

Valorisation des sédiments de dragage en aménagement paysager

Guide méthodologique

Version septembre 2014

Comité de rédaction :

Nor-Edine ABRIAK (Ecole des Mines de Douai)
Issameddine KHEZAMI (Ecole des Mines de Douai)
Yannick MAMINDY-PAJANY (Ecole des Mines de Douai)
Samira BRAKNI (CD2E)
Rachid ZENTAR (Ecole des Mines de Douai)

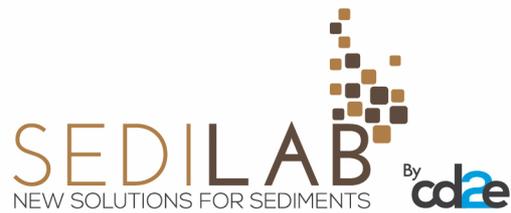
Comité de lecture :

Groupe D'Experts Scientifiques de Sédimentaires (GES)
Gaëlle MESMACQUES (DREAL Nord Pas de Calais)
Patrice MAUREL (Conseil Régional Nord Pas de Calais)
Samira BRAKNI (CD2E)

Crédit photographique :

CD2E, Ecoles des Mines de Douai

Coordination et diffusion :



Partenaires de la démarche Sédimentaires :



Financeurs de la démarche Sédimentaires :



Table des matières

LISTE DES FIGURES	5
LISTE DES TABLEAUX	6
AVANT-PROPOS	7
1. PROBLEMATIQUE DES SEDIMENTS PORTUAIRES	8
2. OBJECTIFS DE LA DEMARCHE SEDIMATERIAUX.....	9
3. PRATIQUES ACTUELLES.....	9
4. METHODOLOGIE DES PROJETS SEDIMATERIAUX	11
4.1 PHASE 1 : CARACTERISATION	13
4.2 PHASE 2 : ETUDE EN LABORATOIRE.....	13
4.3 PHASE 3 : ETUDE DE TERRAIN.....	13
5. PHASE 1 : CARACTERISATION	13
5.1 CARACTERISATIONS REGLEMENTAIRES	13
5.1.1 Analyse de la dangerosité.....	16
5.1.2 Analyse de radioactivité	19
5.2 CARACTERISATIONS COMPLEMENTAIRES	20
5.2.1 Analyses physiques et géotechniques.....	22
5.2.2 Analyses minéralogiques	23
5.2.3 Analyses mécaniques.....	24
5.2.4 Analyses chimiques.....	27
5.2.5 Analyses environnementales	28
5.3 CARACTERISATION DE L'IMPACT DU PROJET	32
5.3.1 Utilisation d'installations de transit et/ou de traitement.....	32
5.3.2 Réalisation de l'ouvrage à base de sédiment	34
6. PHASE 2 : ETUDE EN LABORATOIRE	43
6.1 ECHANTILLONNAGE SUR LE SITE DE STOCKAGE OU DE DEPOT	43
6.2 ETUDE DE FORMULATION.....	43
6.2.1 Elaboration du matériau	43
6.2.2 Evaluation de l'acceptabilité environnementale	43
6.2.3 Evaluation des performances mécaniques	44
6.3 CONCEPTION ET SUIVI D'UNE PLANCHE EXPERIMENTALE	44
6.3.1 Conception de la planche expérimentale.....	44
6.3.2 Suivi mécanique et environnemental	45
7. PHASE 3 : ETUDE DE TERRAIN	46
7.1 REALISATION D'UN OUVRAGE EXPERIMENTAL.....	46
7.1.1 Caractéristiques techniques de l'ouvrage.....	46
7.2 SUIVI MECANIQUE ET ENVIRONNEMENTAL.....	51
7.2.1 Analyses sur carottes de sédiments.....	51
7.2.2 Suivi environnemental des eaux piézométriques.....	52
7.2.3 Suivi de la qualité des eaux et sédiments dans les plans d'eaux riverains.....	52

7.2.4 Cadre réglementaire pour l'évaluation de la qualité des eaux.....	53
7.3 SUIVI DE L'ÉTAT GENERAL DE L'OUVRAGE	54
7.3.1 Inspections visuelles	54
7.3.2 Suivi de la couche de terre végétale	55
7.3.3 Suivi des facteurs de stabilité	55
8. SYNOPTIQUE DE LA METHODOLOGIE SEDIMATERIAUX	57
9. ACRONYMES.....	62
10. BIBLIOGRAPHIE	65

Liste des figures

Figure 1. Logigramme de la valorisation des sédiments de dragage dans les aménagements paysagers.....	10
Figure 2. Description de la méthodologie élaborée dans le cadre de la démarche SEDIMATERIAUX	12
Figure 3. Caractérisations réglementaires des sédiments de dragage en vue de leur valorisation à terre.....	15
Figure 4. Protocole d'évaluation de la propriété de danger H14 pour les sédiments marins et fluviaux	19
Figure 5. Caractérisations complémentaires sur sédiments bruts.....	21
Figure 6. Synoptique de classification des matériaux selon leur nature, selon la norme NF P 11-300 (CIMBETON, 2009).....	23
Figure 7. Microphotographies obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) d'un sédiment marin.....	24
Figure 8. Illustration des différents usages routiers de « type 2 » (SETRA, 2011).....	30
Figure 9. Principe de base de l'évaluation des risques	36
Figure 10. Démarche itérative de l'évaluation des risques	37
Figure 11. Schéma de l'évaluation du risque chimique dans l'environnement (Marchand et Tissier, 2005).....	39
Figure 12. Etapes de l'évaluation des risques sanitaires.....	41
Figure 13. Schéma conceptuel de l'évaluation des risques environnementaux et sanitaires d'un éco-modelé paysager réalisé à base de sédiment.....	42
Figure 14. Etapes de réalisation d'une planche expérimentale pour l'étude d'un d'éco-modelé paysager.....	45
Figure 15. Exemple de la géométrie de l'éco-modelé paysager réalisé dans le périmètre du GPMD	47
Figure 16. Installation des piézomètres	49
Figure 17. Végétaux sélectionnés pour l'aménagement de l'éco-modelé du GPMD.....	50
Figure 18. Plan de végétation mise en œuvre sur l'éco-modelé paysager du GPMD.....	51
Figure 19. Suivi de la couche de terre végétale.....	55

Liste des tableaux

<i>Tableau 1. Principales voies de gestion des sédiments de dragage sur le territoire national (CETMEF, 2012) ...</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 2. Critères de danger à prendre en compte lors de l'évaluation de la dangerosité des sédiments.</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 3. Seuils S1 issus de l'arrêté du 9 août 2006.....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 4. Analyses physiques et géotechniques à réaliser sur les sédiments bruts.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 5. Niveaux de références de l'arrêté du 9 août 2006</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 6. Niveaux de référence des arrêtés du 23 décembre 2009 (TBT) et 08 février 2013 (HAP).....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 7. Seuils de lixiviation relatifs à l'acceptabilité des déchets aux installations de stockage de déchets inertes</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 8. Valeurs seuil sur déchet brut fixées par l'arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 9. Valeurs limites en percolation permettant de justifier l'utilisation d'un matériau alternatif en remblai technique ou accotement recouverts</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 10. Valeurs limites en lixiviation et en percolation pour les déchets granulaires admissibles dans les décharges pour déchets dangereux et non dangereux.</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 11. Paramètres complémentaires à évaluer pour les déchets granulaires admissibles dans les décharges pour déchets dangereux.</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 12. Rubriques potentielles visées par la nomenclature ICPE</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 13. Instruments de mesure des différents paramètres</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 14. Exemple de fiche type d'inspection visuelle</i>	<i>54</i>

Avant-propos

Le présent guide expose la méthodologie selon laquelle les sédiments de dragage peuvent être valorisés en éco-modelés paysagers dans une perspective de développement durable, de protection de l'environnement et des populations. Ce guide est issu des travaux de recherche réalisés par le Département Génie Civil et Environnemental (DGCE) de l'Ecole des Mines de Douai sur la thématique de valorisation des sédiments de dragage, et ceci en cohérence avec la réglementation nationale qui prévalait lors de la réalisation des travaux.

La méthodologie exposée dans ce guide est exclusivement réservée aux projets de valorisation s'intégrant dans un plan d'aménagement paysager et aux gisements de sédiments dont les caractéristiques géotechniques et mécaniques sont conformes aux normes de spécifications d'usage en vigueur. Ces exigences sont primordiales afin de ne pas faire des éco-modelés paysagers un substitut de la mise en décharge.

La méthodologie proposée a été élaborée par l'Ecole des Mines de Douai dans le cadre de la démarche national SEDIMATERIAUX et constitue une base de travail pour la construction d'un guide d'application relatif à l'utilisation des sédiments de dragage en éco-modelés paysagers. Les modalités de la méthodologie décrite dans le présent guide pourront être revues en fonction des retours d'expériences reçus au niveau national et européen.

1. Problématique des sédiments portuaires

Les structures portuaires sont généralement composées de bassins présentant des taux de sédimentation particulièrement élevés et où il est indispensable de réaliser des opérations de dragage pour maintenir le tirant d'eau nécessaire à la navigation. Ces activités de dragage concernent les ports industriels et de commerce mais aussi les petites et moyennes structures portuaires dédiées aux activités de pêche ou de plaisance. Le plus gros volume de sédiments dragués au niveau national vient de la façade Manche Mer du Nord avec 16,7 millions de tonnes de matériaux. Viennent ensuite les façades Atlantique et Méditerranéenne avec respectivement 11,3 et 2,4 millions de tonnes de sédiments dragués (CETMEF, 2012).

Selon les risques qu'ils présentent pour l'environnement, les sédiments dragués peuvent être soit orientés vers des filières de gestion maritimes ou terrestres. Au niveau national, l'immersion représente de très loin la principale voie utilisée pour l'évacuation des sédiments de dragage mais des nuances peuvent apparaître selon les façades maritimes comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau 1. Principales voies de gestion des sédiments de dragage sur le territoire national (CETMEF, 2012)

Voies de gestion	Manche	Atlantique	Méditerranée
Immersion	95,19	98,71	97,23
Rechargement de plages	0,07	1,11	1,06
Dépôt à terre	4,72	0,16	0,96
Dépôt en mer	-	0,02	0,75
Autres filières*	0,01	-	-

**Dispersion des matériaux par injection d'eau, confinement, création de remblais, réutilisation en ouvrages et terre-pleins portuaires.*

Ainsi, près de 96% des sédiments de dragage sont rejetés en mer au niveau des trois façades maritimes. Le dépôt à terre est utilisé pour environ 6% des gisements dragués au niveau national et concerne surtout les sédiments de la façade Manche-Mer du Nord. Les filières de valorisation restent largement minoritaires et le stockage à terre est la solution la plus utilisée pour les gisements de sédiments non immergeables. Quant aux autres voies de gestion, elles restent très peu exploitées sur l'ensemble des façades littorales (Tableau 1).

2. Objectifs de la démarche SEDIMATERIAUX

Dans une logique de développement durable, les sédiments dragués devraient être rendus en priorité à leur milieu d'origine, c'est-à-dire immergés ou utilisés pour le rechargement de plages. Cependant, le renforcement des réglementations environnementales dans le domaine de l'immersion, du stockage à terre et de la mise en décharge des déchets, ainsi que les incitations réglementaires à la réutilisation des déchets, pose aujourd'hui la question de la définition de filières durables de valorisation des sédiments non immergeables.

La démarche SEDIMATERIAUX, initiée en 2009, par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer, le Conseil Régional Nord-Pas de Calais, la Préfecture Nord-Pas de Calais, le CD2E et l'Ecole des Mines de Douai avec la signature d'une charte de préfiguration, a pour ambition de proposer des solutions opérationnelles pour la gestion des sédiments de dragage.

A ce titre, la démarche SEDIMATERIAUX a pour objectifs (i) d'accompagner et d'orienter les gestionnaires et les maîtres d'ouvrage lors de l'élaboration de leurs projets de valorisation, (ii) de proposer un cadre méthodologique et scientifique harmonisé pour la valorisation à terre des sédiments de dragage, (iii) d'identifier et de développer des filières de valorisation adaptées à toute typologie de sédiments issus de ports ou de canaux, et (iv) de produire les données scientifiques nécessaires à l'évolution du cadre réglementaire au niveau national.

3. Pratiques actuelles

La valorisation est définie dans l'article L541-1-1 du code de l'environnement comme : « *toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets* ».

Ainsi, le choix d'une filière de valorisation dépendra des (i) caractéristiques intrinsèques des sédiments (niveau de pollution, comportement géotechnique et mécanique, etc.), (ii) coûts, et (iii) réglementations en vigueur.

