulier, sur la base des données propres au site et/ou de la littérature, et selon le jugement des experts, il est souhaitable que les différentes classes de gravité des impacts représentatifs de la zone d'étude soient définies en associant l'importance de la perturbation (dans le temps et dans l'espace) à toute valeur de tolérance estimée/disponible pour les récepteurs environnementaux sensibles présents. Les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) définissent comme récepteur sensible « toute espèce, population ou habitat qui peut être soumis à un effet (stress) suite à des modifications des paramètres d'intérêt (SSC, DEP, etc.) induites par les opérations de déplacement ». Veuillez consulter les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) pour plus de détails sur l'utilisation des études de modélisation pour soutenir l'emplacement des stations où effectuer le suivi fonctionnel afin d'établir/vérifier les valeurs des paramètres d'intérêt propres au site et l'évaluation des impacts possibles.

Pour plus de détails sur l'identification des niveaux de tolérance spécifiques aux sites pour les différents récepteurs écologiques, veuillez vous référer aux études sectorielles (cf. PIANC, 2010; Gilmour *et al.*, 2006).

2.5.2. Analyse et résumé des résultats pour les scénarios à long terme

Une analyse correcte de l'importance des effets sur le système physique et des impacts potentiels qui peuvent survenir en relation à la présence de récepteurs environnementaux à proximité de la zone d'intervention doit être effectuée par une analyse combinée de l'intensité, de la durée et de la fréquence des dépassements des NR spécifiques au site (cf. Sofonia & Unsworth, 2010; Feola *et al.*, 2016; Lisi *et al.*, 2017; 2019b). Dans Feola *et al.* (2016), des indications sont données sur les techniques de synthèse, facilement standardisées et reproductibles, pour l'étude des effets (pendant et à la fin des opérations de déplacement) dus à l'augmentation des niveaux de SSC et de DEP.

Pour la synthèse des résultats de la modélisation, il faut définir un nombre important de points de contrôle répartis de manière homogène dans le domaine de calcul, éventuellement situés à différentes profondeurs (que la zone d'intervention soit un bassin semi-fermé, une portion de côte ou une zone offshore), auxquels on peut extraire les séries chronologiques des paramètres hydrodynamiques et de transport obtenus à partir des simulations de modélisation. La distance entre les points est définie en fonction de la variabilité des résultats numériques pour la zone d'enquête spécifique, raisonnablement plus grande que la taille de la grille de calcul. Par exemple, toute variation bathymétrique localisée doit être reproduite dans la grille de calcul, car elle est importante d'un point de vue hydrodynamique, mais pas nécessairement représentée dans les cartes de synthèse produites selon une résolution spatiale supérieure. Pour chaque point de contrôle, les séries temporelles des paramètres d'intérêt (par exemple l'intensité du courant, SSC, DEP, etc.) obtenues à partir de simulations numériques sont connues, permettant une caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle des paramètres hydrodynamiques ainsi que des effets associés aux activités de déplacement des sédiments. Les séries chronologiques doivent être analysées de manière appropriée afin de produire des

indices statistiques liés à des fenêtres temporelles spécifiques dans le but de résumer les résultats.

À titre d'exemple, en ce qui concerne l'hydrodynamique, pour chaque point de contrôle, certains paramètres peuvent être estimés, tels que: la vitesse moyenne et maximale atteinte par le courant. En ce qui concerne les variations en termes d'augmentation de la turbidité induite par les activités, il est possible d'évaluer l'intensité moyenne et maximale du paramètre sur l'ensemble du domaine (respectivement SSC_{moyen} et SSC_{max}).

Afin de résumer les résultats obtenus, le paramètre choisi comme indicateur des effets du mouvement des sédiments peut être restitué sur des cartes qui peuvent être facilement reproduites pour chacun des scénarios envisagés. Si le paramètre choisi est hydrodynamique, il sera possible d'identifier pour chaque scénario, à la fois sur une base saisonnière et annuelle, des zones avec différents régimes d'écoulement actuels, ainsi que de représenter la variabilité spatiale de la dispersion des nuages turbides dans la colonne d'eau (SSC) et du dépôt de sédiments au fond (DEP).

Afin de tenir compte de l'effet combiné de la durée et de l'intensité, qui ne peut décrire de manière exhaustive l'importance des dépassements des niveaux de référence établis, nous reportons dans la Figure 6 un exemple de représentation des différents paramètres statistiques visant à synthétiser les variations spatiales et temporelles de la SSC à différentes profondeurs (par exemple au fond, en surface) et les dépôts (par exemple DEP_{max}) associés à la dynamique d'un panache turbide dans le cas d'une activité de dragage pour un scénario de simulation (dont la durée peut être considérée comme représentative de périodes agrégées, saisonnières ou d'une année entière).

Veillez consulter les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) pour une discussion détaillée sur la possibilité de corréler ces NR à des niveaux de tolérance spécifiques découlant de considérations biologiques et d'écologie des espèces, auxquels associer des classes d'impact caractérisées par des degrés croissants de gravité spécifique au site.

On trouve dans le Tableau 7, à titre d'exemple, des niveaux de référence indicatifs pour l'intensité (SSC_{NR}) et des intervalles de durée croissants, dont la combinaison permet d'associer des valeurs correspondantes d'une importance croissante de l'effet.

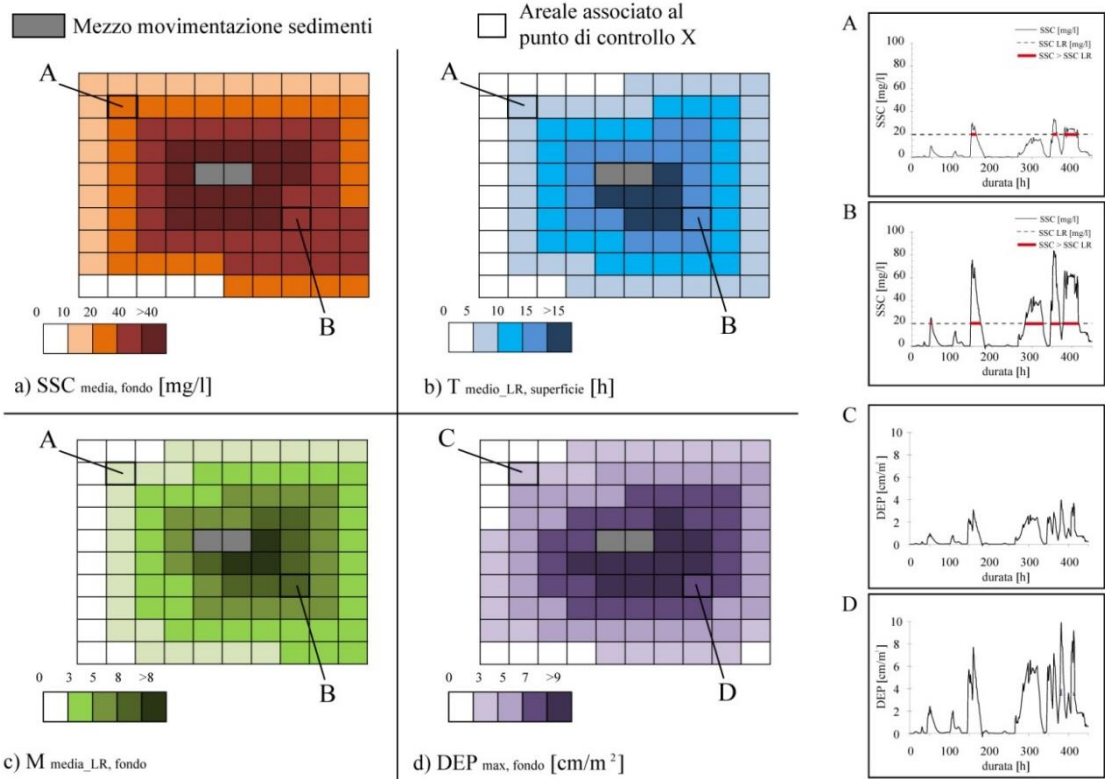


Figure 6- Exemple de carte des paramètres statistiques issus de l'analyse des séries temporelles extraites du modèle (en profondeur et pour différents scénarios) pour la représentation spatiale et temporelle du panache turbide simulé sur une année entière: a) SSC_{moyen} du fond pour le scénario N_i; b) Durée moyenne des dépassements, T_{moyen_NR} , à la surface pour les conditions printanières; c) Fréquence moyenne des dépassements, M_{moyen_NR} , au fond des scénarios répartis sur l'année entière; d) DEP_{max} au fond pour les mois d'été.

Tableau 7: Exemple de l'importance (0 - 5) des effets associés à l'augmentation de l'intensité des niveaux de référence NR de SSC (en mg/l) et à la persistance des dépassements (Lisi et al., 2017). Dans ce cas, il est possible d'établir la gravité de l'impact pour le récepteur sensible spécifique à partir de la définition de l'importance de l'effet.

		T_{max_NR} [h]						
		0-2	2-5	5-10	10-20	20-40	40-60	>60
SSC_{NR} [mg/l]	0 - 10	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	0	0	1	1	2	3	4
	20-50	0	1	2	2	3	4	5
	> 50	0	1	2	3	4	5	5

Dans l'exemple montré, la durée de la perturbation est considérée comme la persistance maximale ininterrompue des événements individuels au-dessus du SSC_{NR} spécifique (T_{max_NR}). La même évaluation peut être étendue à d'autres paires de paramètres (par exemple, SSC_{max_NR} , T_{medio_NR}) considérées comme significatives sur la base d'évaluations spécifiques au site et/ou au récepteur. Les critères de fréquence des événements doivent également être inclus dans l'attribution des valeurs d'importance (Wilber & Clarke, 2001).

