

Projet d'Innovation et de Recherche (PRI) 2024-2025

Valorisation des sédiments pollués à terre



Rotodevaseur Source OFB François Colas

Valorisation des sédiments pollués à terre

Comparaison des méthodes de traitement et évaluation de leur impact
environnemental et économique

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Abstract

La rédaction de ce rapport a été relue et corrigée grammaticalement grâce à "Gemini" et "ChatGPT". Ces outils sont des agents conversationnels utilisant l'intelligence artificielle pour comprendre et répondre à des requêtes écrites. Gemini est développé par Google, tandis que ChatGPT est développé par OpenAI. Bien que ces outils soient sujets à des controverses, notamment en ce qui concerne les questions de propriété intellectuelle (puisque'ils ne citent pas systématiquement leurs sources), ils restent extrêmement utiles pour corriger la grammaire et améliorer la clarté des textes.

Confronté(e) à des difficultés linguistiques dues à la dysorthographe, l'utilisation de l'intelligence artificielle me permet de gagner en autonomie dans l'écriture. Pour ce rapport, j'ai utilisé Gemini pour la relecture et les corrections grammaticales, ainsi que ChatGPT pour m'assister dans la rédaction et la structuration du corps du texte.

Lors de l'utilisation de ces outils, des précautions spécifiques ont été prises : ni Gemini ni ChatGPT n'ont été sollicités pour ajouter des informations externes ou des idées au contenu du rapport. Leur usage s'est limité à l'amélioration de la grammaire, de la syntaxe et de la cohérence. Chaque suggestion générée par ces outils a été minutieusement revue afin d'assurer son exactitude, sa cohérence et sa conformité avec le message souhaité.

Cette approche collaborative met en évidence le potentiel de l'intelligence artificielle pour surmonter les barrières linguistiques tout en maintenant une rigueur intellectuelle et une supervision personnelle dans la rédaction académique.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,

Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement

Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail et mon accompagné sur mon semestre.

Tout d'abord, je souhaite remercier Madame Marina Vinot, ma tutrice académique, pour son accompagnement constant, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de ce semestre. Son expertise et son soutien ont été déterminants pour le bon déroulement de mon projet ainsi que de ma formation.

Je tiens également à remercier chaleureusement Madame Sofie Finet et Monsieur David Taja, qui m'ont accueilli au sein d'Actierra. Leur bienveillance, leur encadrement et leur disponibilité ont grandement facilité mon intégration et m'ont permis de mener à bien mes missions dans un cadre professionnel enrichissant et motivant.

Enfin, je remercie mes proches pour leur soutien indéfectible, leur compréhension et leur encouragement tout au long de cette période intense.

Sommaire

Table des matières

Avertissement	3
Abstract	3
Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement	4
Remerciements	5
Sommaire	6
Introduction.....	7
Problématisation du sujet et intérêt	7
Contexte et enjeux liées aux sédiments pollués	7
Objectif de l'étude.....	10
Etat de l'art : connaissances actuelles sur les sédiments et leurs traitements.....	11
Les sédiments pollués : formation, pollutions et gestion	11
Les opérations de dragage et de curage	16
Gestion a terre des sédiment pollués	19
Analyse des voies de valorisation.....	23
Protocole	23
Résultat.....	24
Analyse	30
Conclusion et Discussion	32
Conclusion	32
Discussion.....	32
Bibliographie.....	34

Table des tableaux et figures

Tableau 1:Impact possible liées aux opérations de dragage et curage Source INERIS OFB 2012.....	19
Tableau 2 Synthèse des impacts es différente voie de valorisation des sédiment pollués	30
Figure 1: Classe de taille de sédiment Source :geocaching	11
Figure 2: Enjeux liées à la présence de sédiment Source OFB	12
Figure 3 : Méthode d'évaluation de la contamination des sédiments Source SedNet 2004	15
Figure 4: Schéma de différents dispositifs de dragage.....	17

Introduction

Problématisation du sujet et intérêt

La gestion des sédiments pollués constitue un défi majeur pour de nombreux acteurs du secteur environnemental, notamment dans le cadre des opérations de dragage. Traditionnellement, une grande partie des sédiments pollués est rejetée en mer, mais cette pratique va devenir interdite en 2025, suite à l'entrée en vigueur de la Loi Leroy. Cela signifie qu'une quantité importante de sédiments pollués devra désormais être valorisée à terre. Cependant, la gestion de ces sédiments présente des obstacles multiples : la capacité de stockage reste insuffisante, le coût de traitement est élevé et l'impact environnemental des méthodes de gestion existantes est souvent mal maîtrisé.

Les polluants contenus dans ces sédiments, tels que les métaux lourds, les hydrocarbures et les perturbateurs endocriniens, nécessitent des traitements spécifiques. Les techniques actuelles de valorisation, telles que la phytoremédiation ou la bioremédiation, ne permettent pas toujours de garantir un traitement complet, surtout lorsque ces polluants sont présents à faible concentration ou dans des sédiments hétérogènes. Cela soulève plusieurs questions concernant l'efficacité, la rentabilité et l'impact écologique des différentes méthodes proposées pour leur valorisation à terre.

La question centrale est donc la suivante : quelles sont les méthodes de valorisation les plus efficaces et durables pour traiter les sédiments pollués à terre, tout en minimisant leur impact environnemental et en garantissant leur rentabilité économique ?

Le sujet de la valorisation des sédiments pollués à terre, ainsi que la comparaison des coûts environnementaux, s'inscrit dans ma volonté d'allier mon domaine de formation, les milieux aquatiques, à une problématique majeure de la transition écologique : la quantification des impacts environnementaux, notamment des émissions de gaz à effet de serre. Cette réflexion prolonge les travaux initiés lors de mon stage de 4^e année à l'Université d'Aarhus, au Danemark, où j'ai étudié les émissions de gaz à effet de serre des tourbières restaurées, et s'aligne avec les priorités stratégiques de mon entreprise, Actierra, dans laquelle j'effectue cette année un contrat de professionnalisation.

Mon expérience au Danemark a mis en lumière l'importance des sols dégradés dans les dynamiques environnementales, en particulier leur coût carbone et leur rôle dans les processus de dégradation, de restauration écologique et de valorisation. Parallèlement, mon entreprise Actierra, bureau d'études spécialisé dans la transition écologique, est fortement impliquée en recherche et développement. Actierra intervient dans des projets touchant à sept domaines d'expertise : climat, eau, biodiversité, bâtiments et aménagements durables, environnement réglementaire, ainsi que le pilotage de projets. Et en parallèle de ses missions opérationnelles, Actierra consacre plus de 18 500 heures annuelles à l'innovation, avec des travaux portant sur des sujets tels que la gestion des terres polluées et des boues de dragage.

Contexte et enjeux liés aux sédiments pollués

Pollution des sédiments en France

Les sédiments aquatiques, qu'ils soient marins ou fluviaux, proviennent de la déposition de particules transportées par l'eau. Composés de matières organiques et inorganiques, ces matériaux jouent un

rôle fondamental dans le maintien de la biodiversité et la qualité des habitats aquatiques. Toutefois, lorsqu'ils sont exposés à des sources de pollution telles que les rejets industriels, les pesticides agricoles ou les hydrocarbures, ils se contaminent et deviennent des vecteurs de cette pollution (*Des pesticides dans les océans, quelles conséquences ?*, s. d. Ifremer)

Les sédiments agissent comme des réservoirs naturels pour certains contaminants qui s'y accumulent au fil du temps, notamment ceux ayant une forte affinité pour la matière organique sédimentaire (OFB, 2019). Parmi ces contaminants figurent :

- les métaux lourds (Mercure, plomb, cadmium)
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
- les polychlorobiphényles (PCB)
- les dioxines et les furanes (PCDD/F)
- les pesticides organochlorés (DDT et produits de dégradation)
- les retardateurs de flamme bromés (RFB)
- les perturbateurs endocriniens (PE)

Ainsi, les sédiments représentent un réservoir naturel de contaminants qui peuvent, sous certaines conditions, se transformer en source de pollution. En effet, lors d'événements comme les crues, les chasses ou les curages (phénomènes physiques), la bioturbation (phénomène biologique), ou encore des modifications physico-chimiques de l'interface eau-sédiment, ces contaminants peuvent être remis en suspension et se diffuser dans l'environnement (*Gestion des sédiments contaminés en milieux aquatiques*, s. d. OFB).

Selon leur biodisponibilité, ces substances chimiques peuvent représenter un danger pour les communautés biologiques vivant dans le compartiment sédimentaire, telles que les organismes benthiques. De plus, elles peuvent exercer une toxicité directe sur ces organismes et se propager à travers les réseaux trophiques, par des processus de bioaccumulation et de bioamplification, affectant ainsi l'ensemble des organismes de la colonne d'eau (Förstner & Müller, 1981). La contamination des sédiments par des substances chimiques peut ainsi, dans certains cas, compromettre l'atteinte du bon état écologique des masses d'eau (*Les politiques pour la préservation de la qualité des milieux aquatiques et leurs déclinaisons réglementaires*, s. d.) .

Loi Leroy et enjeux liés à la gestion des sédiment pollués

Les sédiments aquatiques peuvent interférer avec les usages de l'eau et des milieux aquatiques. Leur gestion est donc essentielle pour préserver les fonctionnalités écologiques des cours d'eau tout en garantissant le bon déroulement de certaines activités socio-économiques, telles que la navigation et la production d'énergie hydroélectrique, et en assurant la sécurité des populations riveraines, notamment pour la prévention des risques d'inondation et de crue. La gestion des sédiments peut se faire de deux manières :

- Dans la voie d'eau, par remise en suspension des sédiments,
- À terre, par mise en dépôt des sédiments ou leur valorisation.

Cependant, ces options de gestion ne peuvent être envisagées que si les sédiments ne représentent pas un danger pour l'environnement et les organismes du milieu récepteur. Chaque année, en France,

un volume important de sédiments est extrait dans le cadre de travaux liés à la préservation des usages de l'eau ou à la protection des populations avec 1,3 millions de m³ de sédiments dragués par an

. Par exemple, plus de 50 millions de m³ de sédiments marins sont dragués, dont 90 % sont rejetés directement en mer. Ces rejets, bien qu'essentiels pour le maintien des activités portuaires et navigables, entraînent des perturbations importantes des écosystèmes marins, telles que la destruction d'habitats, l'altération de la qualité de l'eau et des fonds marins, en plus du risque de pollution lié à l'opération de dragage (Leroy & Collet, 2022).

Face à ces enjeux, la Loi Leroy pour l'économie bleue, qui entrera en vigueur au 1er janvier 2025, impose de nouvelles régulations en matière de gestion des sédiments. Cette loi interdit désormais le rejet en mer de sédiments pollués, afin de préserver les écosystèmes marins. Toutefois, cette interdiction oblige à une gestion à terre des sédiments dragués, ce qui présente plusieurs défis majeurs : la gestion des volumes croissants avec une répercussion économique : Les installations terrestres devront traiter des quantités bien supérieures aux capacités actuelles, avec des coûts de gestion estimés à **120 €/tonne** aujourd'hui (Barczyk, 2022).

La Loi Leroy pour l'économie bleue représente ainsi un tournant important pour la gestion durable des sédiments, mais elle impose également une réévaluation des infrastructures et des pratiques de gestion des sédiments à travers toute la France.

Consommation des espaces naturelle

La mise en dépôt des déblais de curage et des sédiments marins est régie par la réglementation de la loi sur l'eau, qui prend en compte plusieurs facteurs cruciaux, notamment la qualité des sédiments, le suivi environnemental et l'intégration paysagère des sites de dépôt. La gestion de ces matériaux nécessite de s'assurer qu'ils ne constituent pas un danger pour l'environnement et que leur gestion respecte des normes strictes en matière de sécurité et de protection des écosystèmes. En outre, dans le cadre de leur stockage en vue d'une réutilisation ou valorisation, les matériaux doivent faire l'objet d'une autorisation spécifique au titre des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), particulièrement lorsque la quantité de sédiments excède 2000 tonnes, une condition qui s'applique dans la majorité des cas (RP-53470-FR.pdf, s.d.).