En l'absence de réglementation spécifique à la gestion à terre des sédiments de dragage, l'usage de la filière éco-modèle paysager n'est pas très répandu mais reste néanmoins possible d'un point de vue réglementaire. Actuellement, la valorisation des sédiments de dragage en aménagements paysagers (engazonnement, chemin forestier, aménagement de zones de loisirs) est principalement envisagée à la suite d'un entreposage temporaire et après ressuyage des sédiments de dragage, et ne concerne que les dépôts de sédiments respectant les seuils des déchets inertes de l'annexe II de l'arrêté du 28 octobre 2010.

Les sédiments non inertes doivent faire l'objet d'une étude spécifique pour la détermination du comportement à la lixiviation du déchet dans des conditions spécifiées d'après la norme EN 12920+A1.

Un permis d'aménagement peut également être nécessaire en application des articles L 441-1, L 442-2, R 442-2, R 130-1, du code de l'urbanisme.

De plus, les sédiments inertes et non dangereux admis dans ces aménagements ne devront pas avoir d'impact sur l'environnement, ni présenter un risque sanitaire pour la population humaine. A ce titre, une étude des risques environnementaux et sanitaires est généralement réalisée afin d'évaluer l'impact du projet sur l'environnement et la population.

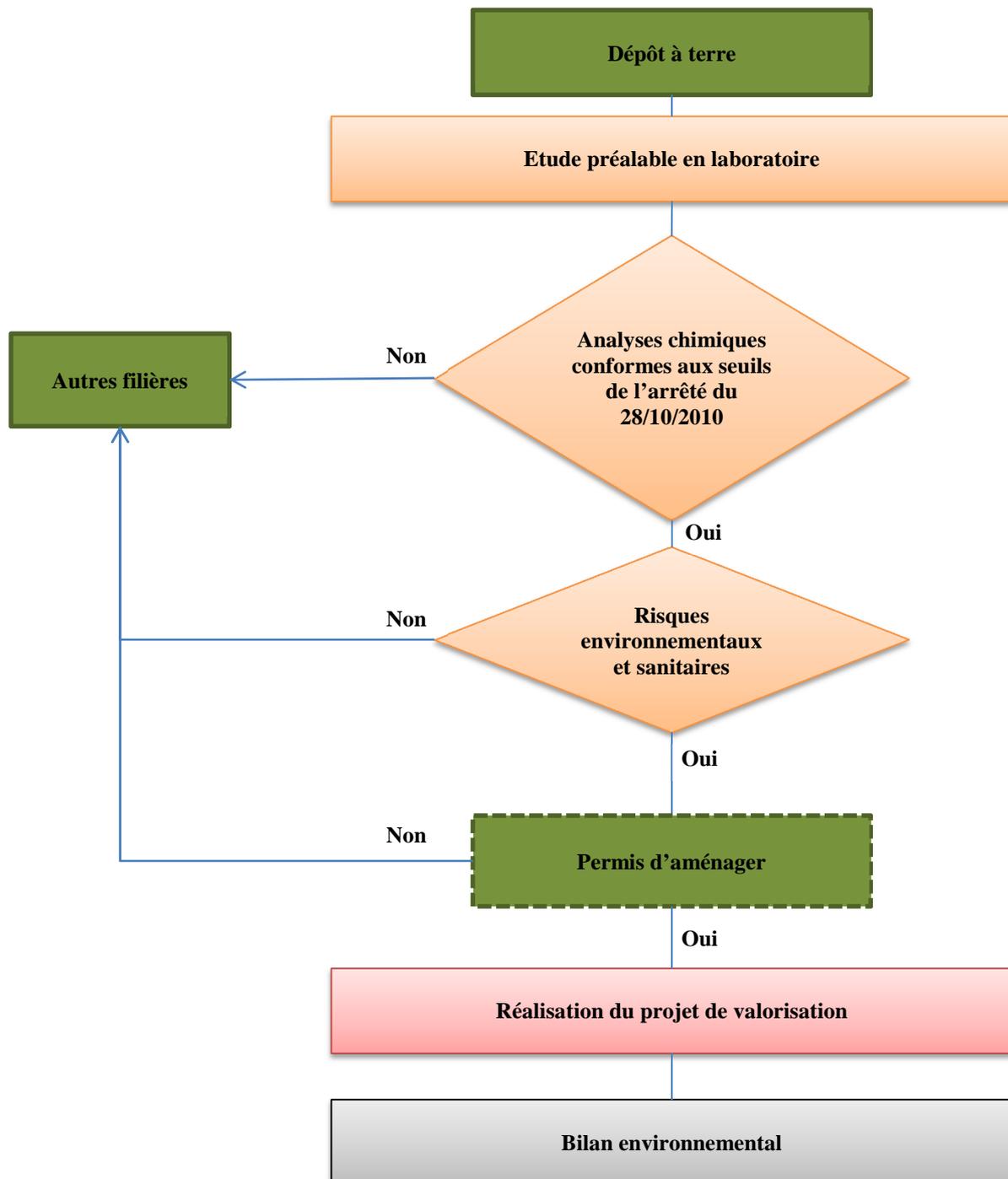


Figure 1. Logigramme de la valorisation des sédiments de dragage dans les aménagements paysagers

La figure 1 résume les différentes étapes nécessaires à la réalisation d'un projet de valorisation de sédiments de dragage dans les aménagements paysagers. En l'absence de cadres réglementaire et technique, la valorisation dans les aménagements paysagers et en particulier dans les éco-modelés concerne uniquement les dépôts de sédiments existants. L'étude de faisabilité se limite à la réalisation d'essais de lixiviation et d'une étude des risques environnementaux sanitaires. Ainsi, des sédiments de dragage classés comme « inertes et non dangereux » peuvent être valorisés dans cette filière uniquement sur la base d'une étude préalable en laboratoire.

4. Méthodologie des projets SEDIMATERIAUX

Compte tenu de la nature et du comportement des sédiments de dragage, l'utilisation d'essais de lixiviation et la réalisation d'une étude impact ne permettent pas de justifier de la faisabilité technique, mécanique et environnementale de la valorisation de ces matériaux dans les éco-modelés paysagers.

Par ailleurs, les éco-modelés paysagers apparaissent comme étant des ouvrages consommateurs de matériaux, et de ce fait, il est impératif que la réalisation de ce type de projet réponde à un besoin autre que la recherche d'un exutoire pour déchets : la réalisation de l'éco-modelé paysager aura lieu avec ou sans sédiments.

La méthodologie expérimentale de la démarche SEDIMATERIAUX nécessite, par principe, de prendre plus de précautions que les pratiques actuelles notamment pour acquérir la donnée dont on ne dispose pas à ce jour et permettre ensuite à des gestionnaires de valoriser les sédiments répondant aux critères validés dans le cadre de cette méthodologie.

Cette méthodologie a été élaborée par l'école des Mines de Douai dans le cadre de la démarche SEDIMATERIAUX et s'appuie sur les retours d'expériences des projets réalisés dans le périmètre du Grand Port Maritime de Dunkerque. Celle-ci est applicable à toute typologie de sédiments immergeables et non-immergeables, à l'exception de ceux classifiés comme dangereux, et comporte 3 phases cumulatives et dépendantes (Figure 2):

- PHASE 1 : CARACTERISATION
- PHASE 2 : ETUDE EN LABORATOIRE
- PHASE 3 : ETUDE DE TERRAIN

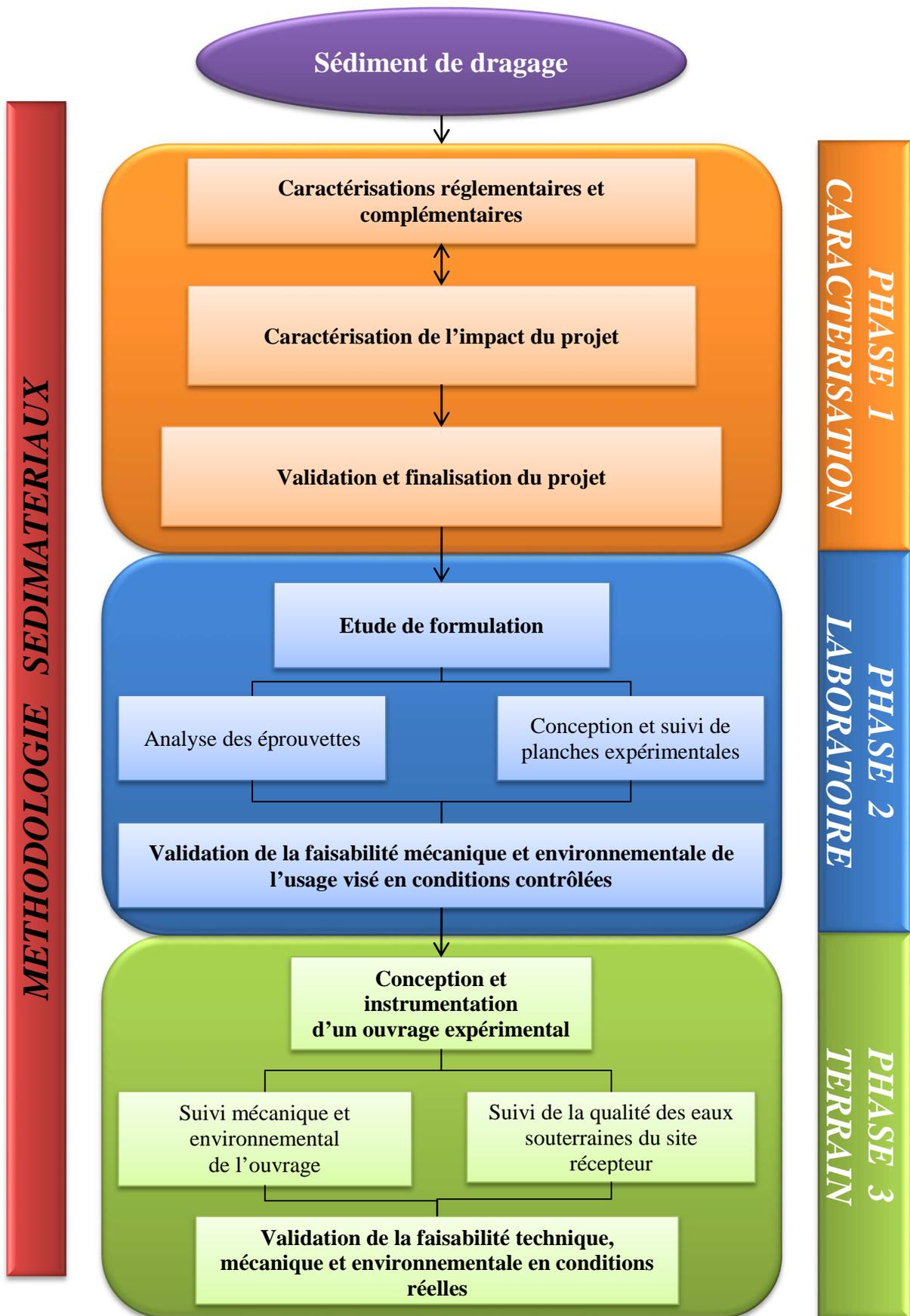


Figure 2. Description de la méthodologie élaborée dans le cadre de la démarche SEDIMATERIAUX

4.1 Phase 1 : Caractérisation

La phase de caractérisation permet d'identifier les gisements de sédiments potentiellement valorisables et d'approfondir la connaissance de leurs propriétés physiques, géotechniques, minéralogiques, mécaniques, chimiques et environnementales. Les données produites alimenteront l'étude d'impact du projet et permettront d'identifier les installations nécessaires au prétraitement et/ou traitement des sédiments avant le lancement des études de faisabilité en laboratoire et sur le terrain. Les préconisations techniques et environnementales (périmètre à instrumenter, installation d'une géo-membrane, traitement des polluants du sédiment, etc.) émises à l'issue de cette phase permettront de finaliser et de valider le projet de valorisation.

4.2 Phase 2 : Etude en laboratoire

La phase d'étude en laboratoire consiste à (i) élaborer un matériau adapté, d'un point de vue mécanique et environnemental, à l'usage visé, et (ii) étudier le comportement mécanique et environnemental du matériau dans des conditions contrôlées. Ainsi, des planches expérimentales peuvent être mises en œuvre pour étudier le comportement du matériau sur une échelle de temps donnée dans les conditions du scénario. Cette étude permettra d'identifier les paramètres susceptibles d'influencer les performances mécaniques du matériau à long terme ainsi que l'impact potentiel de son utilisation sur l'environnement.