Des cartes de synthèse sont produites pour chaque niveau de référence en termes d'intensité (par exemple, $SSC_{NR}= 10, 20, 50$ mg/l) en mémorisant pour chaque point de contrôle la valeur de l'importance de l'effet associé à la durée maximale de persistance ininterrompue de la concentration de solides en suspension au-dessus de la valeur spécifique. La superposition

des cartes permet d'obtenir la valeur maximale enregistrée pour chaque point de contrôle spécifique.

Aussi, le format "carte", en plus de renvoyer des informations moyennes dans le temps et l'espace par rapport aux échelles d'intérêt, rend les résultats de la modélisation utilisables et facilement superposables à d'autres informations environnementales (L.D. ISPRA, Lisi et al., 2017), comme la présence et l'étendue des récepteurs sensibles (par exemple, les habitats, les fermes mytilicoles, les herbiers marins, etc.).

3 L'INTERACTION ENTRE LA MODÉLISATION ET LE SUIVI

Les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017) font état comme exigence de base l'interaction mutuelle avec le suivi environnemental pour l'utilisation correcte des modèles mathématiques permettant de soutenir les études environnementales dans les différentes phases de conception et de gestion des interventions qui incluent la manipulation des sédiments.

En ligne avec ce qui a été mentionné dans *Central Dredging Association* (CEDA, 2015) et par l'*International Association of Dredging Companies* (IADC), par les conventions internationales en la matière (IMO London Convention 1972 et London Protocol 1996; UNEP- MAP Dumping Protocol 1995) et dans le respect des prescriptions du D.L. italien 152/2006, du D.M. 172/2016 et du D.M. 173/2016, le suivi, selon les différentes phases du projet (planification, exécution et vérification) est appelé:

- suivi *ante operam* (ou *baseline monitoring*), mis en œuvre dans la phase de caractérisation préliminaire pour constituer une base de référence pour les paramètres environnementaux d'intérêt avant le début des travaux, dans des conditions non perturbées (ou en tout cas "perturbées" uniquement par des facteurs non liés aux travaux eux-mêmes) ;
- suivi en cours d'activité, effectué lors des phases de chantier pour comparer les écarts induits par les manipulations sur les paramètres d'intérêt simulés et/ou suivis en phase *ante operam*;
- suivi *post operam*, effectué après l'achèvement des travaux, jusqu'à la vérification du rétablissement des conditions environnementales ou de l'obtention d'une nouvelle condition d'équilibre stable (sur la base des indications fournies par les organismes de contrôle).

Dans le CEDA (2015), le suivi visant à comparer les écarts induits par les opérations de manipulation sur les paramètres d'intérêt simulés et/ou surveillés dans la phase *ante operam* est appelée suivi de surveillance (*surveillance monitoring*). Dans le cadre de la Convention de Londres et du Protocole de Londres, la surveillance sur le terrain (*field monitoring*) est définie afin de vérifier l'hypothèse d'impact, c'est-à-dire d'évaluer si les hypothèses qui sous-tendent le choix du site de destination des matériaux de dragage sont correctes en termes de protection du milieu marin et de la santé humaine. Cette activité de surveillance doit être effectuée en incluant la phase *ante operam* (le *baseline monitoring* précité), en cours d'activité et *post operam*.

Le contrôle de conformité (ou *compliance monitoring*) est le contrôle visant à vérifier le respect des exigences et la compatibilité environnementale des opérations pendant l'exécution (en cours d'activité) et après l'achèvement des interventions (*post operam*).

La Figure 7 propose un aperçu conceptuel des principales interactions entre les activités de modélisation et de suivi dans les différentes phases de conception et de gestion des opérations de traitement des sédiments.

Il est précisé que le régime fait état de la totalité des interactions entre les activités de suivi et de modélisation à réaliser si les études menées dans les phases initiales de conception (phase *ante operam*), lors de la phase de connaissance et la phase de modélisation préliminaire, afin de vérifier la faisabilité/compatibilité environnementale des interventions, mettent en évidence des risques environnementaux qui doivent être étudiés plus en détail.

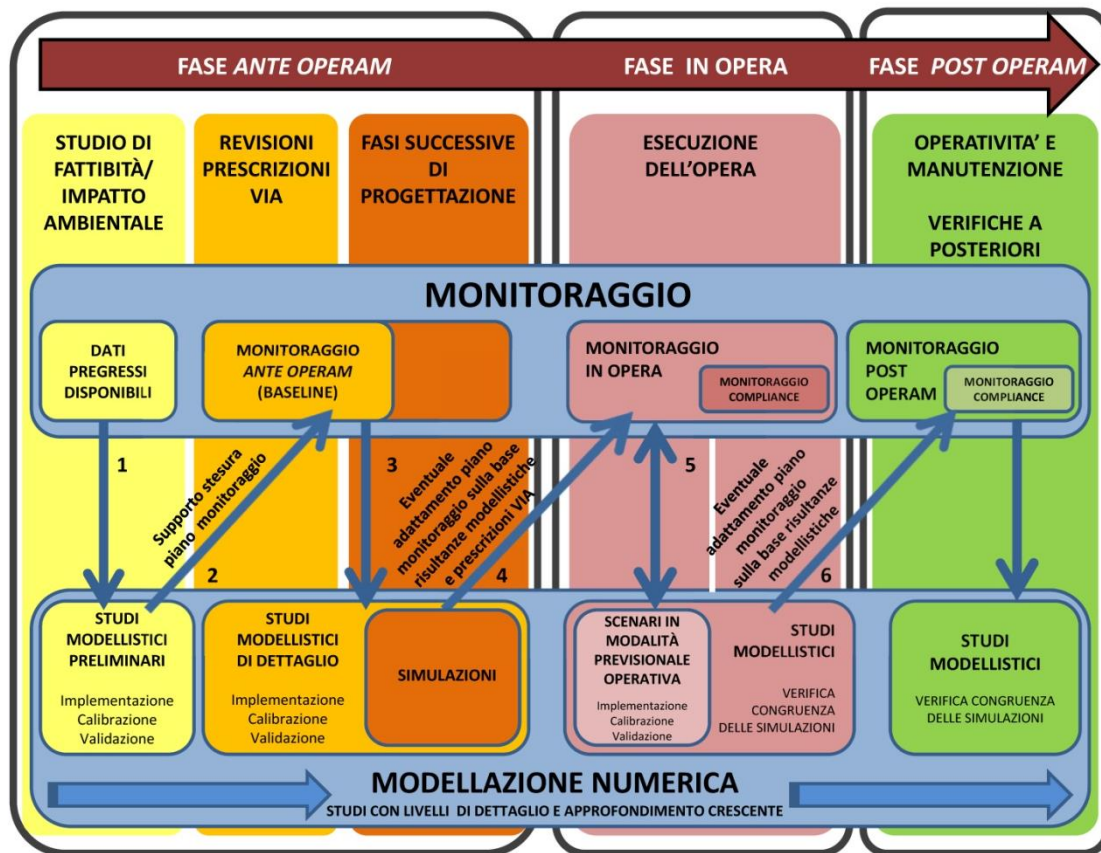


Figure 7: Schéma conceptuel de l'interaction mutuelle entre les activités de suivi et de modélisation lors des différentes phases de conception, d'exécution et de gestion des opérations de déplacement. Extrait de Lisi *et al.*, 2017.

Compte tenu de la multiplicité des objectifs, en détail, la surveillance de l'environnement peut être effectuée afin de :

- soutenir la définition de scénarios de modélisation pour des conditions non perturbées et pour différentes hypothèses de conception sélectionnées afin d'évaluer la faisabilité des interventions (dans les différentes phases des études de conception et d'évaluation des incidences sur l'environnement menées lors de la phase *ante operam*);
- vérifier la conformité du projet avec les réglementations sectorielles et/ou les prescriptions éventuelles (dans les différentes phases de conception et les études d'évaluation des incidences sur l'environnement réalisées dans la phase *ante operam*);
- identifier/corriger la disposition correcte des stations de contrôle, dans les zones dont on peut supposer qu'elles ne sont pas affectées par les travaux, pour les paramètres environnementaux d'intérêt (dans les différentes phases *ante operam*, en cours d'activité et *post operam*);
- identifier et quantifier les changements produits par les opérations de maintenance par rapport à l'état non perturbé (ou précédemment modifié), et fournir des éléments utiles pour l'introduction en temps utile et la vérification de l'efficacité de toute mesure d'atténuation introduite (dans les phases en cours d'opération);
- calibrer et valider les modèles numériques mis en œuvre pour la prévision des effets, pour la vérification a posteriori des hypothèses de modélisation adoptées et pour la vérification/évaluation des résultats de la modélisation (dans les différentes phases *ante operam*, en cours d'activité et *post operam*);

- acquérir des mesures à proximité des engins de travail afin de contribuer à la mise à jour des ensembles de données utilisés pour obtenir les formulations existantes pour l'estimation du terme source et pour étendre leurs intervalles de validité (en cours d'opération)¹³.

Le schéma en Figure 7 met en évidence comment, sur la base des résultats du suivi et de l'analyse des modèles réalisés dans les différentes phases de conception, d'exécution et de gestion des interventions, il est possible d'approfondir la compréhension du système, ses réponses aux pressions induites par l'exécution des interventions et, par conséquent, d'apporter des modifications aux choix de projet effectués.

3.1 Le suivi pour soutenir la validation et la vérification des résultats

La collecte de données *in situ* est utile non seulement pour fournir certains paramètres essentiels à la définition des conditions initiales et limites pour la mise en œuvre correcte du modèle, mais aussi pour la vérification des résultats du modèle lui-même.