La France, confrontée à une urbanisation croissante, consomme chaque année 24 000 hectares d'espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF) pour répondre aux besoins en aménagements urbains et infrastructurels (*Le besoin en résidences principales, premier facteur de transformation des espaces naturels, agricoles et forestiers pour l'habitat - Insee Première - 1976*, s. d.). Cette pression sur les espaces naturels accentue la dégradation des écosystèmes et entre en contradiction avec les objectifs fixés par la **Loi Climat et Résilience** de 2021, qui vise la **réduction de moitié de la consommation d'ENAF d'ici 2031** et l'atteinte du **zéro artificialisation nette (ZAN) des sols d'ici 2050**.

Le **principe de zéro artificialisation nette (ZAN)** consiste à compenser toute nouvelle artificialisation des sols par la renaturation ou la reconquête de terres dégradées, avec pour objectif final d'arrêter l'étalement urbain sur des espaces naturels, agricoles ou forestiers. Ce principe s'inscrit dans une démarche de préservation de la biodiversité et de gestion durable des sols, permettant de limiter les impacts négatifs sur les écosystèmes tout en soutenant le développement économique et urbain. Autrement dit, chaque mètre carré de sol artificialisé doit être compensé par un retour à l'état naturel.

ou agricole de surfaces équivalentes, garantissant ainsi un équilibre entre urbanisation et préservation des espaces naturels.

Dans ce contexte, le stockage des sédiments pollués à terre pourrait aggraver la problématique de l'artificialisation des sols, en particulier si des volumes importants de terres sont affectés au stockage de ces matériaux. Cette situation souligne d'autant plus la nécessité de développer des solutions de valorisation durable des sédiments, permettant de réduire l'impact environnemental tout en favorisant leur réutilisation dans des projets tels que la construction, l'aménagement paysager ou la réhabilitation d'espaces naturels. Il devient donc impératif de mettre en place des alternatives efficaces qui répondent à la fois aux défis environnementaux, sociaux et économiques, tout en respectant les engagements de la France en matière de transition écologique.

Objectif de l'étude

Cette étude a donc pour objectif d'examiner et de comparer plusieurs méthodes de traitement et de valorisation des sédiments pollués à terre, en tenant compte des critères suivants :

1. Efficacité des techniques de traitement : évaluer dans quelle mesure les différentes méthodes (phyto-remédiation, bioremédiation, incinération, etc.) permettent de réduire ou éliminer les contaminants présents dans les sédiments.
2. Impact environnemental : analyser les effets de chaque technique de traitement sur l'environnement, notamment en termes de pollution résiduelle, de préservation de la biodiversité et d'émissions de gaz à effet de serre.
3. Coût économique : réaliser un chiffrage des coûts associés à chaque méthode de valorisation, en incluant les coûts directs (traitement, stockage, transport) et les coûts indirects (impacts environnementaux, régulation).
4. Durabilité des processus : évaluer la pérennité des méthodes de traitement à long terme et leur intégration dans un modèle de gestion durable des sédiments pollués.

L'objectif final est de proposer une synthèse des différentes options disponibles, accompagnée de recommandations sur les méthodes les plus adaptées en fonction des types de sédiments, des contraintes économiques et des enjeux environnementaux locaux.

Ce rapport est structuré en plusieurs parties pour analyser les méthodes de gestion et de valorisation des sédiments pollués à terre.

La première partie, l'état de l'art, présente les techniques actuelles de gestion des sédiments et explore les méthodes de valorisation à terre. La seconde, la méthodologie, détaille les différentes méthodes de traitement des sédiments et les critères utilisés pour les évaluer.

La troisième partie, la comparaison des méthodes de traitement, compare plusieurs techniques en termes d'impact environnemental et d'efficacité. La quatrième partie, le bilan carbone et l'analyse coût/gain écologique, analyse les émissions de CO₂ et les coûts associés à ces méthodes.

Etat de l'art : connaissances actuelles sur les sédiments et leurs traitements

Les sédiments pollués : formation, pollutions et gestion

Origine et nature des sédiments

Les sédiments, matériaux solides issus principalement de l'érosion des roches, jouent un rôle essentiel dans les dynamiques des milieux aquatiques. Ils se forment à partir de processus naturels tels que l'érosion mécanique, chimique ou biologique et sont transportés par les cours d'eau, les vents ou les glaces avant d'être déposés. On distingue principalement trois types de sédiments : alluviaux, marins et glaciaires. Les sédiments alluviaux, déposés dans les rivières, fleuves et plaines alluviales, se composent d'un mélange de particules fines (Figure 1) comme les argiles et limons, ainsi que de sables et graviers, leur composition variant selon la nature des sols traversés et du trie liée à la puissance du cours d'eau qui les transportent. Les sédiments marins, présents dans les zones côtières et les fonds marins, résultent d'un mélange de particules organiques et inorganiques issues des apports fluviaux ou de la décomposition des organismes marins. Enfin, les sédiments glaciaires, transportés et déposés par les glaciers, se caractérisent par des dépôts mal triés contenant des fragments de tailles variées (Dyer, 1986).

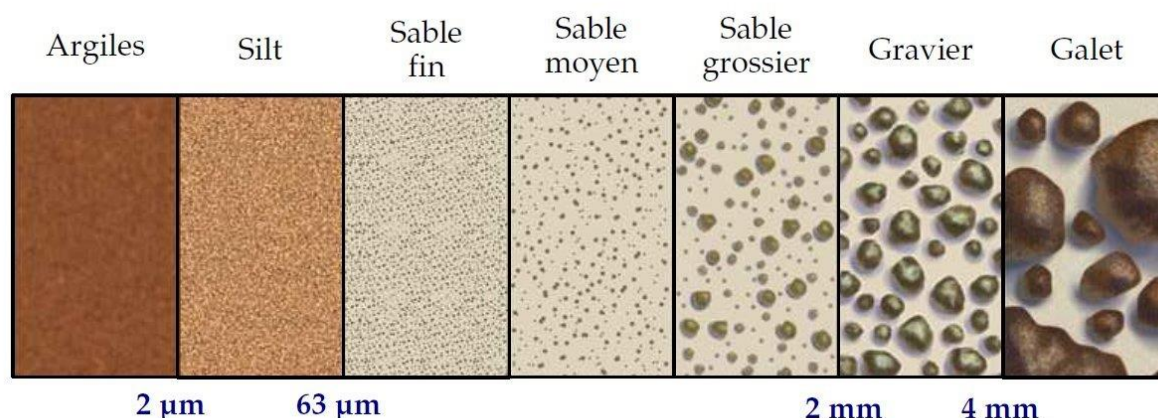


Figure 1: Classe de taille de sédiment Source :geocaching

La formation des sédiments est un processus continu. L'érosion mécanique, par l'action des eaux, du vent ou de la glace, fragmente les roches en particules. Parallèlement, l'érosion chimique, facilitée par les eaux riches en dioxyde de carbone ou légèrement acides, dissout les minéraux, libérant ions et particules fines. Enfin, les activités biologiques, telles que la décomposition d'organismes vivants, contribuent également à la production de particules organiques, en particulier dans les milieux aquatiques (Einsele, 2000). Ces particules sont ensuite transportées puis se déposent lorsque la vitesse de l'agent de transport diminue ou lorsque cet agent de transport disparaît (fonte de la glace par exemple).

Même si la formation, le transport et le dépôt des particules sont des phénomènes naturels, ces processus ont été profondément perturbés par la mise en place d'ouvrages hydrauliques tels que les

barrages, ainsi que par la modification de la géométrie des réseaux hydrauliques. Ces interventions ont créé des zones préférentielles d'érosion et des zones lenticues où les sédiments s'accumulent. Aujourd'hui, ces sédiments posent plusieurs problématiques (Figure 2). Sur le plan de la sécurité, ils peuvent provoquer des aléas liés aux inondations en surélevant la ligne d'eau. Sur le plan fonctionnel, ils entraînent des problèmes d'usage comme l'ensablement des chenaux navigables ou des ports, nécessitant leur extraction.

Dans le contexte d'opérations de curage des cours d'eau situés en amont d'ouvrages hydrauliques, ainsi que dans les zones estuariennes ou portuaires, les sédiments sont généralement constitués de particules fines telles que les argiles, les limons, et parfois de matières organiques en décomposition. Ces dépôts proviennent principalement de l'érosion des sols environnants, du transport fluvial, et de l'accumulation de matières organiques et inorganiques apportées par les cours d'eau et les activités anthropiques locales (Mehta et al., 2014; Westrich & Förstner, 2007).

Plusieurs options de gestion des sédiments sont actuellement mises en œuvre. Celles-ci consistent, d'une part, à remettre les sédiments en suspension dans les cours d'eau ou en mer, et d'autre part, à les traiter à terre par mise en dépôt ou valorisation. Le relargage dans le cycle de l'eau ne peut être envisagé que si les sédiments ne présentent pas de danger pour l'environnement ni pour les organismes du milieu récepteur, conformément à la réglementation en vigueur. Cela nécessite une évaluation préalable du danger avant toute opération.

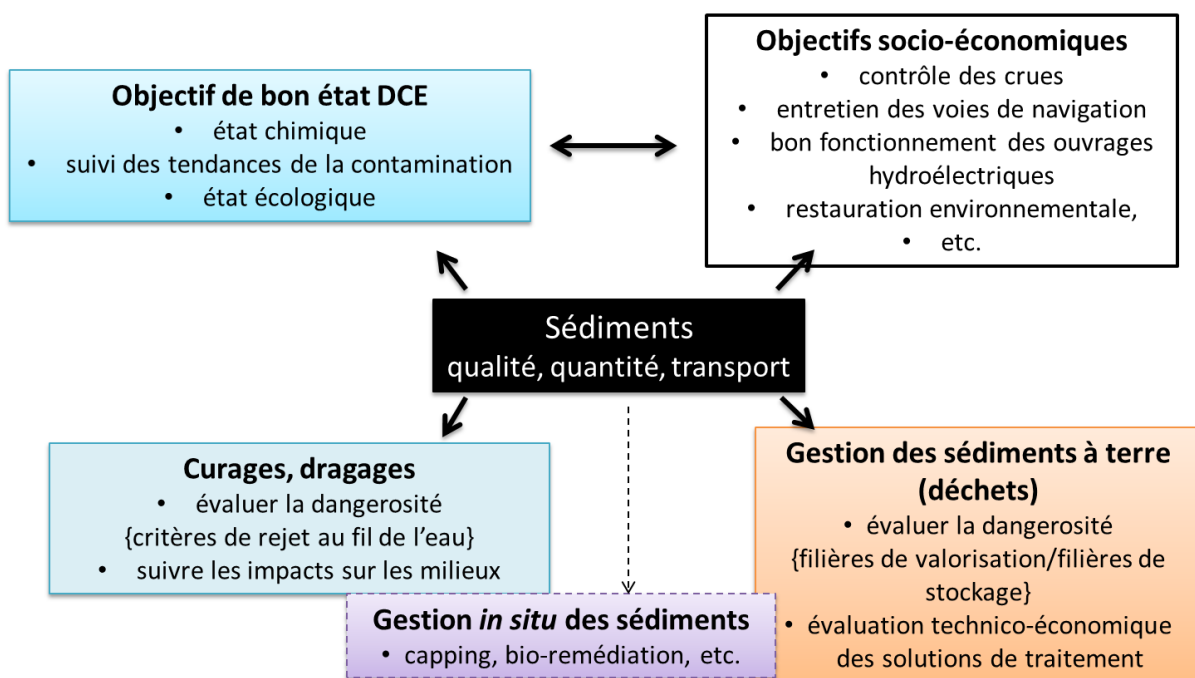


Figure 2: Enjeux liées à la présence de sédiment Source OFB

Les sédiments comme réservoirs de polluants

Les sédiments peuvent être contaminés par une large gamme de polluants. La capacité des sédiments à retenir les polluants dépend de plusieurs facteurs environnementaux qui influencent les mécanismes d'adsorption.