4.3 Phase 3 : Etude de terrain

La phase de terrain est indispensable pour pouvoir valider les résultats de l'étude de faisabilité mécanique et environnementale réalisée en laboratoire. Dans son contenu, cette phase comprend la réalisation d'un ouvrage opérationnel instrumenté à une échelle limitée mais significative. Ce niveau expérimental permet de (i) s'affranchir de l'effet d'échelle, (ii) vérifier la faisabilité technique de mise en œuvre et la tenue mécanique du matériau en conditions réelles, et (iii) comparer la qualité des eaux de percolation de l'ouvrage avec ceux du site récepteur. L'ouvrage fera l'objet d'un suivi mécanique et environnemental sur une durée minimale d'une année. La conformité des résultats de terrain avec les essais de laboratoire et les référentiels techniques et réglementaires permettra de valider la faisabilité technique, mécanique et environnementale de l'usage étudié.

5. Phase 1 : Caractérisation

5.1 Caractérisations réglementaires

Les modalités de gestion à terre des sédiments de dragage et la sélection des filières de valorisation dépendent principalement de la taille des gisements, de leurs niveaux de dangerosité et de radioactivité. Une identification précise de la nature des sédiments à draguer repose sur la mise en œuvre d'un plan d'échantillonnage adapté aux spécificités du site étudié. Cette stratégie d'échantillonnage sera établie

en conformité avec les référentiels réglementaires ou techniques existants tels que la circulaire technique VNF sur les opérations de dragage ou encore la circulaire du 14 juin 2000. L'objectif du plan d'échantillonnage est d'obtenir des échantillons représentatifs de la zone à draguer en vue de la réalisation des analyses réglementaires.

Cette caractérisation préalable, au titre de la Directive Cadre Déchets n° 2008/98/CE du 19/11/2008 et du code de la santé publique (Article R.1333-2 du code de la santé publique), permettra au gestionnaire de définir les modalités de gestion à terre de ses sédiments de dragage (Figure 3). Ainsi, les gisements de sédiments non dangereux (rubrique 17 05 06 : sédiments inertes et non inertes) pourront faire l'objet d'une étude de faisabilité en vue de leur valorisation à terre, tandis que les gisements identifiés comme dangereux et/ou contenant des substances radioactives devront faire l'objet d'un traitement avant leur élimination ou le cas échéant leur valorisation.

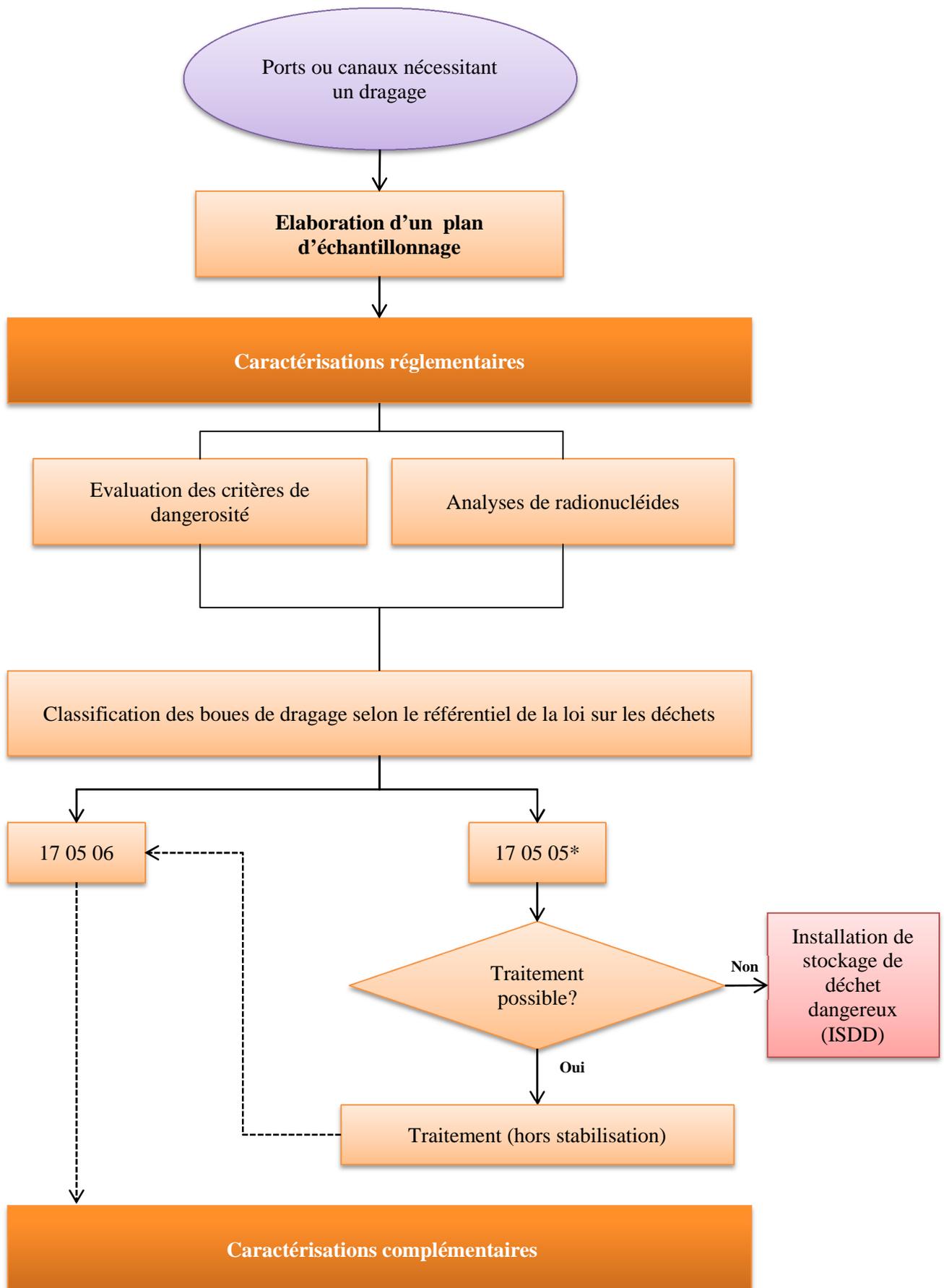


Figure 3. Caractérisations réglementaires des sédiments de dragage en vue de leur valorisation à terre

5.1.1 Analyse de la dangerosité

La Directive Cadre Déchets n° 2008/98/CE du 19/11/2008 actuellement en application (transposée en droit français dans le Code de l'Environnement, en particulier dans les articles R541-8 et ses annexes et R541-10) classe les sédiments de dragage sous deux rubriques :

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

Tableau 2. Critères de danger à prendre en compte lors de l'évaluation de la dangerosité des sédiments.

Critères H	Définition
H1 Explosif	substances et préparations pouvant exploser sous l'effet de la flamme ou qui sont plus sensibles aux chocs ou aux frottements que le dinitrobenzène.
H2 Comburant	substances et préparations qui, au contact d'autres substances, notamment de substances inflammables, présentent une réaction fortement exothermique.
H3-A Facilement inflammable	substances et préparations : - à l'état liquide (y compris les liquides extrêmement inflammables), dont le point d'éclair est inférieur à 21 °C, ou - pouvant s'échauffer au point de s'enflammer à l'air à température ambiante sans apport d'énergie ; - à l'état solide, qui peuvent s'enflammer facilement par une brève action d'une source d'inflammation et qui continuent à brûler ou à se consumer après l'éloignement de la source d'inflammation ; ou - à l'état gazeux, qui sont inflammables à l'air à une pression normale ; ou - qui, au contact de l'eau ou de l'air humide, produisent des gaz facilement inflammables en quantités dangereuses.
H3-B Inflammable	substances et préparations liquides, dont le point d'éclair est égal ou supérieur à 21 °C et inférieur ou égal à 55 °C.
H4 Irritant	substances et préparations non corrosives qui, par contact immédiat, prolongé ou répété avec la peau et les muqueuses, peuvent provoquer une réaction inflammatoire.
H5 Nocif	substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent entraîner des risques de gravité limitée.
H6 Toxique	substances et préparations (y compris les substances et préparations très toxiques) qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent entraîner des risques graves, aigus ou chroniques, voire la mort.
H7 Cancérogène	substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire le cancer ou en augmenter la fréquence.
H8 Corrosif	substances et préparations qui, en contact avec des tissus vivants, peuvent exercer une action destructrice sur ces derniers.
H9 Infectieux	matières contenant des micro-organismes viables ou leurs toxines, dont on sait ou on a de bonnes raisons de croire qu'ils causent la maladie chez l'homme ou chez d'autres organismes vivants.
H10 Toxique pour la reproduction	substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire ou augmenter la fréquence d'effets indésirables non héréditaires dans la progéniture ou porter atteinte aux fonctions ou capacités reproductives.
H11 Mutagène	substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire des défauts génétiques héréditaires ou en augmenter la fréquence.
H12	Substances et préparations qui, au contact de l'eau, de l'air ou d'un acide, dégagent un gaz toxique ou très toxique.
H13 Sensibilisant	substances et préparations qui, par inhalation ou pénétration cutanée, peuvent donner lieu à une réaction d'hypersensibilisation telle qu'une nouvelle exposition à la substance ou à la préparation produit des effets néfastes caractéristiques. Cette propriété n'est à considérer que si les méthodes d'essai sont disponibles.
H14 Ecotoxique	substances et préparations qui présentent ou peuvent présenter des risques immédiats ou différés pour une ou plusieurs composantes de l'environnement.
H15	Substances et préparations susceptibles, après élimination, de donner naissance, par quelque moyen que ce soit, à une autre substance, par exemple un produit de lixiviation, qui possède l'une des caractéristiques énumérées ci-avant.»

L'astérisque qui suit le code 17 05 05 indique qu'il s'agit d'un déchet dangereux. Pour définir les modalités de gestion des boues de dragage, il est donc nécessaire d'identifier si les sédiments entrent dans la catégorie 17 05 05* ou 17 05 06 et ce quelle que soit la filière de gestion envisagée (stockage ultime ou en vue d'une valorisation).

Ainsi, un sédiment de dragage est classé dangereux sur la base de l'évaluation des propriétés de danger définies par le Code de l'Environnement (Tableau 2) s'il répond aux critères d'attribution d'une ou de plusieurs propriétés de danger. Un déchet est classé non dangereux s'il ne répond pas aux critères d'attribution d'aucune propriété de danger dont la méthode d'évaluation est actuellement définie dans le code de l'environnement (soit H1 à H8, H10 et H11) et si l'étude des propriétés H9, H12, H13, H14 et H15 démontre le caractère non dangereux du déchet pour ces propriétés.

Propriétés non pertinentes pour les sédiments de dragage : H1, H2 et H3

L'arrêté du 08 juillet 2003 donne les critères et méthodes d'évaluation des propriétés de dangers H1, H2 et H3. Compte tenu de la nature des sédiments de dragage, il n'est pas nécessaire de caractériser la dangerosité de ces matériaux selon ces propriétés :

H1 explosif : les sédiments de par leur nature et leur provenance ne contiennent pas certains groupes de réactifs tels que les composants nitro, les sels diazonium et les peroxydes dans la formule développée, montrant que le déchet n'est pas susceptible de se décomposer rapidement en libérant des gaz ou de la chaleur (à savoir, que ce matériaux ne présente aucun risque d'explosion). Il n'est donc pas nécessaire d'effectuer les essais préconisés pour ce critère de danger.

H2 Comburant : dans les méthodes d'évaluation proposées, les substances de références sont : les gaz, les liquides (mélange acide nitrique et cellulose) et les solides (mélange de bromate de potassium/cellulose). Les sédiments en place ne sont pas d'une nature à contenir un mélange de bromate de potassium/cellulose.

H3 Inflammable : les sédiments ne sont pas d'une nature à contenir des matériaux pyrophoriques, à savoir des matériaux qui peuvent s'enflammer au contact de l'air, de l'eau ou par pression. Les sédiments portuaires, de rivières et de canaux sont d'ailleurs déjà en contact avec l'eau.

Evaluation des propriétés H4, H5, H6, H7, H8, H10 et H11

L'évaluation des propriétés de danger H4 à H8, H10 et H11 repose sur la connaissance de la composition en substances chimiques du déchet et des règles de calculs définies par le Code de l'Environnement. La démarche d'évaluation de la dangerosité du déchet sur la base de sa composition chimique comporte 4 étapes :

1. La réalisation d'analyses en laboratoire pour les substances organiques et inorganiques susceptibles d'être présentes dans le déchet. Dans le cas des sédiments, la liste des substances recherchées sera établie à partir de la réglementation relative à la loi sur l'eau et les déchets. Le cas échéant, d'autres substances chimiques pourront être analysées en fonction des problématiques locales.
2. La spéciation des métaux en substances minérales ;
3. La recherche des propriétés de danger des substances identifiées dans le sédiment ;

4. L'application des règles de classement.

Pour le détail des différentes étapes de cette démarche, le maître d'ouvrage est invité à consulter le document technique édité par l'INERIS (2013) et intitulé « guide de classement des déchets selon leur dangerosité suivant le Code de l'Environnement et la réglementation SEVESO II ».