Les formulations simplifiées ou paramétriques qui sous-tendent les modèles mathématiques comportent de nombreuses hypothèses qui ne représentent pas pleinement la complexité des phénomènes physiques considérés. Par conséquent, même un modèle correctement mis en œuvre peut conduire à des résultats non conformes à la réalité, si les paramétrages utilisés ne représentent pas les principales particularités du cas en question (par exemple, résolution du modèle non adaptée pour reproduire les caractéristiques bathymétriques). Il en va de même pour les modèles qui utilisent des formulations empiriques pour décrire un phénomène. Dans de nombreux cas, il existe différentes formules empiriques pour la représentation d'un même phénomène. Dans ce cas, il est nécessaire de sélectionner le plus approprié, en ajustant ses paramètres.

Par conséquent, afin de garantir et de vérifier la fiabilité des résultats de la modélisation, les données de terrain doivent être utilisées pour effectuer les procédures d'étalonnage et de validation appropriées.

La calibration est la procédure de comparaison des résultats du modèle avec les observations et mesures correspondantes, afin d'identifier et de moduler l'ensemble des paramètres qui permettent de reconstruire les observations de la meilleure façon.

La validation signifie plutôt la procédure utilisée pour vérifier que le modèle est capable de faire des prédictions précises. Cela implique que le modèle, préalablement calibré, est appliqué pour la reconstruction d'un nouvel ensemble d'observations (ou d'un sous-ensemble de données original, ensemble de données de validation) en gardant le choix des paramètres inchangé. L'objectif de la validation est d'estimer le degré d'approximation avec lequel le modèle peut reproduire les valeurs observées/mesurées. On dit donc que le modèle est validé lorsqu'il est établi que la précision et la capacité de prédiction restent dans les limites d'acceptation fixées pendant la période de validation.

La phase combinée de calibrage/validation du modèle permet d'adapter les outils de modélisation utilisés pour obtenir une plus grande capacité à reproduire la réalité. Il vise donc à vérifier l'acceptabilité des hypothèses qui sous-tendent le modèle utilisé et la fiabilité des

¹³ Bien que cet objectif ne soit pas strictement lié à l'opération de déplacement, la fourniture de nouvelles données SSC mesurées à proximité de l'engin de travail est importante pour l'amélioration des formulations existantes et l'estimation du terme source ainsi que pour l'étalonnage des modèles en cours.

valeurs numériques des paramètres nécessaires pour résoudre le modèle. La validation des modèles utilisés aboutit à l'évaluation de l'erreur, ou intervalle de confiance, à prendre en compte dans l'analyse des résultats qu'ils produisent.

Il est nécessaire que l'AMI soit en mesure de reproduire correctement les principaux phénomènes physiques considérés, tant pour la simulation du champ hydrodynamique que pour les processus de dispersion et de sédimentation du panache turbide généré lors de la manipulation des sédiments. Par conséquent, chacun des modèles qui composent l'AMI doit être soumis à un processus de calibrage/validation.

D'un point de vue opérationnel, le processus de calibrage/validation peut être réalisé à l'aide de différentes techniques basées sur la comparaison entre le résultat numérique et les données correspondantes mesurées dans la réalité.

En général, la vérification peut être effectuée sur la quantité spécifique (par exemple les niveaux d'eau, l'intensité du courant, la concentration, etc.), calculée et observée, ou sur des quantités dérivées de valeurs calculées et observées (nombre de dépassements de la SSC par rapport à un niveau de référence, prisme de marée d'un bassin semi-fermé, distribution de probabilité empirique de la quantité spécifique, etc.).

L'analyse la plus immédiate consiste à estimer la différence moyenne (même quadratique) entre les valeurs calculées et observées. À cette fin, la discrétisation numérique du domaine de calcul doit être soigneusement choisie de manière à ce qu'il soit possible d'extraire le résultat numérique au point de mesure exact sans qu'il soit nécessaire de procéder à une interpolation spatiale.

La différence entre le champ mesuré et le champ du modèle peut fournir plusieurs éléments utiles pour vérifier la capacité du modèle à représenter la réalité avec le degré d'approximation souhaité. La valeur des différences moyennes absolues indique l'écart moyen entre les valeurs du champ mesuré et celles produites par le modèle. Une simple différence moyenne, en revanche, permet d'évaluer si, en moyenne, le modèle produit des valeurs inférieures ou supérieures à celles mesurées. Une différence simple ou absolue seulement pour certaines valeurs du champ fournit des éléments détaillés pour l'évaluation de phénomènes d'intérêt particulier.

Cependant, il est souvent nécessaire de recourir à des analyses plus approfondies pour évaluer la fiabilité des modèles numériques. À titre d'exemple, on peut observer que la simple comparaison synchrone entre les données observées et mesurées est grandement affectée par la capacité du modèle à reproduire correctement la vitesse de propagation de la grandeur considérée. Il peut en effet arriver qu'un modèle soit capable de reproduire avec un bon degré de précision les valeurs d'intensité des paramètres d'intérêt, même s'ils sont caractérisés par un décalage par rapport aux conditions réelles.

Il est donc conseillé de baser l'analyse des résultats sur la comparaison des quantités dérivées (voir, par exemple, les SSC_{medio} et SSC_{max} décrites dans le par. 2.5.2) capable d'évaluer la fiabilité de l'instrument de modélisation en reproduisant les phénomènes d'intérêt visant à évaluer les impacts physiques dus aux activités de manutention. Pour plus de détails sur les questions liées au processus d'étalonnage et de validation des instruments de modélisation, veuillez-vous référer à la littérature pertinente (par exemple, Oreskes et al., 1994; Taylor, 2001; Stow et al., 2009; Jiang, 2014; Olsen *et al.*, 2016).

3.1.1 Objectifs du suivi ante operam

Le suivi *ante operam* (ou de base) est effectué pour définir les conditions environnementales locales avant le début des activités de chantier et fournit les données nécessaires pour évaluer, dans les phases ultérieures des travaux en cours d'activité et *post operam*, les variations induites sur les paramètres environnementaux considérés, ainsi que pour répondre à toute exigence environnementale formulée. Pendant la phase *ante operam*, les données nécessaires sont collectées pour la mise en œuvre d'études de modélisation préliminaires et détaillées (par exemple, données hydrodynamiques et relevés bathymétriques actualisés) et pour étudier l'existence d'une relation de cause à effet pouvant être liée à la réalisation de l'ouvrage.

Le suivi *ante operam* est parfois mis en œuvre en deux phases différentes:

- une première phase pour soutenir la conception et les études d'impact sur l'environnement;
- une deuxième phase, avant le début des activités du chantier, pour caractériser en détail la variabilité naturelle des conditions environnementales « spécifiques au site », notamment afin d'établir des niveaux de référence pour les paramètres physiques, chimiques et biologiques de l'eau et des sédiments (par exemple, niveau, courants, vagues, température et salinité, matières en suspension, turbidité, oxygène, contaminants, chlorophylle, biomasse des organismes, etc.), comme signalé dans le par. 2.2.3 précédent.

Bien que les activités de déplacement puissent induire des modifications du système physique (par exemple, modification de l'intégrité du fond marin, augmentation de la concentration de la fraction sédimentaire fine en suspension, modifications de la bathymétrie et de l'hydrodynamique locale, modification du taux d'érosion et de dépôt au fond, etc.), celles-ci peuvent ne correspondre à aucun effet (ou impact) environnemental significatif si aucun risque environnemental n'est détecté à proximité de la zone d'intervention.

En outre, dans les environnements confinés et/ou à faible énergie (par exemple les bassins portuaires et les zones de transition), une attention particulière doit être accordée à la fois au contrôle de la fraction solide en suspension sortant en pleine mer et à la présence de contaminants associés à la fraction fine des sédiments en suspension. Ces milieux sont en effet généralement caractérisés par la sédimentation d'un pourcentage élevé de la fraction sédimentaire fine, souvent vecteur de contaminants en raison du fort pouvoir adsorbant de la fraction organique.

Par conséquent, pendant la phase *ante operam*, il est important d'effectuer une analyse préliminaire des effets potentiels attendus sur le système aquatique en fonction des particularités du contexte environnemental dans lequel les interventions ont lieu (par exemple, présence de contraintes et de risques environnementaux¹⁴), par la mise en œuvre d'un modèle conceptuel. Ceci afin d'identifier un niveau de référence (ou une série de niveaux) et de définir une échelle d'importance des effets attendus notamment aux récepteurs sensibles présents (voir par. 2.5).

- ¹⁴ Toute altération des paramètres environnementaux d'intérêt pouvant résulter des opérations de déplacement, à différentes échelles spatiales/temporelles, et susceptible de produire des effets (ou contraintes) significatifs (réversibles ou irréversibles) sur les récepteurs et cibles sensibles identifiés. Cette définition inclut également les contraintes environnementales (voir définition correspondante) et les facteurs environnementaux (type de sédiment et de contaminants associés, volumes globaux à manipuler, etc.), auxquels pourraient être liées des altérations significatives des paramètres d'intérêt, qui conditionnent et limitent le choix des modalités opérationnelles (L.D. ISPRA, Lisi et al, 2017).

Si aucune information n'est disponible sur le type de réponse des récepteurs sensibles aux altérations induites par l'augmentation de SSC et DEP sur la qualité du système aquatique, il est possible, par mesure de précaution, de définir, sur la base des données antérieures acquises lors du suivi *ante operam*, un niveau de référence spécifique au site (ou une série de niveaux) lié à la variabilité naturelle de la zone. En raison du caractère arbitraire avec lequel ces valeurs sont souvent établies, elles doivent nécessairement être vérifiées et éventuellement corrigées sur la base des données acquises au cours des activités.

Enfin, pendant la phase *ante operam*, il faut définir le nombre, l'emplacement et la fréquence d'échantillonnage des stations de contrôle, situées dans des zones qui ne doivent en tout état de cause ne pas être soumises aux effets du chantier. Le suivi dans ces stations est utile pour distinguer les effets liés à la variabilité naturelle du site des effets corrélés, dans la phase en cours d'activité, aux activités du site.