Les polluants organiques hydrophobes, tels que les pesticides et les hydrocarbures, s'accumulent principalement dans la matière organique des sédiments. Ce phénomène résulte de forces hydrophobes et de l'adsorption sur les groupes fonctionnels présents dans les matières organiques (Zhang et al., 2014). Les hydrocarbures peuvent également être piégés dans les pores de la matière organique ou dans les espaces interstitiels, ce qui augmente leur rétention dans les sédiments.

La granulométrie des sédiments est un facteur crucial dans la rétention des polluants. Les particules fines, comme les argiles et les limons, ont une surface spécifique beaucoup plus grande que les particules grossières comme les sables, ce qui leur permet d'adsorber davantage de polluants. Les particules fines, en raison de leur petite taille et de leur surface étendue, offrent davantage de sites d'adsorption pour les polluants et possèdent une plus grande capacité d'échange cationique, facilitant ainsi la capture des métaux lourds (Förstner & Salomons, 2010).

Le pH et le potentiel redox des sédiments jouent également un rôle fondamental dans la capacité des sédiments à adsorber ou à libérer des polluants. Un pH bas favorise la solubilisation de certains métaux lourds, réduisant ainsi leur rétention dans les sédiments. De plus, dans des conditions anoxiques, certains polluants, comme les sulfures métalliques, peuvent se dissoudre, libérant ainsi les métaux dans l'environnement (Eggleton & Thomas, 2004).

Une forte teneur en matière organique dans les sédiments augmente leur capacité à retenir les polluants organiques hydrophobes. La matière organique agit comme un réservoir, offrant des sites d'adsorption pour les hydrocarbures et les pesticides. Cependant, cette matière organique peut également favoriser la libération de certains métaux lourds par complexation avec des acides humiques, ce qui peut entraîner une bioaccumulation et une libération des polluants dans les systèmes aquatiques (Warren & Haack, 2001).. Les principales catégories de polluants retrouvés incluent les éléments traces métalliques, tels que le cadmium, le plomb et le mercure, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphényles (PCB), les dioxines et furanes (PCDD/F), ainsi que les pesticides organochlorés comme le DDT et ses produits de dégradation. On y trouve également des retardateurs de flamme bromés (RFB) et des tributyltins (TBT). En outre, des résidus médicamenteux et des intrants agricoles, comme les nitrates et les phosphates, peuvent être présents dans les sédiments, bien que certains de ces contaminants soient difficiles à détecter, comme les résidus médicamenteux, tandis que d'autres, comme les nitrates et les phosphates, se dégradent naturellement au fil du temps.

Ces polluants proviennent principalement des activités industrielles et urbaines. Par exemple, les métaux lourds, issus des rejets industriels, des activités minières ou des effluents urbains, sont fréquemment relâchés dans les milieux aquatiques. En France, environ 12 000 tonnes de métaux lourds sont libérées chaque année dans les milieux aquatiques (IFREMER, 2022). De plus, les HAP et les dioxines/furanes (PCDD/F), produits respectivement par la combustion d'énergies fossiles et la combustion de matières organiques, sont souvent retrouvés dans les ports et les lacs, où les activités industrielles et maritimes génèrent des niveaux importants de pollution (Ministère de la Transition Écologique, 2023). Bien que l'utilisation des pesticides organochlorés, tels que le DDT, soit désormais

interdite, des résidus de ces substances, ainsi que de leurs produits de dégradation, continuent d'être présents dans les sédiments. Selon un rapport de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée (2021), environ 70 % des cours d'eau français contiennent des résidus de pesticides.

La gestion des sédiments pollués est particulièrement cruciale, car bien que des substances telles que les PCB et les tributylétains (TBT) aient été progressivement interdites en raison de leur toxicité élevée, ces contaminants persistent dans les stocks de sédiments. Ces derniers représentent ainsi un danger continu pour l'environnement et la santé publique, d'autant plus que ces polluants sont souvent persistants, bioaccumulables et difficilement éliminables une fois déposés dans l'environnement. La remise en mouvement des stocks sédimentaires lors de brassages physiques (crue, chasse, curage, etc.), biologiques liés à la bioturbation, ou encore la désorption lors de changements physico-chimiques du milieu, constitue le plus grand risque si aucune opération n'est prévue. De plus, avant toute opération de gestion, il est nécessaire d'évaluer leur danger potentiel.

Evaluation de la contamination et de l'impact des sédiments pollués

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE, 2000/60/CE) impose une surveillance régulière des sédiments afin d'identifier et de suivre les tendances à long terme des substances prioritaires qui s'y accumulent. Ces sédiments, éléments clés des écosystèmes aquatiques, peuvent être altérés par des contaminants chimiques ou un excès de nutriments tels que l'azote et le phosphore. Ces altérations compromettent les « éléments de qualité biologique » (macrophytes, phytoplancton, invertébrés et poissons), mettant ainsi en péril l'atteinte des objectifs de bon état écologique définis par la DCE. Lorsqu'une contamination des sédiments est suspectée de contribuer au déclassement écologique d'un site, un diagnostic précis est nécessaire pour en identifier les causes et définir des mesures de gestion appropriées (Figure 3).

L'Office Français de la Biodiversité (OFB) a développé une démarche structurée en trois étapes pour évaluer la contamination des sédiments. La première consiste en l'analyse des concentrations de contaminants, comparées à des seuils de qualité définis par les normes européennes et des arrêtés spécifiques (par exemple, l'arrêté du 9 août 2006). Ces seuils incluent :

- **Niveau N1** : concentration en dessous de laquelle l'immersion des sédiments est autorisée sans étude d'impact préalable.
- **Niveau N2** : concentration au-dessus de laquelle l'immersion est interdite, sauf justification que cette option est la moins dommageable pour l'environnement.

Pour les sédiments continentaux, des analyses chimiques sont requises afin de limiter la remise en suspension, le régalaie ou le dépôt de sédiments, qui peuvent avoir des impacts significatifs sur les écosystèmes. Les contaminants analysés incluent les métaux lourds, les PCB totaux et les HAP totaux, avec des seuils de concentration spécifiques comme « S1 », permettant d'évaluer leur dangerosité.

La deuxième étape repose sur l'utilisation de bio-essais avec des organismes modèles pour mesurer les effets toxiques des contaminants, complétés par des observations sur les communautés aquatiques in situ. Une approche avancée, l'*Effect-Directed Analysis* (EDA), permet d'identifier les substances responsables des effets observés tout en prenant en compte leur biodisponibilité et les interactions chimiques complexes.

La troisième étape concerne la modélisation de la bioaccumulation des contaminants dans les organismes aquatiques. En collaboration avec l'INRAE, l'OFB a développé des outils tels que les facteurs d'accumulation sédiment-biote (BSAF) et des modèles biodynamiques. Ces modèles permettent d'établir des seuils critiques de contamination dans les sédiments, équivalents aux teneurs maximales autorisées dans les biotes. Ces seuils visent à protéger non seulement les organismes aquatiques, mais aussi les prédateurs supérieurs comme les oiseaux piscivores et les mammifères aquatiques, ainsi que les humains contre les risques liés à la consommation de produits de la pêche contaminés.

Enfin, l'évaluation des contaminants émergents joue un rôle croissant. Des technologies comme la spectrométrie de masse à haute résolution permettent de détecter de nouveaux contaminants, tels que les résidus pharmaceutiques et les microplastiques, souvent absents des réglementations actuelles. Une approche intégrée des risques (IRA) combine analyses chimiques, bioessais et modélisation pour une évaluation globale des impacts des sédiments contaminés. Des études récentes ont également mis en lumière des concentrations préoccupantes de composés perfluoroalkylés (PFAS) dans certains sédiments urbains, en raison de leur toxicité et de leur bioaccumulation. Ces méthodologies offrent une gestion optimisée des sédiments, garantissant la protection des écosystèmes aquatiques et de la santé publique en accord avec la réglementation en vigueur.

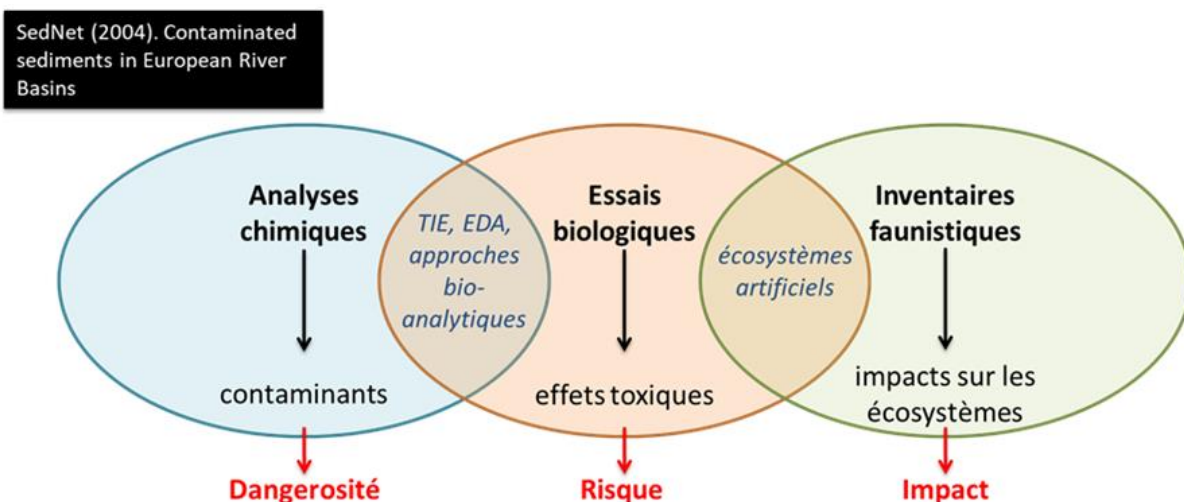


Figure 3 : Méthode d'évaluation de la contamination des sédiments Source SedNet 2004

Dans la majorité des cas, les sédiments extraits ou dragués sont considérés comme des déchets au sens de l'article L.541-1 du Code de l'environnement, issu de la loi de 1975 sur les déchets. Cet article stipule qu'est considéré comme déchet « tout bien meuble que son détenteur destine à l'abandon ». Les sédiments, sous-produits des opérations de dragage, ne constituent pas la finalité même de cette activité, qui vise principalement à rétablir un libre écoulement des cours d'eau ou à maintenir les capacités des voies navigables. Par conséquent, ces matériaux sont généralement destinés à l'abandon et, de ce fait, qualifiés de déchets.

Cependant, deux exceptions permettent de ne pas leur attribuer ce statut : Lorsque les sédiments extraits sont assimilables à des matériaux d'exploitation de carrières, ils peuvent être réutilisés comme matière première. Lorsque les sédiments dragués sont remis en suspension dans le milieu aquatique et que leur état ainsi que leur dangerosité pour l'environnement sont jugés négligeables.

Pour les sédiments contaminés, c'est-à-dire ceux dont les concentrations en contaminants excèdent les seuils « N1 » et « N2 » ou le seuil « S1 » définis par les arrêtés, des solutions spécifiques sont appliquées. Ces sédiments sont ramenés à terre. Lorsqu'ils sont gérés à terre, ils sont considérés comme des déchets et soumis à la réglementation en vigueur pour leur stockage. Ils doivent alors être entreposés dans des installations spécialement conçues pour les déchets, en respectant les normes environnementales en vigueur.

À l'issue de cette analyse de la pollution des sédiments, deux solutions sont envisagées. D'un côté, si les polluants sont considérés comme non dangereux, les sédiments peuvent être remis dans le milieu aquatique. Dans le cas contraire, ils doivent être traités à terre.

Les opérations de dragage et de curage

Techniques de dragage et curage

Le dragage et le curage sont des techniques essentielles pour la gestion des sédiments dans les milieux aquatiques, avec des applications variées selon les contextes environnementaux et les objectifs de chaque intervention.