Evaluation de la propriété H14

L'évaluation de la propriété H14 ne dispose actuellement d'aucune méthode ayant un statut réglementaire. Il existe cependant une batterie de tests pour les sédiments (eau douce et eau de mer) qui a été proposée par le groupe de travail ministériel « Dangerosité des sédiments ». Dans cette approche, les tests sont généralement réalisés par étapes (Figure 4). Le protocole comprend une phase de centrifugation préalable permettant d'éliminer les chlorures qui sont susceptibles de provoquer un effet toxique chez les organismes terrestres. Le protocole prévoit également la mise en œuvre successive d'essais d'écotoxicité aiguë puis d'essais d'écotoxicité chroniques à partir des lixiviats et ensuite d'essais d'écotoxicité aiguë vis-à-vis d'organismes terrestres (graines de plantes supérieures) sur la matrice brute après centrifugation. Lorsqu'un test met en évidence le caractère écotoxique du déchet, celui-ci peut être déclaré dangereux et les essais peuvent s'arrêter. Dans le cas contraire, il est nécessaire de réaliser la batterie complète de bio-essais.

Le groupe de travail « dangerosité des sédiments » recommande la mise en œuvre du protocole H14 uniquement pour tous les échantillons de sédiments dont les analyses chimiques sur la fraction < 2 mm dépassent un des seuils réglementaires du niveau S1 de l'arrêté du 9 août 2006 (Tableau 3). La valeur seuil en PCBs totaux correspond à la somme des concentrations des 7 PCBs indicateurs : PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180. La valeur seuil du paramètre HAP totaux correspond à la somme des concentrations des 16 HAP suivants : naphthalène, acénaphthylène, fluorène, acénaphthène, anthracène, phénanthrène, fluoranthène, pyrène, benzo(a)anthracène, chrysène, benzo(b)fluoranthène, benzo(a)pyrène, indéno-pyrène, dibenzo(a)anthracène, benzo(ghi)pérylène.

Tableau 3. Seuils S1 issus de l'arrêté du 9 août 2006

Paramètre	Niveau S1 (mg/kg)
As	30
Cd	2
Cu	150
Cr total	100
Hg	1
Ni	50
Pb	100
Zn	300
PCBs totaux	0,680
HAP totaux*	22,8

*16 HAP de la liste EPA : naphthalène, acénaphthylène, fluorène, acénaphthène, anthracène, phénanthrène, fluoranthène, pyrène, benzo(a)anthracène, chrysène, benzo(b)fluoranthène, benzo(a)pyrène, indéno-pyrène, dibenzo(a)anthracène, benzo(ghi)pérylène.

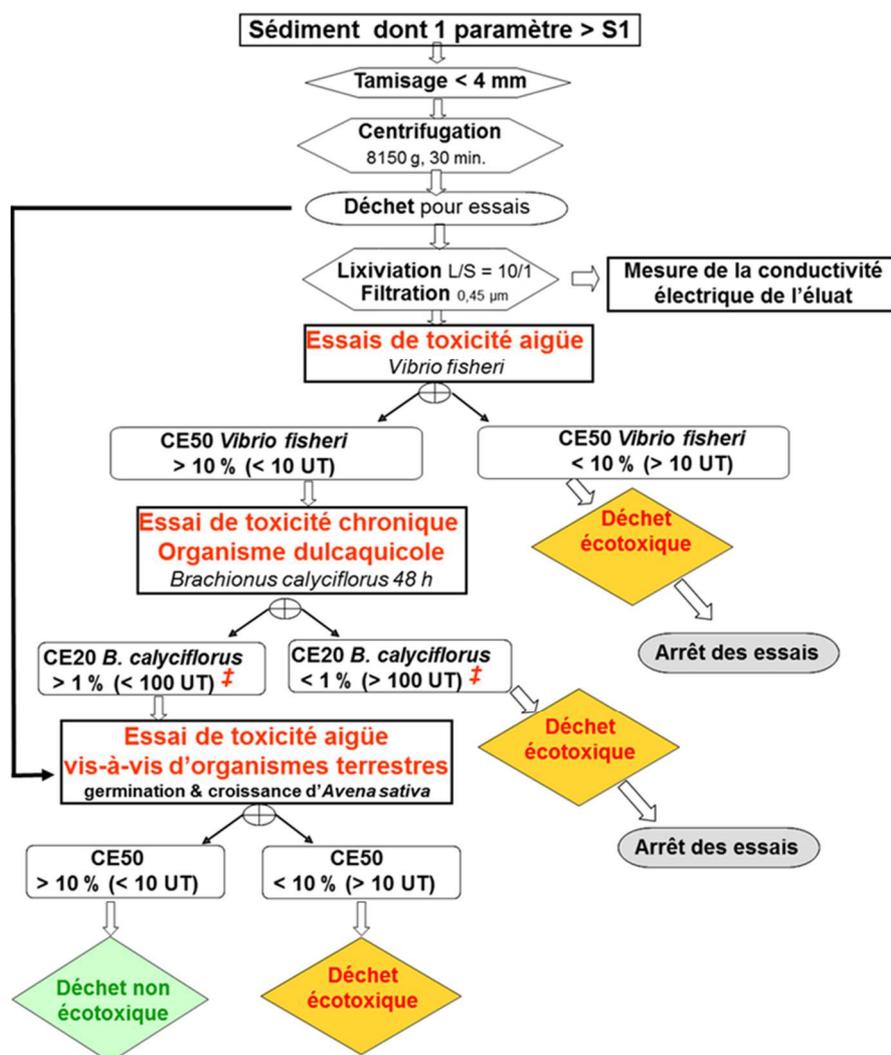


Figure 4. Protocole d'évaluation de la propriété de danger H14 pour les sédiments marins et fluviaux

Propriétés sans méthode d'évaluation définie dans le code de l'environnement : H9, H12, H13 et H15

Ces propriétés ne disposent pas actuellement de méthode d'évaluation reconnue, que ce soit au niveau réglementaire, ou définie par consensus des experts du domaine. Pour certaines d'entre elles, des travaux sont en cours pour établir des méthodes et critères d'évaluation. L'INERIS propose, dans le « guide de classement des déchets selon leur dangerosité suivant le Code de l'Environnement et la réglementation SEVESO II », parue en 2013, des éléments d'aide pour l'évaluation de ces propriétés qui ne doivent pas être exclues du dossier de classement.

5.1.2 Analyse de radioactivité

Certains sédiments peuvent présenter des problématiques de contaminations spécifiques nécessitant la réalisation d'analyses radio-écologiques. Au sens de la directive 96/26/Euratom du conseil du 13/05/96 est une substance radioactive toute substance qui contient un ou plusieurs radionucléides dont l'activité ou la concentration ne peut être négligée du point de vue de la radioprotection.

Par ailleurs, le code de la santé publique interdit l'addition de radionucléides dans les produits de construction (R.1333-2 du code de la santé publique). Les maîtres d'ouvrages souhaitant valoriser leur gisement de sédiments dans les travaux terrestres devront donc s'assurer de l'absence de substances radioactives. L'analyse de la radioactivité des sédiments de dragage devra être effectuée selon la norme ISO 18589.

5.2 Caractérisations complémentaires

L'étude de caractérisation réalisée dans cette phase vise à fournir des informations complémentaires sur les propriétés physiques, géotechniques, mécaniques et environnementales des gisements de sédiments (figure 5). Les modalités de gestion à terre des sédiments de dragage et la sélection de la filière de valorisation dépendent essentiellement de cette étude complémentaire. Cette dernière concerne uniquement les gisements de sédiments non dangereux dont la valorisable à terre est possible d'un point de vue réglementaire.

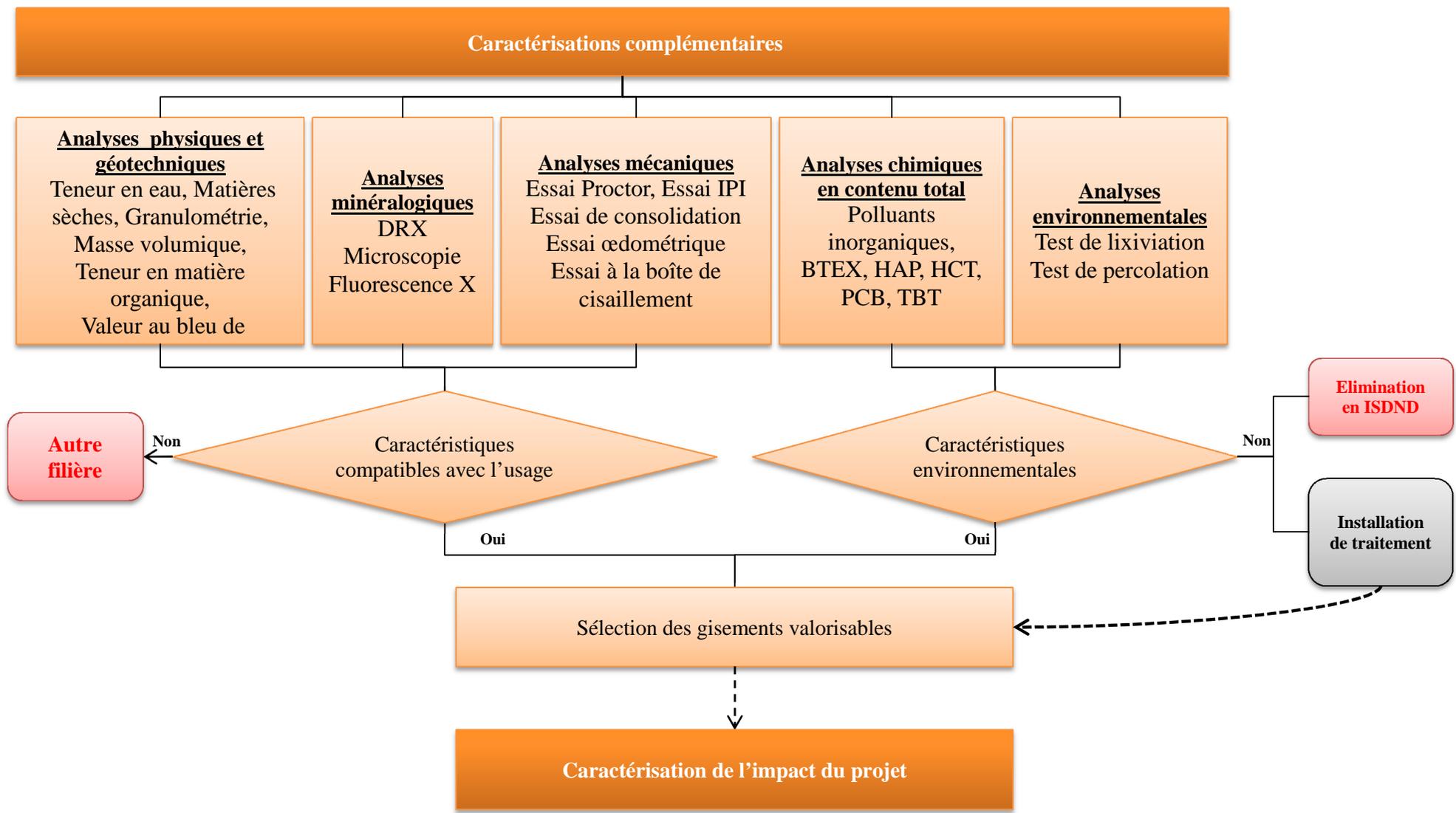


Figure 5. Caractérisations complémentaires sur sédiments bruts

5.2.1 Analyses physiques et géotechniques

Les caractérisations physique et géotechnique des sédiments fournissent des informations essentielles sur la nature et le comportement des sédiments en vue de leur valorisation. La circulaire du 14 juin 2000 précise les instructions générales d'échantillonnage et d'analyse des sédiments. Hormis la quantité de matériaux à draguer, il est nécessaire de réaliser les analyses suivantes : détermination des teneurs en matière sèche et en eau, de la granulométrie (% sable, limon, argile), de la masse volumique absolue, et de la teneur en matière organique. Ces analyses seront complétées par des caractéristiques géotechniques importantes tels que : la valeur au bleu de méthylène et les limites d'Atterberg. Le tableau ci-dessous résume les différentes analyses physiques et géotechniques à réaliser ainsi que les normes associées.