De ce point de vue, la mise en place de modèles mathématiques avant le début des travaux, permettant de prévoir les zones critiques et les fenêtres temporelles en relation avec les effets potentiels attendus, peut être un support valable pour la planification de la stratégie de suivi, dans le choix de l'emplacement et de la fréquence d'échantillonnage des stations.

3.1.2 Objectifs du suivi en cours d'activité

Le suivi en cours d'activité vise à comparer les paramètres mesurés pendant les activités de déplacement avec les précédents (pendant le suivi *ante operam*) afin de vérifier la nature et l'ampleur des changements environnementaux induits par les activités (suivi en cours d'activité). Sur la base des données recueillies en cours d'activité, la conformité (*compliance*) au contexte réglementaire et à toute exigence formulée en rapport avec des objectifs environnementaux et de projet spécifiques est également vérifiée.

Les activités de suivi menées au cours de cette phase peuvent être utilisées en relation avec l'activité de modélisation pour :

- évaluer/vérifier le contenu et la congruence de l'étude de modélisation menée pendant la phase de projet;
- évaluer/vérifier l'exactitude de la définition du terme source en termes de quantité et de modalités de libération de la matière;
- garantir à tout moment, même après les opérations de déplacement, la disponibilité de données fonctionnelles permettant de reconstituer par modélisation numérique le régime hydrodynamique et de transport pendant les opérations;
- mettre en œuvre un système de modélisation opérationnelle prédictive pour soutenir les opérations (voir par. 3.2.1).

Le suivi pendant les activités de chantier peut être périodique ou continu. D'un point de vue spatial, il peut être (cf. HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003; Cutruno *et al.*, 2012):

- mobile, car il est effectué au moyen d'un navire à proximité d'un engin de déplacement des sédiments pour la caractérisation de la source du panache turbide;
- stationnaire, car il repose sur l'utilisation de stations fixes pour l'évaluation dans le temps des variations du système éventuellement liées aux activités de déplacement;
- situés au niveau des stations de contrôle et/ou des récepteurs sensibles.

Si les paramètres mesurés au cours des opérations s'écartent sensiblement de ceux détectés dans la phase *ante operam*, il est possible d'activer des procédures de contrôle et/ou d'alerte spécifiques.

Des observations en temps réel, un traitement rapide des données et des systèmes d'évaluation standardisés peuvent être utilisés pour identifier les effets des activités, intensifier et/ou remodeler la stratégie de suivi (par exemple, localisation des stations situées dans la phase *ante operam* et fréquence d'échantillonnage pour le contrôle des processus en place), activer une procédure d'alerte en cas de dépassement des niveaux de référence préétablis pour les paramètres d'intérêt (par exemple les interruptions d'activités en cas d'anomalies significatives des SSC imputables aux opérations de déplacement), ou d'intervenir rapidement sur les procédures d'exploitation avec des mesures d'atténuation appropriées basées sur les choix faits lors de la phase de planification.

3.1.3 Objectifs du suivi *post operam*

Le suivi *post operam* vise à vérifier, à moyen et long terme, le rétablissement des conditions environnementales antérieures à l'exploitation ou, à défaut, l'obtention d'un nouvel état d'équilibre stable sur la base des indications fournies par l'organisme de contrôle.

Sur la base des données recueillies en *post operam*, il est également possible de vérifier la conformité (*compliance*) des effets à moyen/long terme, prévus dans les phases précédentes du projet, avec les exigences réglementaires et formulées dans la phase d'évaluation de la conformité environnementale. Le but de ce suivi est de vérifier/optimiser les actions correctives ou d'atténuation, quelle que soit la manière dont elles sont prévues dans la phase de conception/exécution des interventions.

Le suivi *post operam* est particulièrement important pour vérifier les effets à court et long terme identifiés sur la morphodynamique et les effets sur les écosystèmes associés.

3.2 La modélisation en soutien du suivi

Comme déjà décrit (cf. par. 2.5), il est nécessaire d'en tenir compte dès les premières étapes de la planification du suivi :

- l'emplacement des récepteurs par rapport aux activités de manipulation des sédiments;
- les types d'effets sur l'environnement;
- les voies possibles entre la source et les récepteurs;
- les facteurs (paramètres) auxquels les récepteurs sont sensibles;
- les niveaux de référence possibles selon la définition de l'importance des effets, et éventuellement l'évaluation de la gravité des impacts.

En particulier, en fonction des prévisions du modèle et des résultats obtenus dans les différentes phases de suivi, il est possible d'identifier/vérifier les zones dans lesquelles il faut positionner les stations (fixes et mobiles) pour contrôler le panache turbide et les zones dans lesquelles il faut positionner les stations de contrôle fixes pour acquérir des mesures de fond, c'est-à-dire dans des zones qui ne sont *a priori* pas soumises à des variations induites par les activités du site.

Comme indiqué dans CEDA (2015a), un modèle Source - Parcours - Récepteur (S-P-R) peut être utilisé pour représenter théoriquement le lien entre la source (activité de déplacement) et les récepteurs qui pourraient être affectés par les effets induits par ces activités. On peut voir en Figure 8 comment le modèle S-P-R peut être appliqué aux activités de traitement des sédiments.

Dans ce schéma, la source (activité de déplacement des sédiments) génère un panache turbide qui, par des processus de dispersion et de dépôt mécanique, produit des effets environnementaux tels que des variations de la concentration de solides en suspension dans la colonne d'eau et des variations de l'épaisseur des sédiments déposés au fond. Le récepteur sensible est représenté par une zone spécifique potentiellement touchée. La surveillance des récepteurs vise à identifier les changements possibles et à attribuer, en termes qualitatifs et quantitatifs, un niveau de signification.

L'importance des effets environnementaux est liée à la fois à l'intensité, à la durée et à la fréquence de la perturbation objet du suivi.



Figure 8: Illustration schématique de l'application du modèle source-parcours-récepteur (S-P-R) aux activités de manipulation des sédiments (tiré de CEDA, 2015a)

Comme l'explique en détail les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017), étant donné que les modèles mathématiques permettent de prévoir la trajectoire, l'étendue spatiale, l'intensité et la persistance dans le temps du panache turbide (et donc les variations spatiales et temporelles des paramètres environnementaux simulés) en fonction de l'hydrodynamique locale et pour des scénarios de mouvement sélectionnés, ils peuvent également fournir des éléments utiles pour soutenir la planification du nombre, de l'emplacement et de la fréquence d'échantillonnage des stations de surveillance.

3.2.1 Modélisation opérationnelle en phase de chantier

Pour les interventions d'une ampleur considérable et d'une délicatesse particulière, il pourrait être utile de mettre en œuvre les modèles en mode opérationnel/prévisionnel afin de trouver des informations pendant les opérations :

- les prévisions de vent, de vagues et de courants pour les heures/jours d'activité ;
- la prévision de la répartition de la concentration de sédiments en suspension et de la répartition des dépôts de matériaux au fond, tous deux induits par les opérations de déplacement.

Sur la base des prévisions de l'outil de modélisation opérationnelle, qui doit nécessairement être calibré/validé sur les données de surveillance acquises au fil du temps, il est possible de définir ou d'optimiser un plan d'opérations à court terme (Short Term Operations Plan – STOP) utile tant pour l'opérateur (par exemple, la connaissance anticipée des fenêtres temporelles pour lesquelles des événements indésirables sont prévus pendant les travaux est fondamentale pour l'optimisation de l'utilisation des moyens impliqués) que pour les organismes chargés du contrôle.

Par exemple, s'il est prévu de dépasser les niveaux de référence préétablis du SSC (niveau d'alerte) en un ou plusieurs points cibles, le plan d'opérations pourrait prévoir l'activation d'une procédure d'alerte, l'interruption des opérations ou leur modification (mesures d'atténuation), afin de ramener l'effet/l'impact à des niveaux acceptables.

3.3 Standardisation des mesures et du flux d'informations

Dans le cas spécifique des opérations de déplacement des sédiments en milieu marin et côtier, l'application d'une méthodologie partagée de collecte et de gestion des données (surveillance, exploitation et modélisation) est certainement fonctionnelle aux procédures d'autorisation de nouveaux projets et au développement de projets de recherche.

Dans la littérature, on trouve en effet plusieurs ensembles de données de terrain acquises lors de l'exécution d'opérations de dragage et de déversement qui ne peuvent être systématiquement utilisées dans les études sectorielles parce qu'elles ont été acquises par l'utilisation de différentes méthodologies (donc disponibles dans des formats non standardisés) ou parce qu'elles figurent dans des rapports confidentiels (Hayes et al., 2007; Kemps & Masini, 2017). Cela se reflète, par exemple, sur la fiabilité de l'estimation du terme source par l'utilisation de formulations empiriques dérivées d'un nombre limité de données de terrain (spécifiques au site et au projet) et la nécessité de recourir arbitrairement à des hypothèses de base souvent « excessivement conservatrices » pour surmonter les problèmes environnementaux résultant d'éventuelles sous-estimations du terme source.