Le dragage est principalement utilisé dans les zones portuaires, les voies navigables et les estuaires pour maintenir ou augmenter les profondeurs requises à la navigation. Parmi les principales techniques, on trouve le dragage mécanique, qui repose sur des pelles mécaniques ou des dragues à benne preneuse. Cette technique est idéale pour les sédiments cohésifs et les interventions précises, notamment en cas de contamination importante (Guerra et al., 2018). Le dragage hydraulique, utilisant des dragues à succion, est adapté aux grands volumes de sédiments meubles comme le sable ou la vase, fréquent dans l'entretien des chenaux maritimes (PIANC, 2008). Enfin, le dragage écologique, équipé de systèmes limitant la remise en suspension des sédiments, est privilégié dans les zones sensibles ou contaminées (Van Raalte, 2014).

De son côté, le curage concerne les plans d'eau continentaux et vise souvent à améliorer la qualité de l'eau ou préserver les écosystèmes. Le curage manuel, utilisé dans les petits cours d'eau, limite les perturbations, mais reste inefficace pour de grands volumes (OFB, 2020). Le curage mécanique mobilise des engins comme les pelles équipées de godets et s'applique aux sédiments compactés, fréquemment dans les canaux et rivières accessibles par voie terrestre (MEDDE, 2014). Le curage hydraulique, quant à lui, est adapté aux sédiments fins, notamment dans les lacs, mais nécessite un traitement des eaux de curage (Hakstege et al., 2005). Enfin, le curage écologique préserve la biodiversité tout en évitant la dispersion des polluants, souvent associé à des projets de restauration (OFB, 2020).

Le choix de la technique de dragage ou de curage dépend de plusieurs facteurs : la nature des sédiments, leur pollution, l'accessibilité du site et les objectifs du projet. Par exemple, le dragage hydraulique est adapté aux volumes importants, tandis que les techniques écologiques sont préférées dans les sites sensibles. En France, ces opérations sont encadrées par des réglementations strictes, notamment les arrêtés du 9 août 2006 et du 23 décembre 2009, pour limiter les impacts sur les écosystèmes.

En France, environ 50 millions de mètres cubes de sédiments sont dragués chaque année, principalement dans les ports maritimes et fluviaux (PIANC, 2008). Ces opérations, essentielles pour

garantir la navigabilité et limiter les risques d'inondations, mobilisent des techniques variées, chacune avec ses avantages et ses limites. (Figure 4)

Le **dragage mécanique** repose sur l'utilisation d'engins tels que des pelles mécaniques ou des dragues à benne preneuse. Ces équipements sont particulièrement efficaces pour les sédiments cohésifs (argiles et vases consolidées) et permettent une extraction précise, réduisant ainsi les risques de remobilisation des polluants. Leur coût initial est relativement faible comparé aux autres techniques, avec des opérations coûtant en moyenne entre 10 et 20 €/m³, selon la localisation et les volumes à extraire (Guerra et al., 2018). Cependant, cette méthode est moins adaptée aux grands volumes, car elle nécessite plus de temps et peut engendrer un compactage des sédiments restants. De plus, elle est limitée par la profondeur maximale que peuvent atteindre les équipements.

Le **dragage hydraulique**, basé sur des dragues à succion ou des dragues aspiratrices-relais, est mieux adapté aux grands volumes de sédiments meubles comme les sables et les limons. Ces dragues aspirent les sédiments à travers des tuyaux pour les transporter directement vers un site de dépôt ou un dispositif de traitement. En France, cette technique est couramment utilisée pour l'entretien des chenaux maritimes, comme dans le port de Dunkerque. Son coût varie entre 5 et 15 €/m³, ce qui en fait une solution plus économique pour les grands projets (PIANC, 2008). Néanmoins, elle présente l'inconvénient de générer des eaux chargées en particules fines, nécessitant une gestion post-traitement des boues aspirées. L'impact écologique est également important, notamment en termes de perturbation des écosystèmes aquatiques et de remise en suspension des polluants.

Le **dragage écologique**, enfin, s'appuie sur des équipements spécialisés comme les dragues à succion équipées de systèmes de confinement des particules. Il vise à réduire la dispersion des sédiments contaminés et à limiter l'impact sur les habitats aquatiques sensibles. Cette méthode est particulièrement prisée dans les zones protégées, comme les réserves naturelles ou les sites Natura 2000. Bien que ses avantages environnementaux soient significatifs, le dragage écologique est coûteux, avec des opérations atteignant jusqu'à 50 €/m³. Ce coût élevé est justifié par la complexité des équipements et des protocoles à respecter pour minimiser les impacts environnementaux (Van Raalte, 2014).

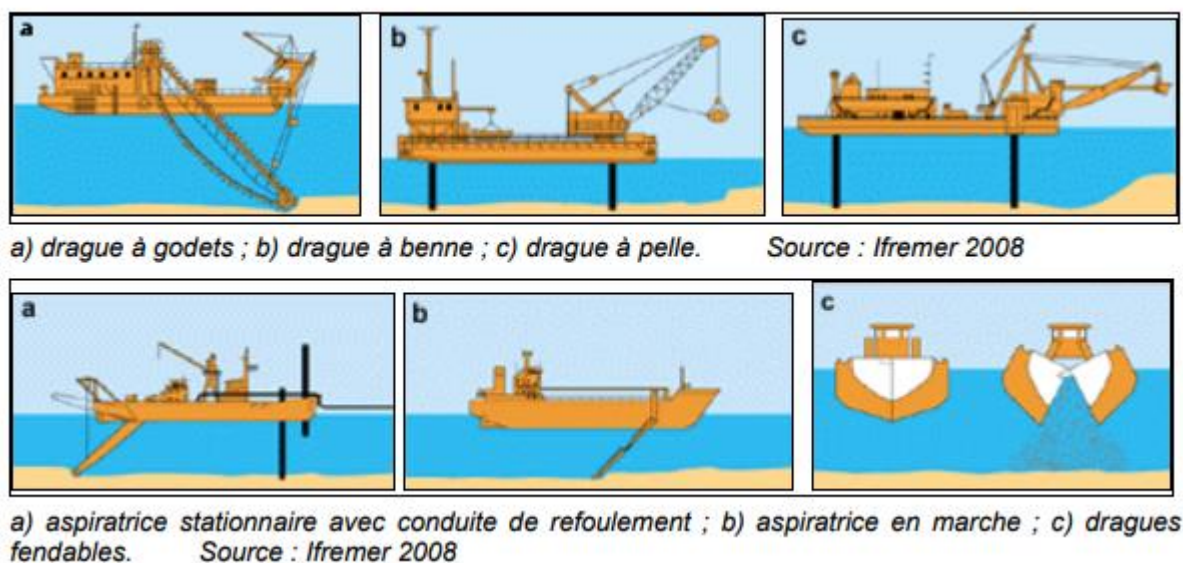


Figure 4: Schéma de différents dispositifs de dragage

En résumé, le choix de la technique de dragage repose sur un compromis entre efficacité, coûts et impacts environnementaux. Si le dragage hydraulique est privilégié pour sa rentabilité sur les grands volumes, le dragage mécanique reste incontournable pour les interventions précises. Quant au dragage écologique, il est essentiel dans les zones sensibles, bien que son coût et sa complexité limitent son usage à des cas spécifiques.

Problématiques associées

Chaque année, environ 50 millions de mètres cubes de sédiments sont extraits en France, principalement dans les ports et les voies navigables (PIANC, 2008). Ces volumes colossaux nécessitent des solutions de gestion adaptées, notamment en ce qui concerne leur transport, leur traitement et leur stockage. Un exemple emblématique est celui du port de Dunkerque, où 1,2 million de mètres cubes de sédiments ont été extraits en 2020.

Les travaux de dragage et de curage perturbent également les écosystèmes aquatiques de manière significative (Tableau 1). La remise en suspension des particules fines lors des opérations peut entraîner une augmentation de la turbidité de l'eau, ce qui limite la pénétration de la lumière et affecte la photosynthèse des végétaux aquatiques. Par ailleurs, les organismes benthiques, qui jouent un rôle clé dans l'écosystème, sont souvent directement impactés par ces perturbations.

Dans l'estuaire de la Gironde, par exemple, un projet de dragage a entraîné une remise en suspension des sédiments, affectant temporairement les populations d'anguilles européennes (*Anguilla anguilla*), une espèce en danger critique d'extinction (Guerra et al., 2018). De même, dans le cadre du projet de curage du lac du Bourget, des mesures spécifiques, comme l'utilisation de rideaux de turbidité, ont été nécessaires pour limiter la dispersion des polluants remobilisés et prévenir leur propagation en aval (OFB, 2020).

Les études menées par l'INERIS (2010, 2011) ont montré que les impacts du dragage, bien qu'importants, restent souvent limités dans le temps et dans l'espace. Par exemple, lors des travaux de curage du canal de Lens, les perturbations sur la qualité physico-chimique de l'eau, notamment en termes de métaux lourds, de nitrates et de turbidité, ont été observées sur des distances allant jusqu'à 2,5 kilomètres, mais les niveaux initiaux ont été rétablis dans l'heure suivant la fin des opérations (Alary et al., 2011).

La surveillance des impacts des opérations de dragage et de curage demeure toutefois un défi majeur. Les travaux de l'INERIS ont révélé deux principales difficultés : d'une part, la variabilité spatio-temporelle des paramètres de qualité de l'eau rend complexe la mesure précise des impacts ; d'autre part, il est souvent difficile d'évaluer la gravité de ces impacts, notamment en l'absence de référentiels pour certains polluants émergents.

Un exemple concret est le dépassement des seuils de concentration maximale admissible (CMA) pour certains polluants. Si ces dépassements peuvent être interprétés comme des impacts négatifs, ils doivent également être mis en perspective avec les bénéfices intrinsèques des travaux, comme l'amélioration de la navigabilité ou de la qualité écologique globale d'un site.

Enfin, les efforts méthodologiques récents, comme ceux menés par l'Institut Scientifique des Services Publics (ISSeP) lors du dragage du canal de Lens, visent à améliorer le suivi des rejets et à mieux comprendre les impacts sur les écosystèmes. Ces initiatives mettent en lumière la nécessité

d'approches intégrées, combinant mesures expérimentales et analyses de terrain, pour concilier les impératifs économiques et environnementaux.

Tableau 1: Impact possible liées aux opérations de dragage et curage Source INERIS OFB 2012

Type d'extraction	Opération post-extraction	Impact à l'extraction (A)	Impact au rejet (B)	Commentaire	
Mécanique	Remise dans la voie d'eau	++ physique - polluants	+++ physique - polluants	Mélange eau/sédiment post-extraction maximal Sédiments peu pollués Minimal réglementaire pour l'oxygène dissous dans la voie d'eau en aval du dragage ^a	
	Ressuyage (bassin temporaire ou permanent)		+/- physique + dissous - particulaire	Moindre mélange post-extraction, et limitation de la MES Limitation réglementaire des rejets	
	Séparation/déshydratation active		++/- physique ++/? dissous - particulaire	Physique et dissous : Mélange eau/sédiment post-extraction maximal, mais correctif (possible) dans la décantation (MES,...) Limitation réglementaire des rejets Rejet possible de floculants	
Hydraulique	Remise dans la voie d'eau	- physique - polluants	+++ physique - polluants	Mélange eau/sédiment maximal	Sédiments peu pollués Minimal réglementaire pour l'oxygène dissous dans la voie d'eau en aval du dragage ^a
	Ressuyage (bassin temporaire ou permanent)		++/- physique ++ dissous - particulaire		Limitation de la MES Limitation réglementaire des rejets
	Séparation/déshydratation active		++/- physique ++/? dissous - particulaire		Limitation réglementaire des rejets Physique et dissous : limitation (possible) dans la décantation (MES,...) Rejet possible de floculants

« physique » : impact sur des paramètres physiques du cours d'eau

« polluants » : impact sur les concentrations en polluants, sur fraction particulaire et dissoute.