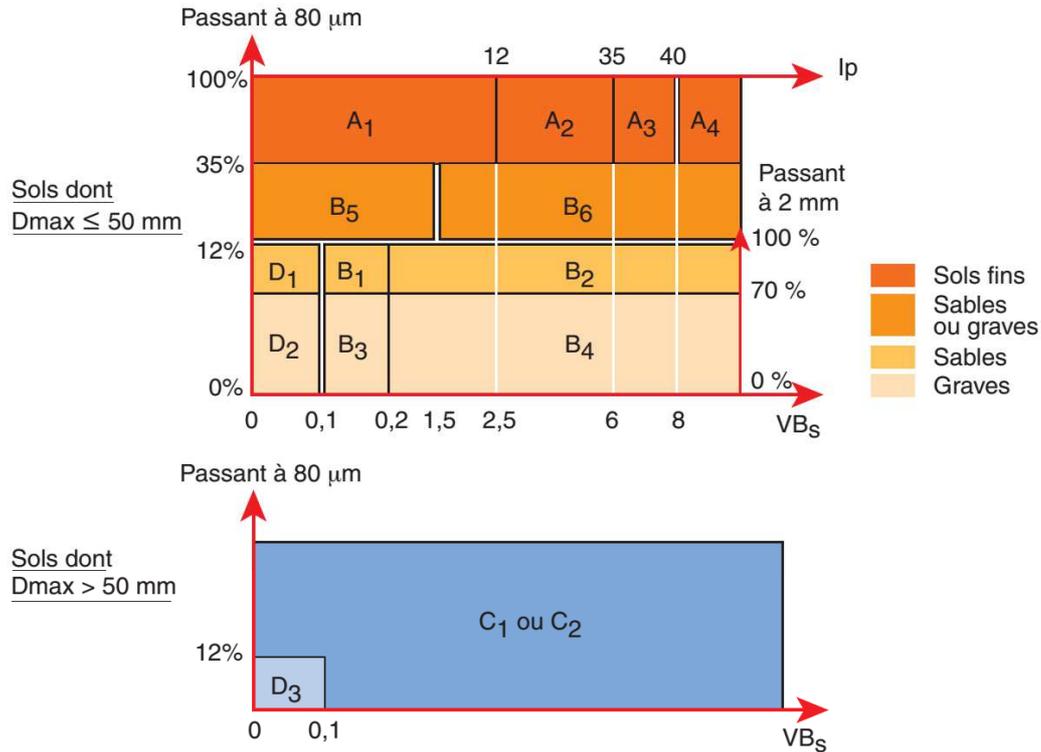
Tableau 4. Analyses physiques et géotechniques à réaliser sur les sédiments bruts

Essais	Normes
Matières sèches	NF EN 14346
Teneur en eau	NF P94-050
Granulométrie	ISO 13 320-1, NF P94-057, NF P94-040
Masse volumique absolue	NF P94-054, XP CEN ISO/TS 17892-3
Matière organique	NF EN 15169, XP P94-047
Valeur au bleu de méthylène	NF P94-068
Limites d'Atterberg : Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande Limite de plasticité au rouleau	NF P94-051
Limites d'Atterberg : Limite de liquidité au cône de pénétration	NF P94-052-1

La norme NF P 11-300 (Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières), connue sous l'appellation « Classement GTR », permet de définir les caractéristiques géotechniques des matériaux naturels et sous-produits industriels pouvant faire l'objet d'une utilisation en remblai (Figure 6).

Avec une taille de particule inférieure à 50 mm et une fraction argileuse non négligeable, les sédiments de dragage présentent généralement des propriétés géotechniques similaires aux sols de la classe A. Et selon la valeur des teneurs en matière organique des sédiments portuaires, on peut également les retrouver dans la classe F (Figure 6).

De par leurs caractéristiques physiques, les sédiments de dragage appartiennent généralement à la classe des matériaux argilo-limoneux à plus ou moins forte teneur en matière organique.



Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R ₁
			Calcaires	R ₂
		Roches argileuses	Marnes, argillites, pélites...	R ₃
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R ₄
		Roches salines	Sel gemme, gypse	R ₅
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...	R ₆	
Matériaux particuliers	Sols organiques et sous-produits industriels			F

Figure 6. Synoptique de classification des matériaux selon leur nature, selon la norme NF P 11-300 (CIMBETON, 2009)

5.2.2 Analyses minéralogiques

L'analyse minéralogique est une étape importante car elle permet d'avoir une meilleure connaissance de la matrice sédimentaire et de détecter les phases minéralogiques qui pourraient poser problème lors de la valorisation des sédiments (Figure 7). La caractérisation minéralogique des sédiments comprend l'analyse par fluorescence X des éléments majeurs (norme NF EN 15309) et la détection des phases minéralogiques par diffraction des rayons X (DRX).

Les techniques microscopiques (optique ou électronique) peuvent également être utilisées pour compléter l'analyse structurale des sédiments, notamment par la recherche de la nature des phases amorphes.

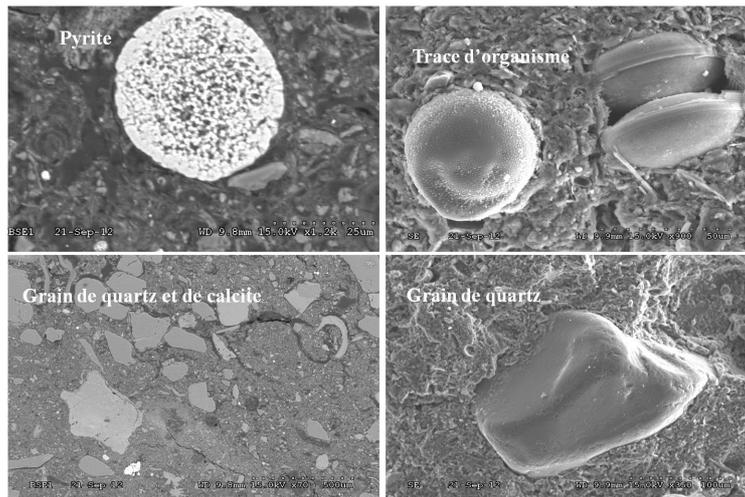


Figure 7. Microphotographies obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) d'un sédiment marin

5.2.3 Analyses mécaniques

L'emploi des sédiments dans les éco-modelés paysagers doit satisfaire certains critères géotechniques et mécaniques. A ce titre, la caractérisation géotechnique et mécanique des sédiments bruts devra être réalisée à l'aide des essais normalisés reportés dans cette section. Cette étape est déterminante pour mener à bien l'étude de dimensionnement de l'ouvrage.

Essai Proctor

La densité apparente finale d'un sol compacté dépend de la nature de celui-ci, de la teneur en eau et de l'énergie de compactage. Le compactage permet de resserrer la texture du sol, de réduire ses déformations, d'améliorer sa portance et sa résistance. Pour un sol donné et pour un mode de compactage déterminé, il existe une seule teneur en eau correspondant à la densité maximale. L'essai Proctor est réalisé selon la norme NF P 94-093.

Indice Portant Immédiat (IPI)

Cet essai est réalisé selon la norme NF P 94-078 pour déterminer la portance du matériau. L'indice portant immédiat IPI, qui décrit la capacité du matériau à supporter les charges engendrées par les engins de chantiers pendant les travaux, est défini par le rapport entre la force mesurée pour l'enfoncement d'une tige cylindrique dans le matériau étudié et la force donnée par rapport à un matériau de référence.

Préconsolidation

L'étude du comportement mécanique des sédiments à travers les essais de consolidation unidimensionnelle et de cisaillement nécessite une préconsolidation préalable du matériau. Le protocole de préconsolidation consiste en premier lieu à faire subir à l'échantillon disposé dans un conteneur cylindrique une dépression de 100 kPa par une aspiration à l'aide d'une pompe à vide jusqu'à la

stabilisation des tassements. A la fin de cette étape, après relâchement de la dépression engendrée par aspiration, l'échantillon subit des chargements par palier à l'aide d'un piston afin d'atteindre la contrainte de préconsolidation fixée à 100 kPa.

Cette pression de préconsolidation se définit comme la plus grande pression effective à laquelle a été soumis le matériau au cours de son histoire.

L'application d'une dépression puis d'un chargement par le haut s'avère très efficace pour améliorer l'homogénéité des éprouvettes en termes de teneur en eau et d'indice des vides sur toute la hauteur de l'échantillon.

Pour des raisons pratiques, on distingue deux types de moules de préconsolidation : un moule de diamètre intérieur de 36 mm pour confectionner des éprouvettes destinées à la réalisation d'essais triaxiaux et un moule de diamètre intérieur de 70 mm destiné aux essais œdométriques.

La procédure de préparation des échantillons consiste à homogénéiser le matériau, à mesurer sa teneur en eau initiale, à ajouter éventuellement de l'eau déminéralisée afin d'atteindre une teneur en eau égale au moins à $1.5 \cdot W_L$, à remplir par couche les consolidomètres sur une table vibrante afin d'évacuer les bulles d'air, à remplir les trois quarts du cylindre du consolidomètre, et à relever la masse de chaque consolidomètre ainsi que la hauteur initiale du matériau.

Lors de la préconsolidation et sous les différentes charges appliquées, le sédiment est soumis à une sédimentation des particules solides qui le constituent.

Les flocons de vase perdent progressivement une partie de leur eau interstitielle. Leur réseau va se resserrer et former un matériau qui, au cours de ce tassement, passera par des états physiques différents: liquide, visqueux puis solide après sédimentation prolongée.

Trois phases se distinguent lors du tassement en milieu naturel d'une couche de vase:

- La sédimentation se fait sur toute la couche ;
- La sédimentation se poursuit en couche superficielle et la consolidation commence au fond de l'eau ;
- La consolidation se produit sur toute la couche de vase.

Le principe de la consolidation est basé sur la loi de Terzaghi. Au fur et à mesure de la consolidation, la surpression interstitielle diminue et les efforts du chargement appliqués sont repris en totalité par le squelette granulaire. La migration de l'eau vers l'extérieur via la pierre poreuse s'effectue à une vitesse dépendante de la perméabilité de matériau.

Une fois la préconsolidation terminée, le tassement est relevé et l'évolution de l'indice des vides est reportée en fonction du temps. Des mesures de teneur en eau, sur la partie haute et la partie basse de chaque échantillon, sont ainsi effectuées afin de vérifier l'homogénéité verticale des échantillons.

Essai œdométrique

L'objectif de l'essai est de mesurer la relation entre la contrainte appliquée et la déformation engendrée aussi bien en phase de chargement qu'en phase de déchargement. Cette relation peut être exprimée en termes de variation de l'indice des vides en fonction du logarithme de la contrainte verticale appliquée. A partir de ce résultat, il est possible de mesurer les indices de compression C_c et de gonflement C_s ainsi que la pression de préconsolidation engendrée par l'histoire de chargement que le matériau a subi.

Essai à la boîte de cisaillement

Cet essai consiste à étudier la résistance au cisaillement d'un échantillon suivant un plan de rupture imposé et supposé horizontal. On distingue deux types d'essais en fonction du drainage :

- Consolidé non drainé : utilisé pour étudier le comportement du sol à court terme. Son principe consiste à appliquer une vitesse de déplacement assez élevée tout en assurant une diffusion homogène des efforts appliqués ;
- Consolidé drainé : essai très lent auquel on applique une vitesse de déplacement très faible afin de reproduire le comportement du sol à long terme.

Le principe de la boîte de cisaillement direct consiste à placer l'échantillon à l'intérieur des deux demi-boîtes indépendantes. La force de cisaillement exercée sur la demi-boîte inférieure et la force normale est exercée sur la demi-boîte supérieure. Grâce au système d'acquisition, le tassement vertical et la charge de cisaillement appliqués sont mesurés durant l'essai. Au bout de 10% de la déformation de l'éprouvette, l'essai est arrêté.

L'exploitation de ces données permet de :

Calculer la contrainte normale σ , supposée uniforme :

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

Avec A : aire de la section de l'éprouvette,

Calculer la contrainte tangentielle τ , supposée uniforme :

$$\tau = \frac{T}{A}$$

- tracer la courbe « effort de cisaillement-déplacement relatif des demi-boîtes ».
- reporter directement sur un diagramme de Mohr (σ, τ) les valeurs maximales des contraintes normales et tangentielles lors de la rupture (pic de la courbe « effort-déformation ») et obtenir ainsi la relation de la droite de Coulomb :

$$\tau = C + \sigma \times \operatorname{tg} \varphi$$

Avec τ : Contrainte tangentielle ;

- C : Cohésion ;
- σ : Contrainte normale ;
- φ : Angle de frottement.