À cet égard, Kemps & Masini (2017) soulignent l'importance d'avoir des bases de données partagées (*data library*) qui doivent être constamment mises à jour avec de nouvelles mesures spécifiques aux projets (réalisées sur différents sites et pour différents objectifs de projet) et d'adopter des protocoles/approches standardisés pour l'exécution des mesures et le remplissage des bases de données. En particulier, afin d'homogénéiser et de maximiser l'utilité des données acquises, ils recommandent la rédaction d'une fiche d'information, spécifique au projet examiné, qui contient au moins des informations sur:

- les caractéristiques géotechniques et la distribution granulométrique des sédiments (PSD) du fond marin à déplacer (fondamental pour la validation de l'ensemble des données);
- la répartition granulométrique des sédiments au fond, à la fin des opérations, dans les zones qui peuvent avoir été significativement affectées par l'exécution des travaux et/ou l'action des engins de travail;
- des spécifications sur le type de données et les méthodologies utilisées pour la collecte des données (par exemple, position des points d'échantillonnage/collecte de données par rapport à l'engin de travail, profondeur des échantillonnage/mesures le long de la colonne d'eau, épaisseur des sédiments prélevés au fond, etc.);
- des spécifications sur les méthodes techniques et opérationnelles utilisées (par exemple, type de drague, vitesse du cycle de dragage, productivité horaire et journalière, calendrier des activités, division éventuelle en lots opérationnels, etc.);
- les propriétés physiques de la fraction de sédiments en suspension (par exemple, la vitesse de sédimentation et la distribution de la taille des particules) pendant les opérations;
- le débit (ou taux) de remise en suspension/libération à proximité de l'engin, en précisant clairement l'unité de mesure dans laquelle il est exprimé (par exemple, pourcentage par rapport à la fraction fine, kg/s, etc.) et la limite utilisée pour définir la fraction sédimentaire

fine (par exemple, 63 μm selon l'échelle de *Wentworth* ou 74 μm selon la classification USCS);

- les données sur les conditions météorologiques et les paramètres physico-chimiques de la colonne d'eau à acquérir, pour une meilleure interprétation des données acquises en cours d'activité, à partir de la période précédant le début des opérations de déplacement (et donc des activités de suivi prévues) en cours d'activité.

L'annexe 1 présente un exemple de fiche d'information de projet (FIP) tirée des L.D. ISPRA (Lisi et al., 2017), spécifique à chaque projet et articulée dans les phases *ante operam* (tableau FIP-AO), en cours d'activité (tableau FIP-ECO) et *post operam* (tableau FIP-PO), contenant les principales informations (environnementales et opérationnelles) qui peuvent être collectées (avant, pendant et après l'exécution des interventions) pour une meilleure application des études de modélisation.

En particulier, la rédaction des fiches d'information sur les projets (FIP) dans les différentes phases du projet examiné a les objectifs suivants :

- standardiser le type d'informations et les méthodologies de collecte des données, afin d'enrichir en permanence les bases de données disponibles et utilisables, dans le cadre d'études de modèles menées pour évaluer la faisabilité/compatibilité de projets futurs, afin d'accroître la fiabilité des estimations (par exemple, le terme source) pouvant être obtenues avec la mise en œuvre de l'IAM;
- permettre une meilleure utilisation de la modélisation et des procédures d'étalonnage et de vérification des résultats (et des éventuels niveaux de précaution adoptés), dans les différentes phases de conception et de gestion du projet examiné (par exemple si un système décisionnel soutenant la vérification de la conformité environnementale des opérations de manipulation a été mis en place, ce qui inclut également l'utilisation de la modélisation en cours d'activité).

La Figure 9 souligne que l'élaboration des fiches individuelles de projet (FIP) dans les différentes phases *ante operam* (FIP-AO), en cours d'activité (FIP-ECO) et *post operam* (FIP-PO) peut être considérée comme sans rapport entre elles, car elles sont caractérisées par des objectifs différents, tant dans la conception et la gestion du projet considéré que dans la vérification de la faisabilité/compatibilité des projets futurs.


RACCOLTA DI INFORMAZIONI E DATI (AMBIENTALI E OPERATIVI) NELLE DIVERSE FASI DI MONITORAGGIO E NELLE DIVERSE SESSIONI DEI LAVORI			UTILITÀ AI FINI MODELLISTICI NELLE DIVERSE FASI PROGETTUALI	
			PROGETTO IN ESAME	PROGETTI FUTURI
INFORMAZIONI AMBIENTALI (Misure in situ e ricognizione dati disponibili)			MIGLIORE UTILIZZO DELLA MODELLISTICA E DELLE PROCEDURE DI CALIBRAZIONE E VERIFICA DEI RISULTATI PRELIMINARMENTE L'ESECUZIONE DEGLI INTERVENTI	
SCHEDA INFORMATIVA ANTE OPERAM (*) (§. Appendice 2, SIP. AO)	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE, MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI OGGETTO (E IN PROSSIMITÀ) DEGLI INTERVENTI	CONDIZIONI METEO-MARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA		
INFORMAZIONI AMBIENTALI E OPERATIVE Relative alle diverse sessioni (o lotti funzionali - LF) dei lavori			VERIFICA DELL'ATTENDIBILITÀ DEGLI STUDI MODELLISTICI IMPLEMENTANTI NELL'ANTE OPERAM E VERIFICA/AGGIORNAMENTO DEGLI EVENTUALI LIVELLI CAUTELATIVI ADOTTATI	AGGIORNARE E ARRICCHIRE I DATABASE UTILIZZABILI A SUPPORTO DI PROGETTI CARATTERIZZATI DA PECULIARITÀ AMBIENTALI E PROGETTUALI SIMILI, PER MIGLIORARE L'AFFIDABILITÀ DELLE STIME DEL TERMINE SORGENTE E AMPIARE GLI INTERVALLI DI VALIDITÀ DELLE FORMULAZIONI EMPIRICHE DISPONIBILI
SCHEDA INFORMATIVA IN CORSO D'OPERA (**) (§. Appendice 2, SIP. IO)	LF.1 LF.2 -----> LF.n	CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI INTERESSATI DALLA RIDEPOSIZIONE/RISOSPENSIONE DEL SEDIMENTO MOVIMENTATO		
		CONDIZIONI METEO-MARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA (*)		
		CONDIZIONI DI UTILIZZO E MODALITÀ TECNICHE E OPERATIVE		
INFORMAZIONI AMBIENTALI (Misure in situ e ricognizione dati disponibili)			VERIFICA DELL'ATTENDIBILITÀ DEGLI STUDI MODELLISTICI IMPLEMENTANTI NELL'ANTE OPERAM E IN CORSO D'OPERA E VERIFICA/AGGIORNAMENTO DEGLI EVENTUALI LIVELLI CAUTELATIVI ADOTTATI	
SCHEDA INFORMATIVA POST OPERAM (***) (§. Appendice 2, SIP. PO)	CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE E SEDIMENTOLOGICHE DEI FONDALI INTERESSATI DALLA RISOSPENSIONE/RIDEPOSIZIONE DEL SEDIMENTO MOVIMENTATO	CONDIZIONI METEO-MARINE E PARAMETRI CHIMICO-FISICI DELLA COLONNA D'ACQUA		

Figure 9: Schéma récapitulatif des principaux objectifs de la compilation des fiches individuelles de projet (FIP) dans les différentes phases *ante operam*, en cours d'activité et *post operam*. Lisi et al. (2017).

- (*) Afin de maximiser l'utilité du FIP-AO, il est souhaitable de le remplir avec une fréquence (ou un nombre de campagnes de suivi) adéquate pour fournir des informations statistiquement représentatives de la turbidité naturelle de la zone d'intervention (c'est-à-dire pour les principales conditions météorologiques et maritimes et tout trafic maritime caractérisant la zone examinée)
- (**) Afin de maximiser l'utilité du FIP-IC (pour le projet considéré et pour les projets futurs), il est souhaitable de le remplir à chaque changement de session de travail (et de procédures opérationnelles) et en cas de changements significatifs des conditions météorologiques et de l'état de la mer.
- (***) À ne réaliser que si un suivi est prévu dans la phase *post operam* en fonction des objectifs environnementaux et de conception des opérations et des résultats des études, afin de vérifier le rétablissement des conditions environnementales initiales ou de nouvelles conditions d'équilibre.

4 CONCLUSIONS

Les activités de déplacement des sédiments sont souvent nécessaires pour l'entretien et la restauration des fonds portuaires.

Les modèles mathématiques, calibrés et validés par l'utilisation des données de la littérature et de terrain, sont fonctionnels, tant pour la conception des opérations de dragage du fond portuaire que pour la planification des systèmes de suivi environnemental des activités, en particulier lorsque le risque environnemental et les effets négatifs possibles sur le compartiment abiotique et biotique de l'écosystème marin sont reconnus, en raison du transport et du dépôt de la fraction de sédiments fins libérés pendant tout le cycle des opérations.

Dans le cadre du projet Se.D.Ri.Port., ISPRA et ARPAL ont collaboré à la mise en œuvre de modèles mathématiques pour l'étude de cas de la rade de La Spezia, dans le but de quantifier les effets physiques potentiels liés à la remise en suspension, et au dépôt ultérieur, de la fraction la plus fine des sédiments déplacés. Dans le cas spécifique, des scénarios de modélisation représentatifs du déplacement des sédiments portuaires après les opérations de nivellement ont été reproduits. Cette technique a été schématisée comme l'excavation et le déplacement/redistribution ultérieurs des sédiments dragués du fond de la mer vers une zone adjacente, sans que la tête de l'engin de dragage ne sorte de la colonne d'eau et reste près du fond. La description des applications de modélisation et des principes méthodologiques utilisés pour l'analyse des résultats conformément à la méthode Dr-EAM (Feola et al., 2016) à l'étude de cas de La Spezia est rédigée dans le rapport du Se.D.Ri.Port « Document de synthèse de l'expérimentation de l'application de modélisation dans un bassin portuaire pilote » (ARPAL et ISPRA, 2019, tâche T1.6, produit T1.6.6, projet Se.D.Ri.Port).

Le présent manuel rend compte, parfois intégralement pour faciliter la discussion, des indications opérationnelles énoncées dans les L.D. ISPRA « La modélisation mathématique dans l'évaluation des aspects physiques liés à la manipulation des sédiments dans les zones marines et côtières » (Lisi et al., 2017), élaboré par l'ISPRA en collaboration avec l'Université de L'Aquila et DHI Italia, pour la bonne mise en place d'études de modélisation dans les bassins portuaires pour soutenir la gestion des interventions de dragage dans les bassins semi-fermés et portuaires, qui peuvent être généralisées pour des applications de modélisation dans différents types de ports de la zone transfrontalière.