- : impact négligeable / + : impact sensible / ++ : impact important / +++ : impact très important

^a Le minimal réglementaire pour l'oxygène dissous dans la voie d'eau en aval du dragage est valable indépendamment de l'opération post-extraction, pour les dragages d'entretien d'embée, et s'impose pour les dragages d'investissement selon l'arrêté préfectoral.

Gestion a terre des sédiment pollués

Traitements ex situ

Les traitements ex situ des sédiments extraits lors des opérations de dragage ou de curage impliquent des approches physiques, chimiques et biologiques. Chacune de ces méthodes repose sur des protocoles précis, exige des équipements spécifiques et présente des avantages ainsi que des inconvénients en termes de temps, de coûts, d'efficacité et d'impact environnemental.

Traitements physiques

Les traitements physiques sont principalement utilisés pour réduire le volume des sédiments ou isoler les contaminants, sans modifier leur nature chimique.

Déshydratation

Le processus de déshydratation repose sur l'élimination de l'eau contenue dans les sédiments, principalement à l'aide de filtres-presses ou de centrifugeuses. Par exemple, les filtres-presses, équipés de toiles filtrantes et de plaques compressantes, permettent de réduire le volume des sédiments de 30 à 50 %. Ce procédé nécessite une infrastructure relativement simple : une unité mobile (souvent montée sur remorque) ou une station fixe équipée d'un système hydraulique pour comprimer les sédiments.

En France, des projets dans le bassin de la Seine ont montré l'efficacité de cette technique, permettant de traiter jusqu'à 20 tonnes de sédiments par jour (Ports de Paris, 2021). Cependant, ces équipements consomment une quantité importante d'électricité, ce qui peut représenter jusqu'à 15 % du coût total de traitement.

Criblage

Le criblage est une méthode utilisée pour séparer les particules grossières (cailloux, coquillages) des fines. L'équipement comprend des cribles vibrants ou rotatifs, souvent montés sur des convoyeurs automatisés. Cette technique est particulièrement adaptée aux sédiments faiblement contaminés et ne nécessite pas de grandes infrastructures, mais elle est souvent combinée avec d'autres traitements. Par exemple, lors d'une opération dans le port de Marseille, 15 % des sédiments extraits ont été éliminés par criblage, facilitant ainsi leur valorisation en remblais (Grand Port Maritime de Marseille, 2020).

Traitements chimiques

Les traitements chimiques visent à neutraliser ou à stabiliser les polluants, en modifiant leur structure chimique pour réduire leur toxicité ou leur mobilité.

Stabilisation/Solidification

Cette méthode consiste à mélanger les sédiments avec des liants, tels que le ciment, la chaux ou les cendres volantes, pour immobiliser les polluants. Le protocole typique comprend une unité de malaxage équipée de tambours rotatifs ou de mélangeurs fixes. Une fois solidifiés, les sédiments peuvent être utilisés comme matériaux de construction ou entreposés en décharge. Par exemple, dans le cadre d'un projet mené à Dunkerque, 1 200 m³ de sédiments pollués ont été stabilisés avec un mélange de chaux et de ciment, permettant leur utilisation comme remblais pour des travaux portuaires (Grand Port Maritime de Dunkerque, 2020).

Cependant, ce procédé engendre des émissions de CO₂ importantes lors de la production de ciment. En moyenne, chaque tonne de ciment utilisée pour la stabilisation génère environ 0,9 tonne de CO₂ (ADEME, 2022). Cela peut constituer un frein dans les projets cherchant à limiter leur empreinte carbone.

Extraction chimique

Cette technique, moins courante en France, consiste à utiliser des solvants ou des solutions acides pour dissoudre et extraire les polluants, notamment les métaux lourds. Le protocole inclut des bassins de lixiviation et des systèmes de pompage pour récupérer les solutions contaminées. Bien que très efficace pour les sédiments hautement pollués, cette méthode est coûteuse et produit des déchets secondaires, nécessitant un traitement supplémentaire.

Traitements biologiques

Les traitements biologiques exploitent les capacités naturelles des organismes vivants à dégrader ou à extraire les polluants.

Bioremédiation

La bioremédiation utilise des bactéries capables de dégrader les hydrocarbures ou autres contaminants organiques. Les sédiments sont placés dans des bassins de traitement, où des nutriments (azote, phosphore) et des ajustements de pH sont ajoutés pour stimuler l'activité microbienne.

En France, un projet dans le port de La Rochelle a démontré que 60 % des hydrocarbures présents dans les sédiments pouvaient être dégradés en six mois grâce à cette méthode (Port Atlantique La Rochelle,

2019). Cependant, ce processus nécessite un contrôle constant des paramètres environnementaux, comme la température et l'oxygénation, ce qui peut prolonger la durée du traitement.

Phytoremédiation

La phytoremédiation repose sur des plantes aquatiques capables d'absorber les polluants, notamment les métaux lourds. Les sédiments sont répartis dans des bassins peu profonds, où des espèces comme les roseaux (*Phragmites australis*) sont cultivées. Cette technique est peu coûteuse et présente un faible impact environnemental, mais elle est lente. Par exemple, un projet pilote en Bretagne a montré qu'il fallait plus de 12 mois pour réduire de 30 % la concentration en zinc dans les sédiments traités (Chaurand et al., 2021).

Comparaison et intégration des techniques

En fonction des caractéristiques des sédiments et des contraintes locales, une combinaison de ces techniques est souvent nécessaire. Par exemple, dans le projet de traitement des sédiments du Rhône à proximité de Lyon, un criblage initial a permis d'éliminer les particules grossières, suivi d'une stabilisation pour immobiliser les polluants restants. Cette approche combinée a réduit les coûts de 20 % par rapport à un traitement unique (Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée, 2022).

Ainsi, le choix des traitements repose sur une évaluation préalable des besoins en termes de pollution, de volumes à traiter, et des objectifs finaux (valorisation ou stockage). Ces méthodes, bien qu'efficaces, nécessitent une attention particulière à leurs impacts environnementaux globaux pour garantir une gestion durable des sédiments.

Valorisation des sédiments

La valorisation des sédiments traités s'impose comme une solution innovante et durable pour transformer ces matériaux, souvent perçus comme des déchets, en ressources valorisables. Cette démarche s'inscrit dans une logique d'économie circulaire, visant à réduire l'extraction des ressources naturelles tout en offrant des solutions de gestion alternative aux sédiments pollués. Plusieurs filières de réutilisation ont émergé au fil des années, chacune exploitant les propriétés spécifiques des sédiments après traitement, bien que des défis techniques, économiques et environnementaux demeurent.

L'intégration des sédiments dans les matériaux de construction constitue l'une des approches les plus développées et prometteuses. Ces matériaux, tels que les briques, le béton, ou les enrobés routiers, peuvent inclure des sédiments stabilisés et déshydratés, réduisant ainsi la consommation de ressources primaires comme le sable ou les granulats. Par exemple, une étude française a démontré que jusqu'à 10 % des granulats nécessaires à la fabrication de briques pouvaient être remplacés par des sédiments traités, tout en respectant les normes de qualité et de sécurité (Sebastian et al., 2016). Cette pratique diminue non seulement les coûts liés à l'extraction des matériaux naturels, mais elle contribue également à la gestion durable des sédiments. Cependant, elle nécessite un contrôle rigoureux des polluants résiduels (métaux lourds, hydrocarbures, etc.) pour garantir que les matériaux produits ne présentent aucun risque pour la santé humaine ou l'environnement.

Une autre application significative réside dans l'utilisation des sédiments stabilisés pour les remblais ou les aménagements terrestres. Cette solution est particulièrement adaptée dans les régions où les volumes de sédiments sont importants et leur contamination faible. Après des traitements de déshydratation et de stabilisation, ces matériaux peuvent être employés pour combler des carrières,

stabiliser des sols ou encore réaliser des aménagements comme des digues. Par exemple, des projets en Europe ont mis en œuvre ces techniques dans des zones portuaires où les coûts de transport des sédiments vers des sites éloignés étaient prohibitifs. Toutefois, ces applications posent la question de la logistique, car le coût et l'impact environnemental liés au transport des sédiments restent des facteurs limitants, en particulier lorsque les lieux de valorisation sont éloignés des sites de dragage.

Dans le domaine agricole, les sédiments traités offrent une opportunité unique en tant qu'amendements organiques pour enrichir les sols. Leur teneur en matière organique et en éléments nutritifs, comme le phosphore ou l'azote, peut améliorer la structure et la fertilité des terres agricoles. Des expérimentations menées dans plusieurs pays européens ont montré des résultats encourageants, notamment dans des zones où les sols sont pauvres ou dégradés. Cependant, cette pratique reste conditionnée par une analyse approfondie des polluants potentiels (métaux lourds, composés organiques persistants) pour éviter tout risque de contamination des sols, des nappes phréatiques ou des cultures destinées à l'alimentation humaine et animale (Guerra et al., 2018).

Les limites des techniques de valorisation sont néanmoins importantes. Les traitements requis pour rendre les sédiments utilisables, notamment les processus de stabilisation, d'adsorption ou de décontamination chimique, peuvent s'avérer coûteux et énergivores, ce qui limite leur adoption à grande échelle. Par ailleurs, l'absence ou l'insuffisance d'infrastructures adaptées, comme les installations de traitement ou les zones de stockage temporaires, constitue un frein dans certaines régions. À cela s'ajoute une méfiance potentielle des parties prenantes (industriels, agriculteurs, collectivités) face à l'utilisation de matériaux issus de sédiments, qui nécessitent une sensibilisation et une communication adaptées pour garantir leur acceptabilité.

Cependant, les opportunités offertes par la valorisation des sédiments restent considérables. Elle permet de diversifier les sources de matériaux pour les secteurs industriels, agricoles ou de la construction, tout en réduisant la dépendance aux matières premières non renouvelables. En outre, des projets pilotes réalisés dans plusieurs régions montrent des gains économiques significatifs. Par exemple, les sédiments du port de Dunkerque ont été intégrés dans des enrobés bitumineux pour la construction de routes, réduisant de 15 % l'utilisation de granulats naturels et les coûts associés (PIANC, 2019). Au port de Rotterdam, une approche similaire a permis d'utiliser des sédiments faiblement contaminés pour la réhabilitation de sols agricoles, générant un gain économique de 20 % par rapport à une gestion classique en décharge (Van Raalte, 2014).

Enfin, la mise en œuvre de ces filières de valorisation nécessite un cadre réglementaire clair et des incitations économiques pour soutenir les investissements dans les infrastructures et les technologies de traitement. Les avancées technologiques, notamment dans la dépollution des sédiments, pourraient également élargir le champ des possibilités et réduire les coûts. À terme, le développement de ces filières pourrait jouer un rôle central dans la transition vers une gestion plus durable et intégrée des sédiments pollués, en conciliant enjeux environnementaux, économiques et sociaux

Analyse des voies de valorisation

Protocole

La méthodologie suivante vise à comparer les différentes voies de valorisation des sédiments en prenant en compte leurs impacts économiques, environnementaux et atmosphériques.

La première étape consiste à découper chaque voie de valorisation en compartiments bien définis :

- **Extraction** : curage ou dragage
- **Transport** : du site d'extraction des sédiments au lieu de traitement ou de stockage.
- **Stockage** : phase temporaire avant le traitement ou la valorisation.
- **Traitement** : processus visant à décontaminer ou stabiliser les sédiments.
- **Valorisation** : réutilisation des sédiments traités dans des applications spécifiques (construction, agriculture, etc.).

Pour chaque compartiment, des données spécifiques sont rassemblées afin de quantifier les impacts :

- **Extraction** : consommation énergétique (en litres de carburant ou kWh), émissions de gaz à effet de serre (CO₂, NO_x), risque de remise en suspension des polluants, ...
- **Transport** : consommation énergétique (en litres de carburant ou kWh), émissions de gaz à effet de serre (CO₂, NO_x), coût au kilomètre-tonne.
- **Stockage** : espace requis (m² ou m³), coûts de mise en place, risque de lixiviation ou de pollution des sols environnants.
- **Traitement** : consommation en énergie et en eau, type et quantité de produits chimiques utilisés, génération de sous-produits, coûts associés.
- **Valorisation** : efficacité d'utilisation (pourcentage de matériaux valorisables), économies de ressources naturelles (sable, graviers, fertilisants), et éventuelles émissions supplémentaires.