5.2.4 Analyses chimiques

La gestion des sédiments de dragage relève de la loi sur l'eau n° 92.3 du 3 janvier 1992 et des décrets et arrêtés pris pour son application. Ainsi, les seuils de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments portuaires sont définis par les arrêtés du 9 août 2006 (Eléments traces et PCB), du 23 décembre 2009 (TBT) et du 08 Février 2013 pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (Tableaux 5 et 6). Les seuils définis dans ces arrêtés (N1 et N2) caractérisent la qualité chimique du matériau et contribuent à déterminer, le cas échéant, la démarche à retenir en termes d'études et de solutions techniques.

Ces seuils de qualité constituent également des points repères permettant d'orienter les sédiments vers une filière de gestion : la gestion à terre en valorisation ou stockage/confinement définitif.

Certains sites sont susceptibles de présenter des problématiques de contaminations spécifiques qui peuvent nécessiter l'analyse de polluants réglementés au titre de la loi sur l'eau. L'étude préalable du site permettra, au travers de documents existants, d'identifier l'ensemble des contaminants susceptibles d'être présents dans les sédiments.

Tableau 5. Niveaux de références de l'arrêté du 9 août 2006

Polluants (mg/kg*)	Niveau 1	Niveau 2
Arsenic (As)	25	50
Cadmium (Cd)	1,2	2,4
Chrome (Cr)	90	180
Cuivre (Cu)	45	90
Mercure (Hg)	0,4	0,8
Nickel (Ni)	37	74
Plomb (Pb)	100	200
Zinc (Zn)	276	552
PCB congénère 28	0,025	0,05
PCB congénère 52	0,025	0,05
PCB congénère 101	0,05	0,1
PCB congénère 118	0,025	0,05
PCB congénère 138	0,05	0,1
PCB congénère 153	0,05	0,1
PCB congénère 180	0,025	0,05
PCB totaux	0,5	1

* en sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm

Tableau 6. Niveaux de référence des arrêtés du 23 décembre 2009 (TBT) et 08 février 2013 (HAP)

Polluants ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	Niveau 1	Niveau 2
Tributylétain	100	400
Naphtalène	160	1130
Acénaphène	15	260
Acénaphthylène	40	340
Fluorène	20	280
Anthracène	85	590
Phénanthrène	240	870
Fluoranthène	600	2850
Pyrène	500	1500
Benzo[a]anthracène	260	930
Chrysène	380	1590
Benzo[b]fluoranthène	400	900
Benzo[k]fluoranthène	200	400
Benzo[a]pyrène	430	1015
Dibenzo[a,h]anthracène	60	160
Benzo[g,h,i]pérylène	1700	5650
Indéno[1,2,3-cd]pyrène	1700	5650

TBT : Tributylétain

5.2.5 Analyses environnementales

En l'absence de cadre méthodologique spécifique à l'utilisation des sédiments de dragage en éco-modelés paysagers, la caractérisation environnementale devra se faire à l'aide d'essais normalisés en s'appuyant sur les référentiels réglementaires et techniques existants, à savoir l'arrêté du 28/10/2010, les seuils établis par le guide SETRA (2011) pour un usage des matériaux alternatifs en remblais recouverts, et la directive 1999/31/CE.

Arrêté du 28/10/2010

Le caractère inerte d'un sédiment est systématiquement évalué à l'aide de tests de lixiviation réalisés suivant la norme NF EN 12457-2 (essai en bûchée unique avec un rapport liquide/solide de 10 l/kg). Outre les valeurs seuils de lixiviation relatives aux normes d'admission en décharge (Tableau 7), l'arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux critères d'acceptation en Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) impose, par ailleurs, que les déchets inertes satisfassent également à des valeurs seuils sur sédiment brut pour plusieurs composés (Tableau 8), certains étant déjà analysés dans le cadre de la loi sur l'eau. Un sédiment de dragage est classé non inerte s'il ne répond pas aux critères d'admission en Installation de Stockage de Déchets Inertes.

Tableau 7. Seuils de lixiviation relatifs à l'acceptabilité des déchets aux installations de stockage de déchets inertes

Paramètres	Valeurs seuil d'admission déchets inertes* (mg/kg de matière sèche)
As	0,5
Ba	20
Cd	0,04
Cr total	0,5
Cu	2
Hg	0,01
Mo	0,5
Ni	0,4
Pb	0,5
Sb	0,06
Se	0,1
Zn	4
Chlorure (****)	800
Fluorure	10
Sulfate (****)	1000 (**)
Indice phénols	1
COT sur éluat (***)	500
FS (fraction soluble) (****)	4000

(*) Les valeurs limites à respecter peuvent être adaptées par arrêté préfectoral dans les conditions spécifiées à l'article 10 de l'arrêté du 28 octobre 2010.

(**) Si le déchet ne respecte pas cette valeur pour le sulfate, il peut être encore jugé conforme aux critères d'admission si la lixiviation ne dépasse pas les valeurs suivantes : 1500 mg/L à un ratio L/S=0,1 L/Kg et 6000 mg/kg de matière sèche à un ratio L/S= 10 L/kg. Il est nécessaire l'essai de percolation NF CEN/TS 14405 pour déterminer la valeur lorsque L/S=0.1 L/kg dans les conditions d'équilibre initial ; la valeur correspondant à L/S= 10 L/kg peut être déterminée par un essai de lixiviation NF EN 12457-2 ou par un essai de percolation NF CEN/TS 14405 dans des conditions approchant l'équilibre local.

(***) Si le déchet ne satisfait pas à la valeur limite indiquée pour le carbone organique total (COT) sur éluat à sa propre valeur de pH, il peut aussi faire l'objet d'un essai de lixiviation NF EN 12457-2 avec un pH compris entre 7,5 et 8,0. Le déchet peut être jugé conforme aux critères d'admission pour le COT sur éluat si le résultat de cette détermination ne dépasse pas 500 mg/kg de matière sèche. (****) Si le déchet ne respecte pas au moins une des valeurs fixées pour le chlorure, le sulfate ou la fraction soluble, le déchet peut être encore jugé conforme aux critères d'admission s'il respecte soit les valeurs associées au chlorure et au sulfate, soit celle associée à la fraction soluble.

Tableau 8. Valeurs seuil sur déchet brut fixées par l'arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes

Paramètres	Valeurs seuil d'admission déchets inertes * (mg/kg de matière sèche)
COT (carbone organique total)	30 000 (**)
BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes)	6
PCB (Polychlorobiphényles, 7 congénères) Congénères n°28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180	1
Hydrocarbures (C10 à C40)	500
HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques)	50

(*) Les valeurs limites à respecter peuvent être adaptées par arrêté préfectoral dans les conditions spécifiées à l'article 10 de l'arrêté du 28 octobre 2010.

(**) Pour les sols, une valeur limite plus élevée peut être admise, à condition que la valeur limite de 500 mg/kg de matière sèche soit respectée pour le carbone organique total sur éluat, soit au pH du sol, soit pour un pH situé entre 7,5 et 8,0.

Référentiel SETRA (2011)

Dans le cas d'une valorisation des sédiments de dragage en éco-modelés paysagers, les sédiments de dragage doivent être caractérisés selon leur comportement à la percolation (norme NF CEN/TS 14405). En l'absence de cadre méthodologique spécifique à cette filière de valorisation, il est possible de s'appuyer sur les seuils établis pour des usages routiers de « types 2 », tel que la réalisation de merlons phoniques ou paysagers (Figure 8).

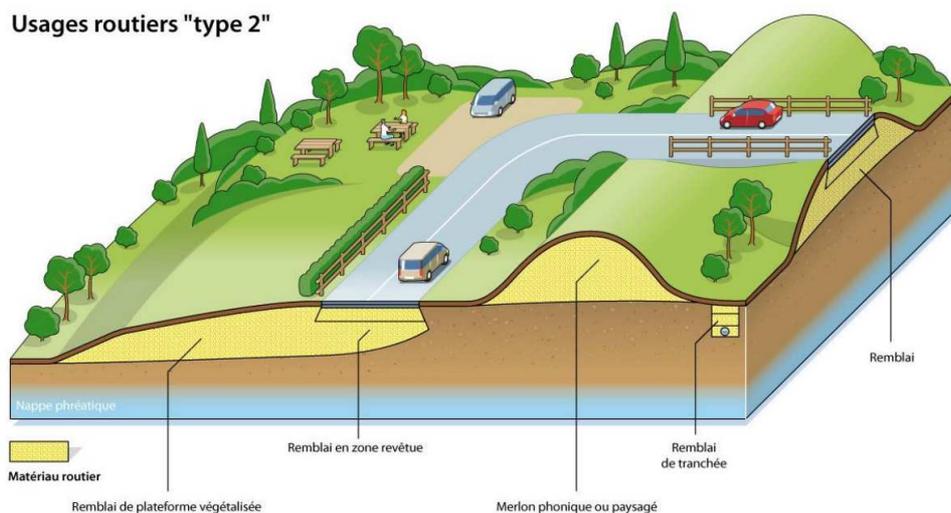


Figure 8. Illustration des différents usages routiers de « type 2 » (SETRA, 2011)

Tableau 9. Valeurs limites en percolation permettant de justifier l'utilisation d'un matériau alternatif en remblai technique ou accotement recouverts

Scénario « remblai technique ou accotement recouverts »	
Quantité relarguée cumulée à L/S = 10 L/kg (essai de percolation NF CEN/TS 14405)	
Paramètres	Valeur (mg/kg de matière sèche)
As	0,5
Ba	28
Cd	0,16
Cr Total	2
Cu	50
Hg	0,04
Mo	2,8
Ni	0,8
Pb	0,5
Sb	0,2
Se	0,4
Zn	50
Fluorure	30
Chlorure	5000
Sulfate	5000
pH	[5,5-12,5] à respecter par au moins 5/7 des percolats [5,5-13,0] à respecter par les 7 percolats

Seuils d'admission des déchets dangereux et non dangereux en décharge

Dans le cadre de la directive 1999/31/CE, la Commission européenne a harmonisé les spécifications demandées aux déchets admissibles en installations de stockage, en termes de fraction lixiviable en composés minéraux et de composition en composés organiques, avec des valeurs adaptées au type d'installation de stockage. Ces valeurs ont été transposées en droit français pour vérifier l'aptitude des déchets à être éliminés en installation de stockage de déchets non dangereux inertes d'une part (ISDI) et en installation de stockage de déchets dangereux d'autre part (ISDD).

Ces essais préalables à l'admission en installation de stockage permettent de vérifier la compatibilité des émissions de polluants avec les niveaux de protection assurés par l'installation vis-à-vis de l'environnement. La décision n° 2003/33/CE du 19/12/02 établit les critères et les procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE.

Les valeurs limites de lixiviation fixées ci-dessous s'appliquent aux déchets granulaires admissibles dans les décharges pour déchets dangereux et non dangereux; les valeurs de relargage cumulé sont calculées pour L/S =2 l/kg et L/S =10 l/kg ; le C₀ (premier éluat de l'essai de percolation, avec L/S =0,1 l/kg) est directement exprimé en mg/l. Les déchets granulaires comprennent tous les déchets non monolithiques.

Tableau 10. Valeurs limites en lixiviation et en percolation pour les déchets granulaires admissibles dans les décharges pour déchets dangereux et non dangereux.

Essais	Valeurs limites pour les déchets dangereux			Valeurs limites pour les déchets non dangereux		
	Lixiviation (NF EN 12457-1)		Percolation (NF CEN/TS 14405)	Lixiviation (NF EN 12457-1)		Percolation (NF CEN/TS 14405)
Paramètres	L/S = 2 L/kg	L/S = 10 L/kg	C ₀ (mg/L)	L/S = 2 L/kg	L/S = 10 L/kg	C ₀ (mg/L)
As	6	25	3	0,4	2	0,3
Ba	100	300	60	30	100	20
Cd	3	5	1,7	0,6	1	0,3
Cr total	25	70	15	4	10	2,5
Cu	50	100	60	25	50	30
Hg	0,5	2	0,3	0,05	0,2	0,03
Mo	20	30	10	5	10	3,5
Ni	20	40	12	5	10	3
Pb	25	50	15	5	10	3
Sb	2	5	1	0,2	0,7	0,15
Se	4	7	3	0,3	0,5	0,2
Zn	90	200	60	25	50	15
Chlorure	17000	25000	15000	10000	15000	8500
Fluorure	200	500	120	60	150	40
Sulfate	25000	50000	17000	10000	20000	7000
COT sur éluat (*)	480	1000	320	380	800	250
Fraction soluble (**)	70000	100000	-	40000	60000	-

(*) Si le déchet ne satisfait pas aux valeurs indiquées pour le COT sur éluat à sa propre valeur de pH, il peut aussi faire l'objet d'un essai avec un rapport L/S = 10 l/kg et un pH compris entre 7,5 et 8. Le déchet peut être jugé conforme aux critères d'admission pour le COT sur éluat si le résultat de cette détermination ne dépasse pas respectivement 1000 mg/kg et 800 mg/kg pour les déchets dangereux et non dangereux.