En particulier, les principaux contenus des L.D. ISPRA (Lisi et al., 2017) ont été repris, remodelés et généralisés. Ils sont à prendre en considération pour la mise en œuvre correcte d'une approche de modélisation intégrée (AMI) (par. 2.1), en mettant au premier plan:

- 1) les critères permettant d'identifier les forces et les conditions limites pour la modélisation hydrodynamique (par exemple, bathymétrie, climatique, hydrologique, sédimentologique, hydrodynamique);
- 2) les critères de caractérisation du terme source de libération des sédiments pendant les opérations de dragage (par exemple, analyse des modes de dragage, du flux de sédiments remis en suspension dans la colonne d'eau et des modes de libération pour chaque phase du cycle de dragage;
- 3) les modalités d'introduction du terme source dans le modèle de transport pour l'étude de la dynamique du panache sédimentaire (transport et dépôt des sédiments en suspension);

- 4) les méthodes d'analyse et de synthèse des résultats sur la base des objectifs environnementaux et de projet et de la connaissance de la zone d'intervention (par exemple, présence et type de cibles sensibles à protéger, tels que *P. oceanica*, formations coralligènes, type et volume de sédiments à déplacer) conformément aux lignes directrices européennes et internationales, et présentées dans les L.D. ISPRA (Lisi *et al.*, 2017).

Enfin, reprenant les critères contenus dans les L.D. ISPRA, ce manuel décrit les interactions nécessaires entre les études de modélisation et les activités de suivi de l'environnement (voir par. 3).

En particulier, afin de planifier correctement les études de modélisation et d'optimiser les activités de suivi (des projets actuels et futurs), il est recommandé de recueillir des informations environnementales et opérationnelles par le biais de la rédaction de fiches d'information sur les projets (FIP). La rédaction de ces formulaires est considérée comme une aide, à la fois pour faciliter et guider la collecte des données et des informations nécessaires à la mise en œuvre correcte et à la vérification des résultats des études de modélisation obtenus dans le cadre des études de compatibilité environnementale des projets existants, et pour enrichir la base de données des données de terrain disponibles qui peuvent être utilisées dans les phases initiales de conception des projets futurs.

5 BIBLIOGRAPHIE

- Aarninkhof S.G.J., Rosenbrand W.F., Van Rhee C., Burt T.N., 2008. The day after we stop dredging: a world without sediment plumes?. *Terra et Aqua*, 110 – March 2008, 15-24.
- Anchor Environmental C.A. L.P., 2003. Literature review of effects of resuspended sediments due to dredging operations. Prepared for Los Angeles Contaminated Sediments Task Force - Los Angeles, California, June 2003, pp. 140.
- APAT-ICRAM, 2007. Manuale per la movimentazione di sedimenti marini. Versione aggiornata 2007, pp. 72.
- ARPAL e ISPRA, 2019. “Documento di sintesi della sperimentazione dell'applicazione modellistica all'interno di un bacino portuale pilota”. Task T1.6, prodotto T1.6.6, progetto Se.D.Ri.Port.
- Bai Y., Wang Z., Shen H., 2003. Three-dimensional modelling of sediment transport and the effects of dredging in the Haihe Estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 56(1), 175-186.
- Becker J.H., van Eekelen E., van Wiechen J., De Lange W., Damsma T., Smolders T., van Koningsveld M., 2015. Estimating source terms for far field dredge plume modelling. *J. Environ. Manag.*, 149, 282–293.
- Bilgili A., Proehl J., Lynch D., Smith K., Swift M.R., 2005. Estuary/Ocean exchange and tidal mixing in a Gulf of Maine Estuary: A Lagrangian modeling study. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 65(4), p. 607-624.
- Blumberg A.F., Mellor G.L., 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in *Three-dimensional Coastal Ocean Models* (N. Heaps, ed.), American Geophysical Union, Washington, DC, 1-16.
- Bridges T.S., Ells S., Hayes D., Nadeau S., Palermo M.R., Patmont C., Schroeder P., 2008. The Four Rs of environmental dredging: Resuspension, Release, Residual, and Risk. Technical Report ERDC/EL TR-08-4, Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center, January 2008, pp. 64.
- Burt T.N., Roberts W., Land J.M., 2000. Assessment of sediment release during dredging - A new initiative called TASS. In: *Proceedings of the Western Dredging Association (WEDA XX) and 32nd Texas A&M Annual Dredging Seminar (TAMU)*, USA, June 2000. Pub. Texas A&M University, Texas 77843-3136 (CDS Report No 72).
- CEDA, 2015. Environmental Monitoring Procedures. Central Dredging Association-CEDA, Aprile 2015, Rotterdamseweg-The Netherlands, pp. 24.
- CEDA/IADC, 2018. Dredging for Sustainable Infrastructure. CEDA/IADC, The Hague, The Netherlands. Revision no. 1021 logged at 2017-10-05 13:35.
- Chorin A.J., Marsden J.E., 2000. *A Mathematical Introduction to Fluid Mechanics*, 3rd edition, Springer, New York. pp. 172.
- Clarke D.G., Wilber D.H., 2000. Assessment of potential impacts of dredging operations due to sediment resuspension. DOER Technical Notes Collection (ERDC TN-DOER-E9), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, pp. 14 www.wes.army.mil/el/dots/doer.
- Collins M., 1995. Dredging Induced Near Field Resuspended Sediment Concentration and Source Strengths. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, pp. 232.
- Cutruneo L., Castellano M., Pieracci A., Povero P., Tucci S., Capello M., 2012. The use of a combined monitoring system for following a turbid plume generated by dredging activities in a port. *J. Soils Sediments*, 12 (5), 797–809.

- Davies A.M., Xing J., Huthnance J.M., Hall P., Thomsen L., 2002. Models of near-bed dynamics and sediment movement at the Iberian margin. *Progress in Oceanography*, 52 (2-4), 373-397.
- De Marchis M., Freni G., Napoli E., 2014. Three-dimensional numerical simulations on wind- and tide-induced currents: The case of Augusta Harbour (Italy). *Computers & Geosciences*. 72, 65–75.
- De Wit L., 2010. Near field 3D CFD Modelling of overflow plumes. In: *Proceedings of WODCON XIX, Beijing, China*, p. 712-723. http://www.svasek.com/news/WODCON_paper_LdeWit.pdf.
- De Wit L., Talmon A.M., Van Rhee C., 2014. 3D CFD simulation of trailing suction hopper dredge plume mixing: a parameter study of near field conditions influencing the suspended sediment source flux. *Mar. Pollut. Bull.*, 88 (1-2), 47-61.
- DHI, 2017. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module – Scientific documentation. Release 2017. pp. 2.
- Di Risio M., Pasquali D., Lisi I., Romano A., Gabellini M., De Girolamo P., 2017. An analytical model for preliminary assessment of dredging-induced sediment plume of far-field evolution for spatial non homogeneous and time varying resuspension sources. *Journal: Coastal Engineering*
- Eisma D., 2006. *Dredging in Coastal Water*. Published by Taylor & Francis plc., London, UK, ISBN: 978-0-415-39111-5, pp. 244.
- EPA, Environmental Protection Agency, 1993. *Selecting Remediation Techniques for Contaminated Sediment*. Office of water WH 585, EPA-823-B93-C81, pp. 226
- Erftemeijer P.L.A., Lewis R.R., 2006. Environmental impacts of dredging on seagrasses: A review. *Marine Pollution Bulletin* 52 (12), p. 1553-1572.
- Erftemeijer P.L.A., Riegl B., Hoeksema B.W., Todd P.A., 2012. Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals: a review. *Mar. Pollut. Bull.* 64 (9), 1737-1765.
- Erm A., Soomere T., 2006. The impact of fast ferry traffic on underwater optics and sediment resuspension. *Oceanologia*, 48 (S), 283–301.
- Feola A., Lisi I., Venti F., Salmeri A., Pedroncini A., Romano E., 2015. A methodological modelling approach to assess the potential environmental impacts of dredging activities. In *Proc. Of CEDA. Dredging Days, Innovative Dredging Solutions for Ports*, Rotterdam.
- Feola A., Lisi I., Salmeri A., Venti F., Pedroncini A., & Romano E., 2016. Platform of integrated tools to support environmental studies and management of dredging activities, *J. Env. Manag.* 166.
- Fisher R., Walshe T., Bessell-Browne P., Jones R., 2017. Accounting for environmental uncertainty in the management of dredging impacts using probabilistic dose– response relationships and thresholds. *Journal of Applied Ecology*; 00: 1–11.
- Fraser M.W., Short J., Kendrick G., McLean D., Keesing J., Byrne M., Caley M.J., Clarke D., Davis A.R., Erftemeijer P.L.A., Field S., Gustin-Craig S., Huisman J., Keough M., Lavery P.S., Masini R., McMahon K., Mengersen K., Rasheed M., Statton J., Stoddart J., Wu P., 2017. Effects of dredging on critical ecological processes for marine invertebrates, seagrasses and macroalgae, and the potential for management with environmental windows using Western Australia as a case study. *Ecological indicators*, vol. 78, 229-242.
- Hadfield M.G., 2014. *South Taranaki Bight Sediment Plume Modelling: the Effect of Revised Source Particle-Size Distributions*. Report prepared for Trans-Tasman Resources Ltd, submitted to EPA, pp. 11.
- Hayes D.F., Engler R.M., 1986. *Environmental Effects of Dredging*. Technical Notes, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, pp. 11.