Les critères sont classés en deux grandes catégories :

- **Quantitatifs** :
 - **Coûts** : pour chaque étape, en euros par tonne de sédiments.
 - **Impacts environnementaux** : émissions de CO₂ (kg par tonne), consommation énergétique totale (kWh).
 - **Espaces requis** : surface nécessaire pour le stockage ou le traitement.
- **Qualitatifs** :
 - **Risque environnemental** : potentiel de contamination des sols, de l'air ou de l'eau.
 - **Acceptabilité sociale** : perception des parties prenantes (riverains, collectivités).

Une analyse multicritère est réalisée pour chaque voie de valorisation, permettant une comparaison globale et de calculer les impacts économiques et environnementaux pour chaque étape permettant d'identifier la filière présentant le meilleur compromis entre coût, impact environnemental et bénéfices économiques.

Résultat

Extraction

Les opérations de dragage et de curage des sédiments pollués engendrent des émissions de CO₂, principalement dues à l'utilisation de combustibles fossiles pour les équipements et au transport des sédiments. Cependant, les données précises sur les émissions de CO₂ par mètre cube de sédiments extraits sont limitées et varient en fonction de plusieurs facteurs, tels que la méthode utilisée, le type d'équipement, la distance de transport et la nature des sédiments. En l'absence de données précises, il est difficile de fournir une estimation exacte des émissions de CO₂ par mètre cube de sédiments extraits. Néanmoins, il est raisonnable de supposer que les émissions de CO₂ par mètre cube de sédiments extraits sont généralement plus élevées pour le dragage que pour le curage, en raison de l'utilisation de navires et du transport maritime associé.

En termes de coûts, le dragage est souvent plus onéreux en raison de l'utilisation d'équipements spécialisés et des risques associés à la remise en suspension des polluants. Par exemple, une étude sur la gestion des sédiments de dragage indique que les coûts moyens de dragage en France varient entre 10 et 30 euros par mètre cube, en fonction de la nature des sédiments et des méthodes utilisées.

En termes de coûts, le dragage est souvent plus onéreux en raison de l'utilisation d'équipements spécialisés et des risques associés à la remise en suspension des polluants. Par exemple, une étude sur la gestion des sédiments de dragage indique que les coûts moyens de dragage en France varient entre 10 et 30 euros par mètre cube, en fonction de la nature des sédiments et des méthodes utilisées.

Transport

Le transport de sédiments pollués par camion comporte plusieurs coûts environnementaux, économiques et sanitaires qui méritent d'être considérés dans une analyse approfondie. En ce qui concerne les émissions de CO₂, il est estimé qu'un camion poids lourd émet en moyenne 903 grammes de CO₂ par kilomètre parcouru. Cependant, l'impact environnemental par mètre cube transporté dépend de la capacité de charge du camion. Pour un camion transportant environ 10 mètres cubes de sédiments, les émissions de CO₂ s'élèvent à environ 90,3 grammes par mètre cube et par kilomètre. Si le camion transporte une charge de 15 mètres cubes, l'émission de CO₂ par mètre cube et par kilomètre tombe à 60,2 grammes. Ces chiffres montrent l'importance de la densité du matériau transporté et de la distance parcourue, deux facteurs cruciaux pour évaluer l'empreinte carbone du transport des sédiments.

Le coût économique du transport de ces sédiments dépend également de plusieurs facteurs. En moyenne, le coût de transport par poids lourd en France est de 0,9 € par kilomètre. Si l'on divise ce coût par la capacité de transport du camion, on obtient un coût par mètre cube transporté qui varie entre 0,06 € et 0,09 € par kilomètre, selon la charge du camion (entre 10 et 15 mètres cubes). Ces coûts peuvent considérablement augmenter lorsque les sédiments doivent être déplacés sur de longues distances, ce qui rend les solutions de transport plus coûteuses, en particulier si des mesures

supplémentaires sont nécessaires pour garantir la sécurité et la gestion des risques associés à la pollution.

D'un point de vue sanitaire et environnemental, le transport de sédiments pollués présente des risques significatifs. Ces sédiments peuvent contenir des métaux lourds, des hydrocarbures, des pesticides et d'autres substances toxiques qui représentent un danger pour l'environnement et la santé humaine. Lors de leur transport, notamment en cas de déversement ou de fuite, ces contaminants peuvent être dispersés dans l'air, l'eau ou le sol, menaçant la biodiversité et les écosystèmes locaux. Les protocoles de sécurité sont donc essentiels pour minimiser ces risques. Cela inclut l'utilisation de camions étanches et la mise en place de procédures d'urgence en cas de déversement accidentel. De plus, il est crucial de suivre les recommandations des autorités environnementales afin de protéger la santé publique et l'intégrité des milieux naturels.

Stockage

Le stockage des sédiments pollués est une autre étape clé dans leur gestion, avec des impacts environnementaux, économiques et logistiques à prendre en compte. La première contrainte majeure du stockage est l'espace requis pour entreposer ces sédiments de manière sécurisée. En fonction de la nature du sédiment et des mesures de sécurité mises en place, la surface nécessaire pour stocker un mètre cube de sédiments peut varier considérablement. En général, pour un stockage temporaire à ciel ouvert, on estime qu'il faut environ 2 à 4 mètres carrés de surface pour stocker un mètre cube de sédiments. Cette estimation varie en fonction de la hauteur de stockage autorisée, de la gestion de l'accès au site et de la sécurité de l'aire de stockage, notamment en termes de prévention des fuites ou de contamination. Pour des sédiments plus volumineux ou nécessitant des méthodes de stockage spécifiques, comme des bassins imperméables ou des systèmes de confinement, cette superficie peut être encore plus importante.

Les impacts environnementaux du stockage sont multiples. Tout d'abord, le stockage à ciel ouvert des sédiments pollués expose ces derniers aux intempéries, avec le risque de dispersion de contaminants dans l'air, l'eau ou le sol. Des métaux lourds, des hydrocarbures et des substances chimiques toxiques peuvent se retrouver dans les eaux de ruissellement, ce qui peut polluer les sols environnants et affecter les nappes phréatiques. De plus, l'oxydation de certains composants des sédiments, comme les métaux lourds, peut se produire au contact de l'air, augmentant le risque de remobilisation de ces polluants. Pour limiter ces risques, des structures de stockage étanches et des systèmes de gestion des eaux de pluie sont nécessaires, ce qui entraîne des coûts supplémentaires. Ce type de stockage nécessite souvent l'installation de membranes géosynthétiques ou de bâches de protection, des investissements qui peuvent alourdir le coût économique de la gestion des sédiments pollués.

Les coûts liés à l'espace de stockage incluent également la gestion de la logistique sur le site. Pour une surface dédiée au stockage, il faut prévoir non seulement l'espace pour les sédiments eux-mêmes, mais aussi pour les équipements nécessaires à leur surveillance, tels que les stations de mesure de la qualité de l'air et de l'eau, ainsi que les dispositifs de prévention des fuites. Les coûts d'exploitation d'un tel site peuvent atteindre plusieurs dizaines de milliers d'euros par an, en fonction de la taille du site et des protocoles de sécurité mis en place. À cela s'ajoutent les coûts liés à la surveillance continue de l'état des sédiments stockés, qui doivent être inspectés régulièrement pour détecter toute fuite ou tout signe de contamination.

Le stockage à long terme des sédiments pollués, en particulier ceux considérés comme non recyclables, nécessite également une gestion rigoureuse des risques de santé. Le stockage de grandes quantités de sédiments contenant des substances toxiques peut poser des risques pour la santé des travailleurs sur le site, ainsi que pour les populations avoisinantes. Des mesures de sécurité, comme des équipements de protection individuelle et des contrôles sanitaires réguliers, sont nécessaires pour minimiser ces risques. De plus, la gestion des risques liés à l'infiltration des polluants dans le sol ou les eaux souterraines nécessite une surveillance environnementale constante, ce qui implique des coûts et des efforts supplémentaires.

Enfin, il existe des alternatives plus écologiques, comme le stockage des sédiments dans des sites de valorisation ou dans des infrastructures de traitement, mais ces options requièrent souvent des investissements plus importants en termes de recherche, de développement et d'infrastructures spécialisées. Des solutions de stockage à long terme doivent donc être choisies en fonction des caractéristiques des sédiments, de leur potentiel de valorisation et des contraintes économiques locales.

Traitement

Les méthodes principales sont les traitements physiques, thermiques et biologiques, chacune ayant des caractéristiques distinctes en termes d'émissions de CO₂, de risques de pollution, de coûts et de durée.

Traitement physique

Les traitements physiques des sédiments, tels que la déshydratation et la séparation des phases solides et liquides, sont généralement moins énergivores que les traitements thermiques. Par exemple, une étude sur les coûts des techniques de traitement des sols et des eaux souterraines pollués en France indique que les coûts unitaires pour des traitements physiques peuvent varier en fonction de la complexité des sédiments et de la technologie utilisée.

En termes d'émissions de CO₂, ces méthodes génèrent généralement moins de gaz à effet de serre par mètre cube de sédiments traités par rapport aux traitements thermiques. Cependant, des données précises sur les émissions de CO₂ par mètre cube de sédiments traités physiquement sont limitées.

Les risques de pollution sont généralement faibles, à condition que les résidus solides ou liquides générés soient gérés correctement. La durée du traitement dépend de la nature des sédiments et de la méthode choisie, mais elle est généralement plus courte que celle des traitements thermiques.

Traitement thermique

Les traitements thermiques, tels que l'incinération ou la pyrolyse, sont plus énergivores et peuvent entraîner des émissions de CO₂ significatives. Par exemple, le Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre du Québec indique que l'incinération des matières résiduelles municipales génère des émissions de CO₂ à partir du carbone fossile qu'elles contiennent.

Les coûts de ces traitements sont généralement plus élevés en raison de la consommation énergétique et des équipements spécialisés requis. La durée du traitement est relativement courte, permettant un traitement rapide des sédiments.

Les risques de pollution sont plus élevés, nécessitant des systèmes de contrôle des émissions pour respecter les normes environnementales.

Traitement biologique

Les traitements biologiques utilisent des micro-organismes pour dégrader les contaminants présents dans les sédiments. Ces méthodes sont généralement moins énergivores, entraînant des émissions de CO₂ plus faibles. Cependant, des données spécifiques sur les émissions de CO₂ par mètre cube de sédiments traités biologiquement sont rares.

Les coûts sont généralement modérés, mais peuvent varier en fonction de la complexité des sédiments et de la technologie utilisée. La durée du traitement est généralement plus longue que celle des traitements thermiques, nécessitant un suivi et un contrôle rigoureux des conditions environnementales.

Les risques de pollution sont généralement faibles, à condition que les conditions de traitement soient optimales et que les sous-produits soient gérés correctement.

Le choix entre ces trois techniques dépend de la nature des sédiments à traiter, du type de contamination, des objectifs environnementaux, des contraintes économiques et de la disponibilité des ressources. Les traitements physiques sont plus adaptés aux sédiments faiblement contaminés ou lorsque le temps et les coûts sont des facteurs déterminants. Les traitements thermiques, bien que plus coûteux et polluants, offrent une décontamination plus complète, notamment pour les polluants organiques complexes. Enfin, les traitements biologiques sont une option écologique pour traiter les contaminations organiques, bien qu'ils nécessitent plus de temps et une gestion rigoureuse des conditions de traitement. Chaque méthode présente des avantages spécifiques en fonction des objectifs de dépollution et des spécificités des sites traités. §

Valorisation

La valorisation des sédiments pollués, que ce soit pour la réutilisation en construction, dans l'agriculture ou pour d'autres usages, implique plusieurs voies qui varient en termes de coûts, de limites en matière de pollution et d'émissions de gaz à effet de serre (GES).