(**) Les valeurs correspondant à la fraction soluble (FS) peuvent aussi être utilisées à la place des valeurs fixées pour le sulfate et le chlorure.

Outre les valeurs limites de lixiviation, les déchets granulaires doivent satisfaire aux critères supplémentaires suivants pour l'admission dans les décharges pour déchets dangereux :

Tableau 11. Paramètres complémentaires à évaluer pour les déchets granulaires admissibles dans les décharges pour déchets dangereux.

Paramètre	Valeur
Perte au feu (*)	10 %
COT (*)	6 % (**)
CNA (capacité de neutralisation acide)	A évaluer

(*) Il convient d'utiliser soit la perte au feu, soit le COT.

(**) Si cette valeur est dépassée, une valeur limite plus élevée peut être admise par l'autorité compétente à condition que la valeur limite de 1000 mg/kg pour le carbone organique total (COT) sur éluat soit respectée pour L/S = 10 L/kg, soit au pH du déchet, soit pour un pH compris entre 7,5 et 8.

5.3 Caractérisation de l'impact du projet

5.3.1 Utilisation d'installations de transit et/ou de traitement

Un matériau destiné à une application en génie civil possède des caractéristiques qu'il convient de modifier selon le type d'utilisation. Une teneur en eau importante, telle que celle rencontrée dans un sédiment de dragage, présente un inconvénient majeur pour une valorisation en éco-modèles paysagers.

Un prétraitement sera donc nécessaire afin de diminuer la teneur en eau du matériau. Il existe différentes techniques utilisant par exemple la consolidation sous vide, les bassins de décantation, les

centrifugeuses, les évaporateurs, ou encore les filtres presse et filtres bande. Ces techniques de déshydratation permettent de réduire les volumes à traiter en éliminant jusqu'à 50% de l'eau interstitielle contenue dans les sédiments qui en renferment de 50 à 90% selon la technique de dragage utilisée. Ainsi, l'identification d'un site de stockage temporaire et/ou d'une plateforme de prétraitement pour le dessablage et/ou la déshydratation des sédiments dragués est une étape indispensable avant le lancement de l'étude de faisabilité.

Dans le cas où le Maître d'ouvrage est gestionnaire de sédiments, et si une installation de transit et/ou de traitement est requise pour l'opération de valorisation, une étude d'impact est obligatoire au titre de la législation ICPE. Le contenu de l'Etude d'impact est précisé à l'article R122-5 du code de l'environnement. Par ailleurs, il existe un guide DREAL de juin 2012 (partie II C dédiée à l'étude d'impact d'une ICPE) ainsi qu'un guide INERIS d'août 2013 établis pour les ICPE. Ces guides peuvent servir de référence et constituer une aide à l'élaboration d'une étude d'impact.

La circulaire du 4 juillet 2008 relative à la procédure concernant la gestion des sédiments lors de travaux ou d'opérations impliquant des dragages ou curages maritimes et fluviaux stipule qu'une déclaration ou une autorisation ICPE est nécessaire lorsque les matériaux excédentaires commercialisables sont constitués de produits minéraux (sables, graviers, galets) et acheminés vers une station de transit ayant une capacité de stockage supérieure à 15 000 mètres cubes (Déclaration) ou 75 000 mètres cubes (Autorisation) (rubrique 2517, voir 2515 de la nomenclature des ICPE).

Les décrets n° 2009-1341 du 29 octobre 2009 et n° 2010-369 du 13 avril 2010 ont modifié en profondeur la nomenclature des installations classées. Le classement administratif des activités de traitement de déchets ne porte désormais plus sur la provenance des déchets, mais sur leur nature et dangerosité, en cohérence avec l'importance des dangers et inconvénients que génèrent le traitement de tels déchets.

La circulaire du 24 décembre 2010 fixe les modalités d'application de ces différents décrets. Ainsi, les terrains de dépôt de sédiments sont assimilés à des installations de stockage ou de transit de déchets et sont soumis à autorisation au titre de la législation des ICPE.

Le tableau 12 regroupe les rubriques potentielles visées par la nomenclature ICPE.

La Directive Cadre Eau (2000/60/CE) et sa directive fille eaux souterraines (2006/118/CE) imposent un objectif de résultat, le bon état des eaux à l'horizon 2015, la réduction progressive et la suppression des rejets, émissions ou pertes à l'horizon 2020 ; d'où la nécessité de mettre en place des réseaux de contrôle sur les masses d'eaux souterraines et notamment sur les pollutions ponctuelles. Cette directive est citée ici dans le cadre d'une gestion à terre des sédiments. Qu'ils soient potentiellement pollués ou non inertes du fait de leur teneur en sel, le dépôt de ces sédiments implique la mise en place de mesures de suivi des eaux souterraines au droit des sites de dépôt, dans une optique de contrôle et suppression des rejets. A cet égard, rappelons par ailleurs que des normes réglementaires viennent cadrer ce type de rejet à travers l'application de l'Arrêté du 9 août 2006 et de ses seuils R1/R2.

Dans la perspective d'une valorisation des sédiments de dragage, la durée de la phase de dépôt temporaire à terre et de prétraitement ne pourra pas excéder 3 ans. Cette échéance découle de la

définition donnée par l'arrêté du 09/09/97 sur les ISDND (article 1). Par ailleurs, compte tenu de la nature et du comportement des sédiments de dragage les rubriques 2716 et 2791 de la nomenclature ICPE, relatives aux activités de transit et de traitement non thermique (phase de déshydratation des sédiments), sont les plus pertinentes pour la gestion à terre des sédiments valorisables.

Tableau 12. Rubriques potentielles visées par la nomenclature ICPE

Typologie de sédiments	Activités	N° Rubrique ICPE
Sédiment inerte	Transit	2516
		Pulvérulent
		Non pulvérulent
		Broyage, concassage
		Criblage, tamisage, etc.
	Stockage	L541-30-1
Sédiment non dangereux	Transit	2716
	Stockage	2760-2
	Traitement thermique	2771
	Traitement non thermique	2791
Sédiment dangereux	Transit	2717/2718
	Stockage	2760-1
	Traitement thermique	2770
	Traitement non thermique	2790

5.3.2 Réalisation de l'ouvrage à base de sédiment

La gestion à terre des produits de dragage peut être à l'origine de la dispersion de polluants dans l'environnement. Bien que toutes les précautions soient prises pour limiter les incidences sur le milieu et la santé humaine, des risques pour l'un comme pour l'autre sont toujours possibles. Afin de s'assurer que ces risques sont négligeables et socialement acceptables, des études de risques environnementaux et sanitaires sont fortement recommandées bien qu'il n'y ait aucune obligation réglementaire sur ce sujet. La démarche est destinée également à intégrer les préoccupations environnementales dans la conception du projet et à éclairer l'autorité environnementale chargée d'examiner le projet et d'en autoriser la réalisation.

Les grandes étapes d'une évaluation des risques sont :

- Un bilan des données existantes sur la zone d'étude. A ce stade sont présentées les données des concentrations des polluants, dans les sédiments et l'eau le cas échéant, qui constituent l'état initial ;
- Un inventaire et le choix des polluants. Cette étape consiste en une argumentation sur la liste des polluants retenus pour l'étude et sur leurs concentrations à considérer ;
- L'identification des dangers et de la relation dose/réponse. Dans cette étape sont retenues de façon argumentée les Valeurs Toxicologiques de Référence des polluants choisis à l'étape précédente ;

- Une estimation des expositions. Elle se déroule en plusieurs temps qui sont :
 - (i) le choix argumenté des voies d'exposition retenues (ingestion, contact cutané) ;
 - (ii) la description des méthodes et outils utilisés pour la détermination des concentrations dans les différents médias environnementaux (sédiments, eau, flore, faune, etc.) entrant en contact avec l'Homme. A ce stade sont introduites les données de l'état initial dans les sédiments et dans l'eau, le cas échéant, pour les concentrations des polluants étudiés ;
 - (iii) la définition des scénarii d'exposition qui précisent les populations cibles, les durées d'expositions, les hypothèses de ration alimentaire, etc. ;
 - (iv) le calcul, pour les populations cibles, des quantités de polluants absorbées sous la forme d'une dose d'exposition.
- La caractérisation du risque. Pour les effets toxiques avec seuils, elle consiste à calculer un quotient de danger (QD) en comparant les quantités absorbées aux Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR). Pour les effets sans seuil, elle consiste à calculer un Excès de Risque Individuel (ERI) de développer un cancer
- L'analyse des incertitudes de la caractérisation du risque.

L'évaluation des risques se termine par une conclusion dans laquelle les résultats sont résumés, commentés et mis en perspective.

Approche globale

De manière générale, quelle que soit la méthodologie suivie, une évaluation des risques prend en compte la coexistence d'une ou plusieurs sources de danger (D) et d'une ou plusieurs cibles potentielles (C) susceptibles d'être affectées par la source de danger. L'évaluation des risques revient à étudier la source, la cible ainsi que les interactions potentielles entre la source et la cible. Ces interactions existent via les voies de transfert (T) qui surviennent entre D et C. Ces interactions peuvent être schématisées de la manière suivante.

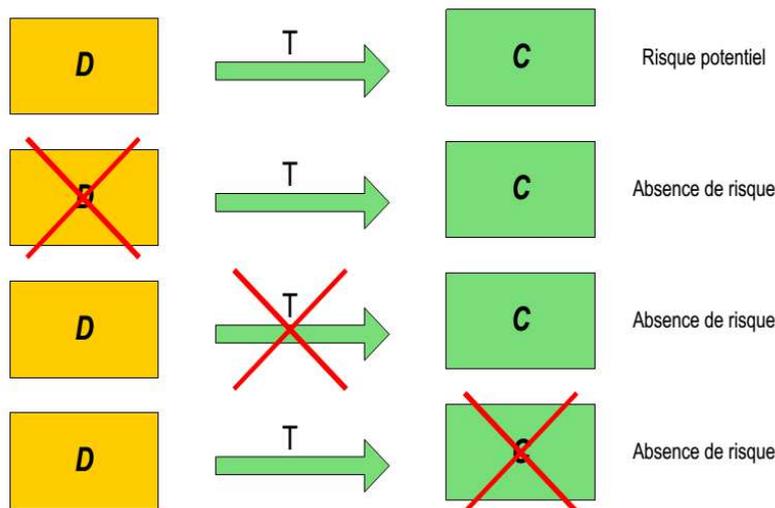


Figure 9. Principe de base de l'évaluation des risques

En l'absence de source de danger, il est évident que tout risque pour la cible peut être exclu. De même, en l'absence de cible, la source de danger ne pose pas de problème. Dans le cas où il n'existe aucune voie de transfert entre la source et la cible, les risques peuvent également être exclus, même si celles-ci se situent à proximité l'une de l'autre. Toute évaluation des risques débute logiquement par l'inventaire des sources de danger et des cibles, afin d'établir par la suite leurs interactions potentielles. Ces interactions sont alors représentées sous forme de schéma conceptuel. La détermination des cibles et des voies de transfert doivent être réalisées conjointement.

Ceci permet d'éviter de mettre en œuvre des moyens qui pourraient s'avérer disproportionnés par rapport à la gravité et/ou à la complexité effective de la situation. A cet effet une approche itérative de l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux est mise en œuvre. Cette approche consiste à envisager la situation de la manière la plus globalisante dans un premier temps, pour aller vers quelque chose de plus en plus précis par la suite tendant d'avantage vers la situation réelle.

Ainsi, dès le début de l'étude, la modélisation du phénomène étudié est simplifiée en tenant compte d'hypothèses diverses. Cette approche est cohérente à partir du moment où les hypothèses sont conservatoires, c'est-à-dire qu'elles envisagent une situation plus défavorable pour l'environnement ou la santé que dans la réalité (exemple : on suppose que les concentrations en contaminants dans un lac sont maximales pour la totalité du volume, plutôt que de considérer un gradient de concentration au sein de la masse d'eau). Les risques encourus par les cibles sont alors estimés.

Dans le cas, où ces risques s'avèrent inexistantes pour l'environnement ou pour la santé, l'absence de risques liés au phénomène ou à la situation étudiée peut être conclue. Dans le cas contraire, la modélisation devra d'avantage tendre vers la réalité.

Cela peut être réalisé de différentes façons :

- Au moyen de recherches documentaires et/ou d'investigations terrains complémentaires, ces dernières visant soit à lever directement des hypothèses, soit à servir de base de données pour la modélisation ;
- Au moyen d'une complexification du modèle (prise en compte de phénomènes physicochimiques plus poussés, amélioration de la connaissance du comportement de la cible, etc.)

Cette approche itérative peut être résumée par le logigramme suivant.