- Hayes D., Crockett T.R., Ward T.J., Averett D., 2000. Sediment resuspension during Cutterhead dredging operation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 126 (3), ASCE.
- Hayes D., Wu P.Y., 2001. Simple Approach to TSS Source Strength Estimates. In: *Proceedings of Western Dredging Association WEDA XXI*, Houston.
- Hayes D.F., Borrowman T.D., Schroeder P.R., 2007. Process-based estimation of sediment resuspension losses during bucket dredging. *Proceedings of the World Dredging Congress 2: 1191-1208*. World Dredging Congress; WODCON XVIII
- Herbich J.B., Brahme S.B., 1991. Literature Review and Technical Evaluation of Sediment Resuspension during Dredging. Contract Report HL-91-1 U.S. Army. Corps of Engineers. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Hydraulics Laboratory (U.S.), pp. 152.
- HR Wallingford Ltd & Dredging Research Ltd, 2003. Protocol for the Field Measurement of Sediment Release from dredges. Produced for VBKO TASS, Issue 1, August 2003, pp. 83.
- IADC, International Association of Dredging Companies, 1998. Environmental Aspects of Dredging – Guide 4: Machines, Methods and Mitigation. International Association of Dredging Companies (IADC), The Netherlands, pp. 80.
- Jiang J., 2014. Investigation of Key Parameters for 3-D Dredging Plume Model Validation. *Journal of Shipping and Ocean Engineering* 4, p. 129-139.
- John S.A., Challinor S.L., Simpson M., Burt T.N., Spearman J., 2000. Scoping the assessment of sediment plumes arising from dredging. CIRIA Report C547, London 2000, pp. 192.
- Johnson B.H., Pachure T.M., 1999. Estimating Dredging Sediment Resuspension Sources. DOER Technical Notes Collection, TN DOER-E6, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. pp. 9.
- Jones R., Bessell-Browne P., Fisher R., Klonowski W., Slivkoff M., 2016. Assessing the impacts of sediments from dredging on corals. *Marine Pollution Bulletin*. 102, 9-29.
- Jouon A., Douillet P., Ouillon S., Fraunie P., 2006. Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model. *Continental Shelf Research*. 26(12-13), 1395-1415.
- Kemps H., Masini R., 2017. Estimating dredge source terms - a review of contemporary practice in the context of Environmental Impact Assessment in Western Australia. WAMSI Dredging Science Node Report Theme 2, Project 2.2. Western Australian Marine Science Institution, pp. 23.
- Lisi I., Taramelli A., Di Risio M., Cappucci S., Gabellini M., 2009. Flushing efficiency of Augusta Harbour (Italy). – *Journal of Coastal Research*, SI 56, vol.1, 841–846.
- Lisi I. 2012. Development of an integrated system to the estimation and the environmental management of resuspension induced by dredging activities. [Tesi in italiano]. Univ. of L'Aquila, Italy.
- Lisi I., Di Risio M., De Girolamo P., Gabellini M., 2016. Engineering tools for the estimation of dredging-induced sediment resuspension and coastal environmental management, In: *Intech*, (Ed), Applied Studies of Coastal and Marine Environment.
- Lisi I., Feola A., Bruschi A., Di Risio M., Pedroncini A., Pasquali D. & Romano E., 2017. La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere. *Manuali e Linee Guida ISPRA*, 169/2017, pp.144
- Lisi I., Feola A., Bruschi A., Di Risio M., Pedroncini A., Pasquali D., Romano E. & Maurizio Ferla, 2018. Il nuovo manuale per l'utilizzo della modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere. XXXVI Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche

Ancona, 12-14 Settembre 2018

- Lisi I., Feola A., Bruschi A., Di Risio M., Pedroncini A., Pasquali D., Ferla M., 2019(a). L'utilizzo dei modelli matematici nella valutazione degli effetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere: il manuale ISPRA, proceeding del "Workshop Se.D.Ri.Port sulla valutazione degli effetti fisici dovuti alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere: strumenti e metodologie di approccio. Livorno, Aprile 2019
- Lisi I., Feola A., Bruschi A., Pedroncini A., Pasquali D., Di Risio M., 2019(b). Mathematical modeling framework of physical effects induced by sediments handling operations in marine and coastal areas. *J. Mar. Sci. Eng.*, 7, 149.
- Liu J.T., Chao S., Hsu R.T., 2002. Numerical modeling study of sediment dispersal by a river plume. *Continental Shelf Research*, 22 (11-13), 1745–1773.
- Lumborg U., 2005. Modelling the deposition, erosion, and flux of cohesive sediment through Øresund. *Journal of Marine Systems* 56 (1-2), 179–193.
- Manzanera M., Pérez M., Romero J., 1998. Seagrass mortality due to oversedimentation: an experimental approach. *Journal of Coastal Conservation*, 4: 67-70.
- Mei C.C., 1989. The applied dynamics of ocean surface waves, World Scientific. pp. 768
- Mendel. Landbomvhogedrool, Wegeningera, pp. 98.OMOE, Ontario Ministry of the Environment and Energy, 1994. Evaluating construction activities impacting on water resources - Part III B - Handbook for dredging and dredged material disposal in Ontario - Dredging Transport and Monitoring. Report prepared by Standards Development Branch Ontario Ministry of the Environment, ISBN 0-7778-3292-5, pp. 31.
- Nakai O., 1978. Turbidity generated by dredging projects. In management of bottom sediments containing toxic substances. In: Proceedings of the 3rd U.S.–Japan Experts Meeting. US Army Engineer Water Resources Support Center.
- Nicoletti L., Paganelli D., Gabellini M., 2006. Environmental aspects of relict sand dredging for beach nourishment: proposal of monitoring protocol. Quaderno ICRAM n.5, pp.155.
- Nota D.J.G., 1958. Sediments of the western Guyana shelf. Report of Orinoco shelf expedition, 2.
- Olsen E., Fay G., Gaichas S., Gamble R., Lucey S., Link J.S., 2016. "Ecosystem Model Skill Assessment. Yes We Can!". *PLoS ONE* 11(1): e0146467, pp. 1-24.
- Oreskes N., Shrader-Frechette K., Belitz K., 1994. Verification, Validation and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science*, vol 263. pp.641-646.
- Paganelli D., La Valle P., Ercole S., Lisi I., Teofili C., Nicoletti L., 2014. Guidelines for environmental studies related to the construction of coastal defence works. ISPRA, Handbooks and Guidelines 105-bis/2014, pp. 69.
- Palermo M.R., Averett D.E., 2003. Environmental dredging – a state of the art review. 2nd International Symposium on Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, Management Strategy Performance, Quebec City, Canada, pp. 12-17.
- Palermo M.R., Schroeder P.R., Estes T.J., Francingues N.R., 2008. Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments. ERDC/EL TR-08-29. U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, USA, pp. 302.
- Pasquali D., Di Risio M., De Girolamo P., 2015. A simplified real time method to forecast semienclosed basins storm surge. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 165, 61–69.
- Pedlosky J., 1996. *Ocean Circulation Theory*, Springer, Berlin, pp. 456.
- Pedlosky J., 2003. *Waves in the Ocean and Atmosphere*, Springer, Berlin, pp. 264.
- Pellegrini D., Mugnai C., Simona Macchia¹, Lisi I., Feola A., Bruschi A., Mumelter E, 2019a. "La normativa italiana in vigore sulla movimentazione dei sedimenti marini e spunti applicativi", proceeding del "Workshop Se.D.Ri.Port sulla valutazione degli effetti fisici dovuti alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere: strumenti e

- metodologie di approccio. Livorno, Aprile 2019
- Pellegrini D., Bertolotto R., Lisi I., Feola A., Salmeri A., Venti F., Macchia S., Piccione M.E., Bruschi A., Magrì S., De Gaetano P., Quagliati M., Di Risio M., Pasquali D., Pedroncini A., Ferla M., 2019b. Sinergia tra modellazione matematica e monitoraggio ambientale a supporto della gestione ambientale delle operazioni di movimentazione di sedimenti in ambito portuale e costiero: standardizzazione di metodi a partire da casi applicativi. Rapporto SNPA edizione 2018, Report di Sistema SNPA/07 2019, pag. 75. ISBN 978-88-448-043-0.
- Pennekamp J.G.S., Eskamp R.J.C., Rosenbrand W.F., Mullie A., Wessel G.L., Arts T., Decibel I.K., 1996. Turbidity caused by dredging; viewed in perspective. *Terra et Aqua*, 64, 10-17.
- PIANC, Permanent International Association of Navigation Congresses, 2006. Environmental risk assessment of dredging and disposal operations. Report of Working Group 10 of the Environmental Commission. pp.40
- Shao D., Purnama A., Sun T., 2015. Modeling the temporal evolution of dredging-induced turbidity in the far field. *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.* 117, 610–623.
- Shao D., Gao W., Purnama A., Guo J., 2016. Modeling dredging-induced turbidity plumes in the far field under oscillatory tidal currents. *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.* Vol. 143, Issue 3 May 2017.
- Shepard F.P., 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios: *Journal of Sedimentary Petrology*, 24, 151-158.
- SKM, Sinclair Knight Merz Pty Ltd, 2013. Improved dredge material management for the Great Barrier Reef Region, Great Barrier Reef Marine Park Authority, Townsville.
- Sofonia J.J., Unsworth R.K., 2010. Development of water quality thresholds during dredging for the protection of benthic primary producer habitats. *Journal of Environmental Monitoring* 12(1), 159-163.
- Stow C.A., Jolliff J., McGillicuddy D.J. Jr., Doney S.C., Allen J.I., Friedrichs M.A.M., Rose K.A., Wallhead P., 2009. Skill assessment for coupled biological/physical models of marine systems. *J. of Marine Systems*, 76, 4-15.
- Sunstein C.R., 2003. Beyond the precautionary principle. *U. Penn. Law Rev.* 151, 1003-1058.
- Taylor K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, pp. 7183-7192.
- USACE, US Army Corps of Engineers, 2002. Field Evaluation of Hopper Dredge Overflow . for the Delaware River. Technical Note Erdc/EI-Tr 02/17. 178 pp.
- USACE, US Army Corps of Engineers, 2003. A review of environmentally improved techniques for dredging contaminated mud. TECHNICAL NOTE TN 3/2003. Fill Management Division GEO, pp. 29.
- Van Koningsveld M., De Boer G.J., Baart F., Damsma T., Den Heijer C., Van Geer P., De Sonnevile B., 2010. OpenEarth - inter-company management of: data, models, tools & knowledge. In: *Proceedings of WODCON XIX*, Beijing, China, p. 14.
- Van Koningsveld M., Damsma T., Van der Hout R., Van Wiechen J., De Boer G.J., 2013. Openearth: a knowledge management workflow for dredging projects. *Terra Aqua*, 131 (1), 3-14.
- Van Rhee C., 2002. On the Sedimentation Process in a Trailing Suction Hopper Dredger. Delft University of Technology. Ph.D. Thesis. <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:c16d25e7-7b02-43ff-8ec8-e6069f8a1ce2/>
- VBKO, 2003. Protocol for the Field Measurements of Sediment Release from Dredgers, 1, pp. 1e83.
- Wilber DH., Clarke DG., 2001. Biological Effects of Suspended Sediments: A Review of Suspended Sediment Impacts on Fish and Shellfish with Relation to Dredging Activities in Estuaries. *North American Journal of Fisheries Management* 21(4). 855-875.