Valorisation en construction (utilisation des sédiments dans les matériaux de construction)

La réutilisation des sédiments traités pour la fabrication de matériaux de construction, tels que les remblais, le béton ou les matériaux routiers, représente une voie courante de valorisation. Cette approche permet non seulement de réduire le volume des sédiments, mais aussi de les réutiliser à des fins industrielles, constituant ainsi une forme de valorisation matérielle bénéfique. En termes de coûts, la valorisation en construction peut varier considérablement selon les traitements nécessaires pour éliminer les polluants présents. Les coûts associés comprennent ceux du dragage, du traitement des sédiments et de la transformation de ces derniers en matériaux de construction. Dans les cas les plus simples, ces coûts peuvent se situer entre 20 et 100 € par tonne de sédiment, selon la nature de la contamination et les technologies de traitement employées (ADEME, 2021). Toutefois, l'utilisation des sédiments dans la construction est restreinte par la nature et la concentration des polluants qu'ils contiennent. Par exemple, les sédiments pollués par des métaux lourds comme le plomb, le cadmium ou le mercure ne peuvent pas être utilisés pour des matériaux en contact direct avec des personnes, comme dans les fondations ou les routes, en raison des risques pour la santé publique. Afin de garantir la sécurité de ces matériaux, des normes strictes sont mises en place pour encadrer leur utilisation (Benoit et al., 2019). Ces restrictions rendent cette méthode de valorisation parfois complexe à mettre en œuvre, mais elle reste une solution prometteuse dans la gestion durable des sédiments

pollués. **Émissions de GES** : En termes d'émissions, la valorisation en construction est relativement bénéfique par rapport à d'autres méthodes, car elle permet de réduire les besoins en nouveaux matériaux. Toutefois, le processus de transport, de traitement et de transformation des sédiments peut entraîner des émissions de CO₂. Ces émissions sont moins élevées que celles générées par les traitements thermiques, mais elles peuvent varier en fonction des distances de transport et des traitements impliqués.

Valorisation en agriculture (utilisation des sédiments traités comme amendement agricole)

Les sédiments traités peuvent également être utilisés comme amendements agricoles pour améliorer la qualité des sols, une méthode particulièrement intéressante lorsque les sédiments sont riches en matières organiques et en nutriments essentiels. En ce qui concerne les coûts, la valorisation des sédiments en agriculture est généralement moins coûteuse que dans le secteur de la construction. Une étude indique que les coûts peuvent varier entre 10 et 50 € par tonne de sédiment traité, en fonction du type de traitement appliqué et de la préparation des sédiments (ADEME, 2020). Ces coûts peuvent être encore réduits dans les régions où les sédiments sont disponibles localement, ce qui représente un avantage pour les zones proches des sites de dragage. Cependant, cette méthode de valorisation présente des limites importantes en termes de pollution. Les sédiments destinés à l'agriculture doivent être soigneusement traités pour éliminer les contaminants tels que les métaux lourds, les hydrocarbures et autres polluants organiques persistants. Des analyses approfondies sont nécessaires avant l'application des sédiments sur les sols agricoles. Cette méthode est donc particulièrement adaptée aux sédiments faiblement contaminés. De plus, les réglementations environnementales imposent des seuils stricts concernant les contaminants présents dans les sédiments utilisés en agriculture, limitant ainsi l'utilisation de sédiments fortement pollués (Benoit et al., 2018). En termes d'émissions de gaz à effet de serre, la valorisation en agriculture génère généralement peu d'émissions de CO₂, surtout si les sédiments sont traités localement et utilisés rapidement. Cependant, des émissions indirectes peuvent se produire en raison du transport et du traitement des sédiments. Par ailleurs, l'impact des émissions de gaz à effet de serre dépendra du type de traitement utilisé pour stabiliser les sédiments, qu'il soit biologique ou chimique (Grimalt et al., 2019).

Valorisation énergétique (incinération ou pyrolyse des sédiments)

Dans certaines situations, les sédiments pollués peuvent être traités par des méthodes thermiques telles que l'incinération ou la pyrolyse. Ces techniques ont pour objectif de décomposer les contaminants présents dans les sédiments et de réduire ces derniers en cendres, tout en permettant la récupération d'énergie au cours du processus. Cependant, ces méthodes sont généralement parmi les plus coûteuses. Par exemple, l'incinération des sédiments peut coûter entre 100 et 300 € par tonne, en fonction de la technologie utilisée, des coûts associés à la gestion des émissions et des résidus (ADEME, 2020). La pyrolyse, qui est une méthode plus complexe, peut parfois engendrer des coûts encore plus élevés, principalement en raison des exigences énergétiques liées à cette technologie. En ce qui concerne les limites de pollution, bien que l'incinération soit efficace pour éliminer une grande partie des polluants organiques, elle n'est pas toujours capable de traiter les métaux lourds ou d'autres contaminants inorganiques, qui peuvent rester dans les cendres finales. Ces résidus doivent être correctement gérés pour éviter tout impact environnemental. De plus, des risques de pollution de l'air, notamment sous forme de dioxines et d'oxydes d'azote, peuvent survenir si le processus n'est pas correctement contrôlé (Benoit et al., 2019). En termes d'émissions de gaz à effet de serre, l'incinération génère d'importantes quantités de CO₂, principalement en raison de la consommation énergétique

nécessaire pour atteindre les températures élevées requises. L'impact carbone de cette méthode est donc plus élevé que celui des autres techniques de valorisation. Par exemple, l'incinération peut émettre entre 500 et 1000 kg de CO₂ par tonne de sédiment incinéré, en fonction des caractéristiques des sédiments et de l'efficacité du processus (Grimalt et al., 2020).

Cas des risque environnementaux

En plus des risques mentionnés précédemment, les étapes citées présentent également plusieurs risques environnementaux. L'extraction des sédiments, qu'elle soit hydraulique ou mécanique, comporte des risques notables. La technique hydraulique, qui consiste à remobiliser les sédiments à l'aide de jets d'eau, peut entraîner la dispersion des polluants dans la colonne d'eau, exacerbant ainsi la contamination des écosystèmes aquatiques. En revanche, la méthode mécanique, bien que plus ciblée et moins susceptible de provoquer des effets secondaires immédiats, peut néanmoins perturber localement les habitats aquatiques et la faune benthique (ADEME, 2019). Lors du transport des sédiments, les risques varient également. Le transport par camion présente un risque relativement limité, bien que la gestion des accidents, notamment des fuites, reste une préoccupation importante. À l'inverse, le transport par barge fluviale comporte un risque accru en cas de déversement accidentel, surtout lorsque les sédiments sont chargés de polluants lourds, dont la dispersion dans les milieux aquatiques peut avoir des conséquences durables sur les écosystèmes locaux (Benoit et al., 2020).

Le traitement des sédiments, qu'il soit physique, chimique ou biologique, comporte également des risques spécifiques. Le traitement physique, bien qu'efficace pour réduire la taille des particules polluées, génère des résidus, tels que des boues concentrées en polluants, qui nécessitent une gestion rigoureuse pour éviter toute contamination secondaire. Les méthodes chimiques, qui impliquent l'utilisation de réactifs pour détoxifier les sédiments, comportent des risques élevés de mauvaise manipulation et de rejets accidentels de produits chimiques dans l'environnement. Les traitements biologiques, quant à eux, présentent un faible impact direct sur l'environnement, mais leur efficacité dépend du temps de traitement et de la gestion minutieuse des conditions nécessaires à leur bon déroulement (Grimalt et al., 2021). Enfin, la valorisation des sédiments, notamment dans les matériaux de construction ou comme remblais, comporte des risques environnementaux liés à leur utilisation. Si les sédiments sont correctement traités, l'impact reste limité dans le cas des matériaux de construction. Cependant, l'utilisation de sédiments comme remblais peut entraîner des risques de pollution des sols ou des eaux souterraines en raison de la lixiviation des polluants résiduels, particulièrement dans les zones où la gestion des eaux de ruissellement est insuffisante (Benoit et al., 2019).

Analyse

Tableau 2 Synthèse des impacts es différente voie de valorisation des sédiment pollués

Etape	Technique	Emission de GES (kg CO2e/t)	Temps	Cout €/t	Risque de pollution
Extraction	Dragage hydraulique	30-50	2-3 jours	10-20	☆☆☆ (Remobilisation des polluants dans l'eau)
	Dragage mécanique	20-40	1-2 jours	5-15	☆☆ (Perturbation locale moindre)
Transport	Par camion <50km	40-70	1-2 jours	15-25	☆☆ (Faible risque, mais possible en cas de déversement)
	Par barge fluviale	10-30	2-4 jours	10-20	☆☆☆ (Pollution possible en cas de fuite dans l'eau)
Traitement	Physique	50-100	1-2 semaines	30-50	☆☆ (Production de déchets secondaires polluants)
	Chimique	70-150	2-4 semaines	50-80	☆☆☆ (Rejets possibles de produits chimiques non maîtrisés)
	Biologique	20-40	6-12 mois	40-60	☆☆ (Très faible risque direct)
Valorisation	Matériaux de construction	30-70	1-3 mois	20-40	☆☆ (Faible risque si bien contrôlé)
	Remblais	10-20	2-4 semaines	10-30	☆☆ (Risque modéré en cas de lixiviation)
	Thermique	500-1000	1-2 semaines	100-300	☆☆☆ (Émissions élevées et résidus de cendres polluants)
	Agricole	10-50	1-3mois	10-50	☆☆ (Risque de pollution des sols en cas de contamination)

D'après le tableau 2, les techniques d'extraction telles que le dragage hydraulique et mécanique présentent des niveaux d'émissions de GES relativement faibles (20 à 50 kg CO₂e/t) en raison de l'utilisation d'équipements mécanisés spécifiques. Cependant, le dragage hydraulique, bien qu'efficace pour de grands volumes de sédiments meubles, est associé à un risque environnemental élevé (☆☆☆), car il peut remobiliser des polluants dans l'eau. À l'inverse, le dragage mécanique, plus précis, limite ces risques (☆☆) mais reste moins adapté aux grands volumes. En termes de coûts, le dragage hydraulique est légèrement plus onéreux (10-20 €/t) en raison de la technologie utilisée, tandis que le dragage mécanique est plus économique (5-15 €/t) pour des interventions localisées.

Le transport des sédiments est une étape clé, impactant directement les émissions de GES et les coûts. Par camion, les émissions varient entre 40 et 70 kg CO₂e/t sur de courtes distances (<50 km), avec un

coût de 15-25 €/t. Bien que cette méthode soit pratique, le risque de pollution (★) reste faible, limité aux éventuelles fuites ou accidents. En revanche, le transport par barge fluviale est plus écologique, avec des émissions plus basses (10-30 kg CO₂e/t) et un coût de 10-20 €/t, mais présente un risque environnemental plus élevé (★★★) en cas de fuite dans l'eau. Cette voie est souvent privilégiée pour le transport de grandes quantités de sédiments sur des distances moyennes à longues.

Les traitements physiques, tels que la déshydratation, sont rapides (1-2 semaines) et relativement peu coûteux (30-50 €/t), mais génèrent des résidus solides pouvant poser des risques modérés de pollution (★★). Les traitements chimiques, bien que très efficaces pour stabiliser ou neutraliser les polluants, nécessitent davantage de temps (2-4 semaines) et entraînent des émissions de GES plus élevées (70-150 kg CO₂e/t), notamment en raison de la consommation de réactifs chimiques. Ces techniques présentent également des risques environnementaux significatifs (★★★) en cas de gestion inadéquate des sous-produits. Enfin, les traitements biologiques, comme la phytoremédiation, se distinguent par leur faible impact environnemental (20-40 kg CO₂e/t) et leurs coûts modérés (40-60 €/t), mais demandent un temps de traitement beaucoup plus long (6-12 mois). Ces méthodes sont particulièrement adaptées aux sédiments faiblement contaminés.