ANNEXE 1 : EXEMPLE DE FICHES INFORMATIVES DE PROJET

extrait des L.D. ISPRA (Lisi et al., 2017)

EXEMPLE DE FICHE D'INFORMATION SUR LE PROJET ANTE OPERAM (FIP-AO)

-- Informations et enquêtes environnementales utiles pour la mise en œuvre d'études de modélisation avant les opérations de manutention --

LES COMPARTIMENTS ENVIRONNEMENTAUX SÉDIMENTS À DÉPLACER		CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES, MORPHOLOGIQUES ET SÉDIMENTOLOGIQUES DES FONDS MARINS							
		Paramètres mesurés	Valeur	Unité de mesure	Méthodes d'échantillonnage				Notes
					Instruments utilisés	Nombre de stations d'échantillonnage et codification	Coordonnées et profondeur du battant	Distance par rapport à toute source de remise en suspension/libération	
		Type et résistance au cisaillement							
		Densité / teneur en eau							
		Distribution granulométrique							
		Diamètre moyen							
		% de sédiments fins							
		Vitesse critique de remise en suspension (mesurée ou estimée) par rapport aux courants locaux							
		Contaminants							
		Relevé bathymétrique							
		Taux de dépôt							
		Autre :							

CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA COLONNE D'EAU									
Paramètres mesurés	Valeur	Unité de mesure	Méthodes d'échantillonnage					Notes	
			Instruments utilisés	Nombre de stations d'échantillonnage et codification	Coordonnées et profondeur du battant	Distance par rapport à toute source de remise en suspension/libération	Fréquence et durée de l'échantillonnage		
Données météorologiques et hydrodynamiques	Vent (direction et intensité)								
	Vagues (hauteur, direction, période)								
	Niveau de la mer								
	Pression atmosphérique								
	Courants (direction et intensité)								
	Autre								
Paramètres chimiques et physiques	Profondeur								
	Température								
	Salinité								
	Densité								
	Oxygène dissout								
	Chlorophylle								
	PH								
	Turbidité								
Sédiments en suspension	Autre								
	SSC (valeurs background)								
	Diamètre moyen								
Contaminants :									
Autre :									

EXEMPLE DE FICHE D'INFORMATION SUR LE PROJET EN COURS D'OPÉRATION (FIP-ECO) (*)

-- Informations et données environnementales et opérationnelles utiles pour la vérification des études de modélisation du projet considéré pendant l'exécution des activités et pour la réalisation d'études de modélisation pour de futurs projets --

LES COMPARTIMENTS ENVIRONNEMENTAUX		LES CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES ET SÉDIMENTOLOGIQUES DES FONDS MARINS DES ZONES CONCERNÉES ET PROCHES DE CELLES QUI SONT CONCERNÉES PAR L'INTERVENTION							
		Paramètres mesurés	Valeur	Unité de mesure	Méthodes d'échantillonnage				Notes
					Instruments utilisés	Nombre de stations d'échantillonnage et codification	Coordonnées et profondeur	Distance par rapport à toute source de remise en suspension/libération	
SÉDIMENT	Type et résistance au cisaillement								
	Densité								
	Distribution granulométrique								
	Diamètre moyen								
	% de sédiments fins								
	Vitesse critique de remise en suspension (mesurée ou estimée)								
	Contenu d'eau								
	Contaminants :								
	Autre								

CONDIZIONI METEOROLOGICHE E PARAMETRI FISICO-CHIMICI DELLA COLONNA D'ACQUA (*)									
Parametri misurati	Valore o riferimento con le serie di dati	Unità di misura	Metodi di campionamento					Note	
			Strumenti utilizzati	Numero di stazioni di campionamento e codifica	Coordinate e profondità	Distanza dell'attrezzo di dragaggio e di altre fonti di rilascio in sospensione/liberazione	Frequenza e durata del campionamento		
Dati meteorologici e idrodinamici	Vento (direzione e intensità)								
	Vaghi (altezza, direzione, periodo)								
	Livello del mare								
	Pressione atmosferica								
	Correnti (direzione e intensità)								
	Altro								
Parametri chimici e fisici	Profondità								
	Temperatura								
	Salinità								
	Densità								
	Ossigeno disciolto								
	Clorofilla								
	PH								
	Turbidità								
SSC	SSC vicino alle macchine di lavoro (Terme sorgente)								
	SSC in zone non disturbate dai lavori (verifica dei valori di background)								

		Diamètre moyen							
		Autre							
	Contaminants :								
	Autre :								
INFORMATIONS SUR LES MODALITÉS TECHNIQUES ET OPÉRATIONNELLES (*)									
CONDITIONS D'UTILISATION	Paramètres de fonctionnement	Valeur - fourchette de variabilité	Unité de mesure	Description					Notes
	Type de drague/engin								
	Mode de chargement/transport								
	Profondeur de travail (max-min)								
	Puissance de la pompe ou capacité du godet								
	Productivité								
	Profondeur de coupe déclarée (en cas d'excavation)								
	Épaisseur de revêtement déclarée (en cas de déversement)								
	Densité du sédiment déplacé								
	Débit de décharge/remise en suspension à proximité de la canalisation/du godet								
	Mode de libération (en bas, sur la colonne, etc.)								
Autre									
CYCLE DE TRAVAIL	Date de début de la session du cycle de travail								
	Date de fin de la session du cycle de travail								
	Anomalies/interruptions éventuelles des travaux								
	Vitesse de déplacement de la drague								
	Position de la drague								
	Volumes déplacés								
	Surface d'excavation								

	Autre			
MESURES DE CORRECTION ET D'ATTÉNUATION				
CONDITIONS D'UTILISATION	Caractéristique	Description	Localisation, profondeur, extension	Notes
	Type mesure			
	Date installation			
	Date retrait			
	Autre			
(*) A compléter de préférence à chaque changement de session de travail (et de procédures opérationnelles) et à chaque changement significatif des conditions météorologiques et maritimes afin de maximiser l'utilité des données environnementales acquises (pour le projet considéré et les projets futurs)				

EXEMPLE DE FICHE D'INFORMATION SUR UN PROJET POST OPERAM (FIP-PO) (**)

-- Informations et données environnementales à la fin des opérations utiles pour la vérification des études de modélisation à la fin des opérations --

LES COMPARTIMENTS ENVIRONNEMENTAUX		CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES, MORPHOLOGIQUES ET SÉDIMENTOLOGIQUES DES FONDS MARINS DANS LES ZONES CONCERNÉES ET À PROXIMITÉ DU LIEU D'INTERVENTION							
		Paramètres mesurés	Valeur	Unité de mesure	Méthodes d'échantillonnage				Notes
					Instruments utilisés	Nombre de stations d'échantillonnage et codification	Coordonnées et profondeur	Distance par rapport à toute source de remise en suspension/libération	
SÉDIMENT	Type et résistance au cisaillement								
	Densité								
	Distribution granulométrique								
	Diamètre moyen								
	% de sédiments fins								
	Vitesse critique de remise en suspension (mesurée ou estimée)								
	Contenu d'eau								
	Contaminants								
	Taux de dépôt								
	Relevé bathymétrique (contrôle épaisseur excavation/recouvrement)								
	Autre								

CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA COLONNE D'EAU									
Paramètres mesurés	Valeur ou référence joint avec les séries de données	Unité de mesure	Méthodes d'échantillonnage					Notes	
			Instruments utilisés	Nombre de stations d'échantillonnage et codification	Coordonnées et profondeur	Distance par rapport à toute source de remise en suspension/libération	Fréquence et durée de l'échantillonnage		
Données météorologiques et hydrodynamiques	Vent (direction et intensité)								
	Vagues (hauteur, direction, période)								
	Niveau de la mer								
	Pression atmosphérique								
	Courants (direction et intensité)								
	Autre								
Paramètres chimiques et physiques	Profondeur								
	Température								
	Salinité								
	Densité								
	Oxygène dissout								
	Chlorophylle								
	PH								
	Turbidité								
Lecture des solides suspendus	Autre								
	SSC								
	Diamètre moyen								
Contaminants :	Autre								
	Autre :								

(**) À compléter si le suivi des effets après l'opération est prévu conformément aux objectifs environnementaux et de projet des opérations et aux résultats des études.