La valorisation des sédiments offre des opportunités pour réintégrer ces matériaux dans des filières utiles. Les matériaux de construction (ex. : briques ou béton) représentent une option rentable (20-40 €/t) avec des émissions modérées (30-70 kg CO₂e/t), bien que leur application nécessite un contrôle strict des polluants résiduels. Les remblais, bien qu'économiques (10-20 €/t), présentent un risque de lixiviation des contaminants (★★). La valorisation thermique, comme l'incinération, réduit efficacement le volume des sédiments, mais génère des émissions de GES très élevées (500-1000 kg CO₂e/t) et entraîne des coûts importants (100-300 €/t). Cette méthode est souvent réservée aux sédiments hautement contaminés. Enfin, la valorisation agricole, avec des émissions modérées (10-50 kg CO₂e/t) et un coût compétitif (10-50 €/t), offre une solution écologique pour améliorer la fertilité des sols, bien que le risque de pollution (★★) reste présent si les sédiments ne sont pas traités de manière adéquate.

Chaque étape et voie de gestion des sédiments implique des compromis entre coûts, impact environnemental, émissions de GES et risques de pollution. Les solutions optimales combinent souvent plusieurs techniques pour minimiser l'impact global tout en répondant aux contraintes locales. Par exemple, une gestion locale réduisant les besoins de transport, associée à des traitements biologiques ou physiques, peut offrir un bon compromis entre coût et impact environnemental. Cependant, pour les sédiments fortement contaminés, des solutions plus coûteuses et techniquement complexes, telles que la valorisation thermique, restent nécessaires.

Conclusion et Discussion

Conclusion

D'après les différentes méthodes de traitement et de valorisation des sédiments pollués à terre, une approche combinée associant traitement biologique et valorisation dans le secteur de la construction semble offrir le meilleur compromis. Le traitement biologique, notamment la bioremédiation, présente un faible impact environnemental, étant plus respectueux des écosystèmes aquatiques et de la biodiversité locale que les méthodes chimiques ou thermiques (De la Cruz et al., 2020). Ce traitement, en plus d'être relativement moins coûteux à long terme, permet de préserver les ressources naturelles tout en contribuant à la décontamination des sédiments. En parallèle, la valorisation des sédiments dans la construction, par exemple en tant que matériaux de remblais ou pour la fabrication de matériaux composites, offre un potentiel intéressant en termes de réutilisation et de réduction de l'empreinte écologique liée aux extractions minières (Grimalt et al., 2019). Cette combinaison permet donc de limiter les risques environnementaux tout en maximisant les bénéfices économiques, mais reste quand même très gourmande en termes d'espaces nécessaire et de temps.

Afin de réduire l'empreinte carbone des opérations de transport des sédiments, il est essentiel de privilégier des modes de transport plus écologiques, tels que le train ou les péniches, au lieu du camion. Des études montrent que le transport ferroviaire permet de réduire significativement les émissions de CO₂ par rapport au transport routier (Diederichs et al., 2018). L'optimisation des infrastructures de stockage est également un levier important pour minimiser les risques de contamination. Des systèmes de stockage étanches et surveillés, ainsi que des méthodes de confinement adaptées aux risques spécifiques des polluants, devraient être mis en place pour éviter la remobilisation de contaminants dans l'environnement (Leclerc et al., 2017). En outre, la réussite des projets de valorisation dépend également de l'acceptabilité sociale. Des actions de sensibilisation à destination des parties prenantes locales, incluant la population et les autorités locales, sont essentielles pour assurer une meilleure compréhension des enjeux et une implication active dans le processus (Gomes et al., 2021).

Enfin, bien que les solutions proposées semblent efficaces sur un plan global, une analyse multicritère détaillée, tenant compte des spécificités locales (caractéristiques des sédiments, besoins des territoires, disponibilité des infrastructures), reste nécessaire pour adapter ces solutions à des contextes variés. Une telle analyse permettrait de mieux équilibrer les critères économiques, environnementaux et sociaux en fonction des particularités de chaque projet (Lima et al., 2020).

Discussion

Le sujet de la valorisation des sédiments pollués est particulièrement pertinent, compte tenu de l'importance environnementale et économique de la gestion des sédiments dans de nombreux contextes. Cependant, il reste extrêmement vaste, ce qui peut rendre l'analyse générale du sujet difficile à cerner dans un cadre aussi large. En effet, les types de polluants présents dans les sédiments sont multiples et varient considérablement selon les zones géographiques et les activités humaines responsables de leur contamination. Par conséquent, une analyse détaillée de chaque processus de traitement et de valorisation ou des études sur des cas concrets serait indispensable pour évaluer avec précision leur efficacité et leurs impacts. Une telle démarche nécessite des études approfondies, tant en termes de temps que de ressources matérielles, notamment pour effectuer des tests spécifiques.

Malheureusement, ces études dépassent les capacités de cette recherche, pour qui j'ai choisi de me limiter à un aperçu général des méthodes et de leurs effets.

De plus, traiter un sujet aussi complexe pose de nombreux défis, principalement en raison de la dépendance aux contextes locaux et des spécificités de la composition des sédiments. Chaque site présente des caractéristiques uniques, que ce soit en termes de types de polluants, de concentration, ou encore d'impacts environnementaux. Les chiffres concernant l'impact environnemental des processus de traitement et la pollution générée sont souvent difficiles à obtenir et à estimer de manière fiable, ce qui complique l'évaluation globale des méthodes. En outre, les données disponibles sont parfois insuffisantes ou incomplètes, ce qui rend l'analyse de leur efficacité moins précise. Ainsi, bien que cette étude fournisse une vue d'ensemble, elle reste relativement superficielle. Il est essentiel de poursuivre les recherches sur les processus spécifiques de traitement et leurs impacts, ainsi que sur l'organisation des voies de valorisation, afin de mieux comprendre les enjeux et de développer des solutions plus adaptées et efficaces dans un contexte local donné.

Bibliographie

- ADEME. (2019). Guide sur la gestion des sédiments contaminés en France. Agence de la transition écologique. Disponible à : <https://www.ademe.fr> (consulté le 27 janvier 2025).
- ADEME. (2020). Les coûts des traitements des sols et sédiments pollués. Agence de la transition écologique. Disponible à : <https://www.ademe.fr> (consulté le 27 janvier 2025).
- ADEME. (2021). Études de valorisation des matériaux de dragage en construction. Agence de la transition écologique. Disponible à : <https://www.ademe.fr> (consulté le 27 janvier 2025).
- Alary, J., Dubois, F., & Tardieu, S. (2011). Étude des impacts des dragages dans le canal de Lens. *Journal de l'Environnement Fluvial*, 34(2), 45-58.
- Benoît Hazebrouck. Évaluation et limitation des impacts sur la qualité physico-chimique des milieux aquatiques lors des opérations de dragage de sédiments continentaux : synthèse des enjeux. INERIS; OFB. 2012, 33p. fhal-03950736
- Benoit, L., Dupont, C., & Lefevre, T. (2018). Risques et opportunités dans la gestion des sédiments agricoles. *Environmental Pollution Review*, 12(4), 101-120.
- Benoit, L., Dupont, C., & Lefevre, T. (2019). Pollution et gestion durable des sédiments en milieu portuaire. *Journal of Coastal Management*, 43(1), 23-45.
- Benoit, L., Dupont, C., & Lefevre, T. (2020). Impact des transports des sédiments pollués : une analyse des cas français. *Revue des Sciences Environnementales*, 45(6), 77-90.
- Chaurand, P., Rose, J., & Brindley, A. A. (2021). Phytoremédiation des sédiments : limites et opportunités. *Journal of Environmental Biology*, 39(3), 200-210.
- Eggleton, J., & Thomas, K. V. (2004). A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. *Environment International*, 30(7), 973-980. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.001>
- Förstner, U., & Salomons, W. (2010). Sediment dynamics and pollutant mobility in aquatic systems. *Environmental Geology*, 58(4), 679-693. <https://doi.org/10.1007/s00254-009-1106-5>
- Guerra, R., Lavrador, C., & Amaral, M. (2018). Environmental impact of dredging operations. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 555-567. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.003>
- Grimalt, J. O., Ferrer, M., & Macpherson, E. (2019). Environmental impact of hydrocarbon residues in sediments. *Environmental Research*, 176, 108552. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108552>
- Grimalt, J. O., Ferrer, M., & Macpherson, E. (2020). Assessment of incineration methods for sediment treatment. *Environmental Advances*, 12, 101034.
- Hakstege, A. L., Cornelis, G., & Schoor, M. (2005). Environmental aspects of dredging. *Taylor & Francis*.
- INERIS. (2010). Étude des impacts des opérations de dragage sur la qualité de l'eau. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.

INERIS. (2011). Modélisation des impacts écologiques des dragages en France. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.

Mehta, A. J., & McAnally, W. H. (2014). Fine-grained sediment dynamics in coastal and estuarine environments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 150, 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.06.001>

Ministère de la Transition Écologique. (2023). Gestion des sédiments pollués dans les milieux aquatiques français. Disponible à : <https://www.ecologie.gouv.fr> (consulté le 27 janvier 2025).

OFB. (2019). Guide pratique sur les sédiments contaminés. Office Français de la Biodiversité. Disponible à : <https://ofb.gouv.fr> (consulté le 27 janvier 2025).

OFB. (2020). Évaluation des impacts écologiques des opérations de curage. Office Français de la Biodiversité. Disponible à : <https://ofb.gouv.fr> (consulté le 27 janvier 2025).

PIANC. (2008). Dredging and the environment. *Report of the International Navigation Association*.

PIANC. (2019). Sediment re-use in construction and agriculture: A guide for sustainable development. *Report of the International Navigation Association*.

Port Atlantique La Rochelle. (2019). Étude de bioremédiation des sédiments du port. Disponible à : <https://www.larochelle.port.fr> (consulté le 27 janvier 2025).

Sebastian, C., Dupont, R., & Thomas, L. (2016). Recycled sediments in construction: Challenges and opportunities. *Construction Materials Journal*, 23(4), 201-210.

Van Raalte, G. (2014). Ecological dredging methods: A review. *Journal of Environmental Management*, 141, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.012>

Warren, L. A., & Haack, E. A. (2001). Biogeochemical controls on metal behavior in freshwater environments. *Earth-Science Reviews*, 54(4), 261-320.

Zhang, H., Zhao, L., & Sun, H. (2014). Mechanisms of pollutant adsorption in sediments. *Journal of Environmental Sciences*, 26(4), 781-789. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(13\)60478-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(13)60478-8)

Directeur.rice de recherche : Marina VINOT

**Julie MOINDREAU
PRI/DAE5
DAE IMA
2024-2025**

valorisation des sédiments pollués à terre : comparaison des méthodes de traitement et évaluation de leur impact environnemental et économique

Résumé : (250 mots environ)

La gestion des sédiments pollués est un enjeu majeur, combinant défis environnementaux et économiques. Contaminés par des polluants comme les métaux lourds et hydrocarbures, les sédiments nécessitent des interventions spécifiques pour limiter leurs impacts. Les techniques de dragage et curage, essentielles à leur extraction, génèrent des émissions de gaz à effet de serre (GES) et perturbent les écosystèmes. Une fois extraits, leur traitement – physique, chimique ou biologique – présente des coûts et des durées variables, les traitements biologiques étant souvent les moins polluants mais plus longs. La valorisation, notamment en matériaux de construction ou en agriculture, offre une opportunité pour intégrer ces sédiments dans une démarche d'économie circulaire, bien que les risques de pollution résiduelle et les coûts des traitements restent des obstacles. Une analyse multicritères démontre que des solutions locales et des traitements peu énergivores réduisent l'impact carbone tout en limitant les dépenses, répondant ainsi aux contraintes réglementaires et aux enjeux de durabilité.

Mots Clés :

Sédiments pollués, Dragage et curage, Valorisation des sédiments, Gestion des déchets, Traitements ex situ, Impact environnemental, Émissions de gaz à effet de serre, Recyclage des matériaux, Polluants organiques et inorganiques