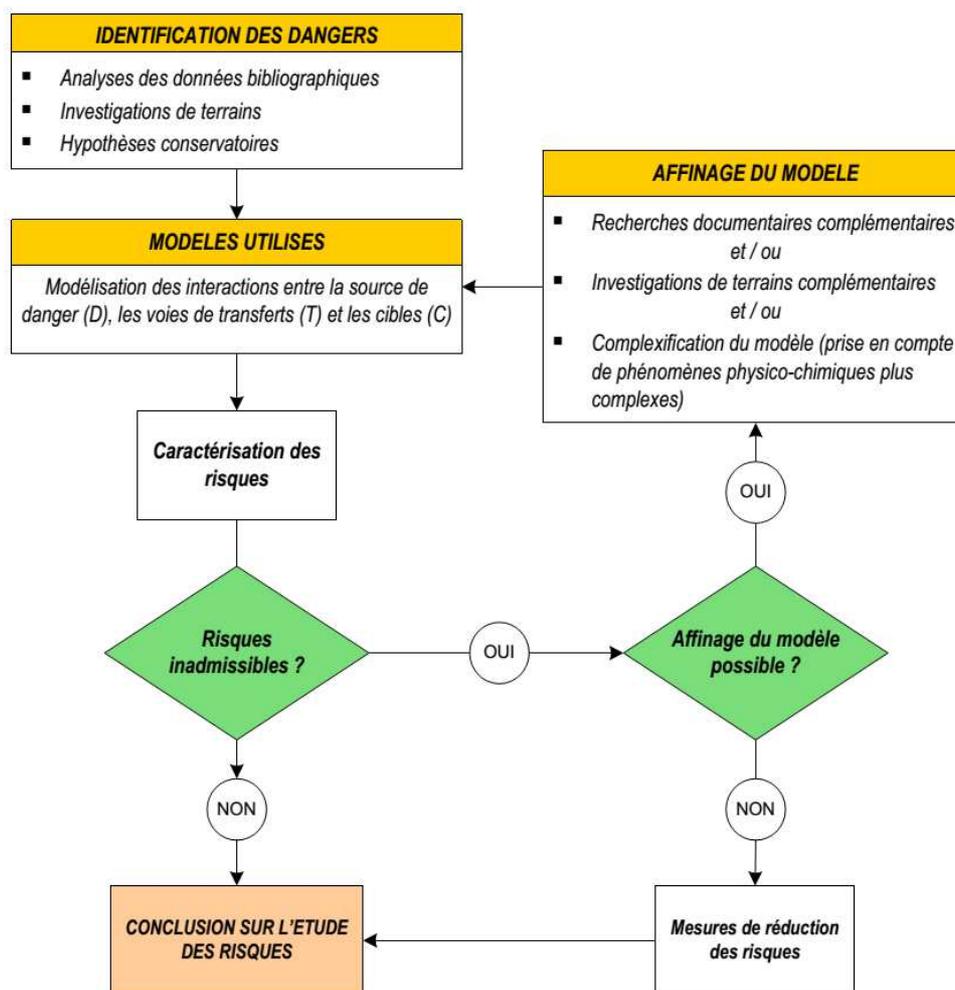


Figure 10. Démarche itérative de l'évaluation des risques

En vertu du principe de proportionnalité, les moyens mis en œuvre pour modéliser la situation doivent s'ajuster à la complexité et/ou à la gravité de la situation étudiée. Dans certains cas, il arrive un moment où la modélisation atteint ses limites en raison de la complexité du phénomène (ou d'un manque de données ou de connaissances scientifiques) avant que l'absence de risque ait été démontrée. Un ultime contrôle peut alors être réalisé sous forme de mesures de terrains ou d'essais pilotes en laboratoire. Dans le cas où ces tests ou mesures renseignent des risques inadmissibles, des mesures de prévention devront être mises en œuvre pour supprimer ces risques. Dans certains cas, que ce soit pour des raisons

financières, techniques ou de délai, il peut être plus intéressant de proposer des mesures de prévention plutôt que de pousser la modélisation trop loin.

Evaluation des risques environnementaux

L'évaluation du risque chimique dans l'environnement doit permettre d'estimer si la présence d'un contaminant donné dans le milieu naturel présente un risque immédiat ou à venir pour l'environnement.

Plusieurs méthodes d'évaluation du risque chimique existent. Celle utilisée se base sur la méthodologie européenne, mise en application par le Règlement (CE) n°1488/94 de l'Union Européenne et détaillée dans le guide méthodologique européen « Technical Guidance Document » (ECB, 2003), servant de document de référence. Les deux hypothèses fondamentales de cette méthodologie sont :

- 1) La protection des espèces d'un écosystème protège sa structure et donc son fonctionnement ;
- 2) La protection de l'espèce la plus sensible permet la protection de l'ensemble de l'écosystème.

Comme indiqué sur la ci-dessous, la démarche d'évaluation du risque chimique dans l'environnement met en relation deux concepts :

- L'évaluation de l'exposition des écosystèmes, qui repose sur la mesure de la concentration d'une substance dans un compartiment donné de l'environnement (eau douce, eau marine, sédiment, biote). Cette concentration peut également être estimée à partir de modèles appropriés. Cette étape débouche sur l'établissement de PEC (Predicted Environmental Concentration) ;
- L'évaluation du danger, qui consiste en une caractérisation de l'écotoxicité d'une substance, afin d'établir sa concentration maximale ne présentant pas d'effets délétères pour le milieu naturel (PNEC : Predicted No Effect Concentration). Cette concentration peut être variable selon le compartiment de l'environnement ; sa pertinence est fonction de l'abondance et de la nature des données d'écotoxicité disponibles pour l'établir. Plus la concentration sans effet d'une substance est faible, plus cette substance est dangereuse pour le milieu naturel. Pour un certain nombre de substances de la liste prioritaire DCE, il existe des valeurs seuils réglementaires appelées NQE (Normes de Qualité Environnementale), qui sont dérivées des PNEC.

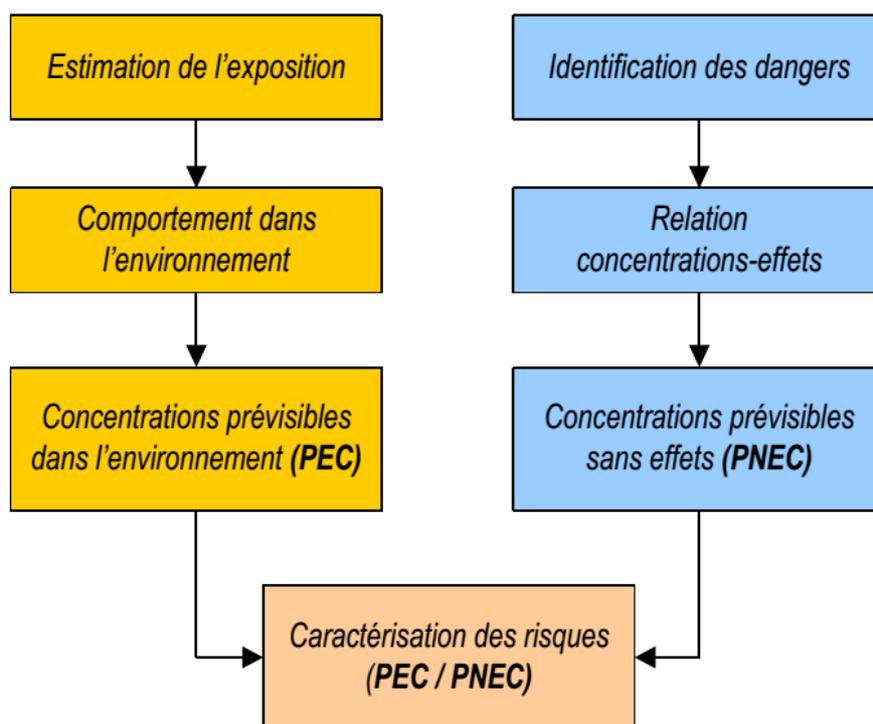


Figure 11. Schéma de l'évaluation du risque chimique dans l'environnement (Marchand et Tissier, 2005)

Suite à ces deux étapes, l'évaluation du risque, à proprement dite, est réalisée par confrontation entre la PEC et la PNEC. Trois cas peuvent alors se présenter :

- $PEC > PNEC$: La valeur d'exposition dépasse la valeur seuil ; il y a un risque pour le milieu. Il est cependant possible que le risque soit surévalué. Un affinage des connaissances vis-à-vis les PEC ou des PNEC peut s'avérer nécessaire ;
- $PEC < PNEC$: La valeur d'exposition est en deçà de la valeur seuil ; il n'y a pas de risque pour le milieu. Cela est avéré si la PEC est systématiquement surévaluée, et si la PNEC est systématiquement sous-évaluée ;
- $PEC \approx PNEC$: la valeur d'exposition est similaire à la valeur seuil ; le risque ne peut être déterminé dans l'état actuel des connaissances. PEC et/ou PNEC doivent être recalculées de façon plus précise (avec plus de données, des méthodes plus adaptées) pour pouvoir statuer sur le risque.

Les PNEC sont calculées par des organismes experts, comme l'INERIS en France. La méthodologie utilisée pour estimer les PNEC est décrite dans le Technical Guidance Document (ECB, 2003).

Selon les données disponibles, il existe des PNEC eau douce, eau marine, sédiment et orale (empoisonnement secondaire des prédateurs par leurs proies). Toutes ces valeurs seuils sont extrapolées à partir de résultats expérimentaux, affectés d'un facteur d'incertitude variable selon la qualité et la quantité des données nécessaires au calcul. Les études menées dans le cadre de la démarche SEDIMATERIAUX ont été réalisées à partir des PNEC des substances provenant des fiches toxicologiques de l'INERIS.

Evaluation des risques sanitaires

L'évaluation du risque sanitaire a été définie comme « l'évaluation des informations sur le danger intrinsèque des substances, le degré d'exposition de l'Homme à ces substances, et la caractérisation du risque qui en découle » (National Research Council, 1994).

L'évaluation des risques sanitaires doit être conforme au cadre défini dans les guides généraux de l'Institut national de Veille Sanitaire (INVS, 2000) et aux modalités de mise en œuvre décrites par le guide méthodologique pour l'évaluation des risques sanitaires des études d'impact des ICPE établi par l'INERIS (INERIS, 2003). De même, elle doit prendre en considération les guides techniques existants pour les filières étudiées, notamment le « Guide Technique provisoire relatif à l'acceptabilité des matériaux alternatifs en techniques routières ». Ce type de démarche doit aboutir à une analyse structurée où les éléments d'informations disponibles en l'état actuel des connaissances scientifiques sont collectés, ordonnés et évalués afin de quantifier les risques d'une manière transparente. Ainsi, l'étude des risques sanitaires réalisée se décompose en 4 étapes indissociables détaillées et synthétisées ci-dessous :

1. Identifier les sources de danger : La première étape est consacrée à la caractérisation du site et de son environnement. Un inventaire qualitatif et quantitatif des contaminants présents dans l'air, le sol et l'eau est réalisé pour la sélection des contaminants « traceurs » des risques sanitaires ;
2. Evaluer le rapport dose (concentration) – réponse (effets) : Lors de cette étape, l'incidence et la gravité des effets sur la santé sont estimées pour chaque contaminant retenu (analyses des valeurs toxicologiques de référence, valeurs réglementaires et/ou préconisées (UE, OMS, ...)) ;
3. Evaluer l'exposition : L'objectif est de déterminer les voies de transfert des contaminants « traceurs » de la source vers la cible et d'estimer la fréquence, la durée et l'importance de l'exposition (calculs des Doses Journalières d'Exposition : DJE).

Cette étape fait intervenir un modèle permettant d'estimer les concentrations en contaminants dans les différents milieux d'exposition (eau, organismes aquatiques, ...) en contact avec l'Homme ;

4. Caractériser les risques : Cette dernière étape correspond à la synthèse des informations issues de l'évaluation de l'exposition et de la toxicité sous la forme d'une expression quantitative du risque. Les incertitudes sont évaluées qualitativement en fonction de leur caractère majorant ou minorant et de l'interprétation des résultats.

D'autre part, cette évaluation est réalisée en appliquant certains principes (d'après INERIS, 2003) :

- Le principe de précaution, principe « selon lequel l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable » ;
- Le principe de proportionnalité, veillant à ce qu'il y ait cohérence entre le degré d'approfondissement de l'étude, le degré de contamination et son incidence prévisible ;
- Le principe de spécificité, assurant la pertinence de l'étude par rapport à l'usage et aux caractéristiques du site et de son environnement ;
- Le principe de transparence, impliquant que le choix des hypothèses, des outils à utiliser et du degré d'approfondissement nécessaires soient expliqués et cohérents.

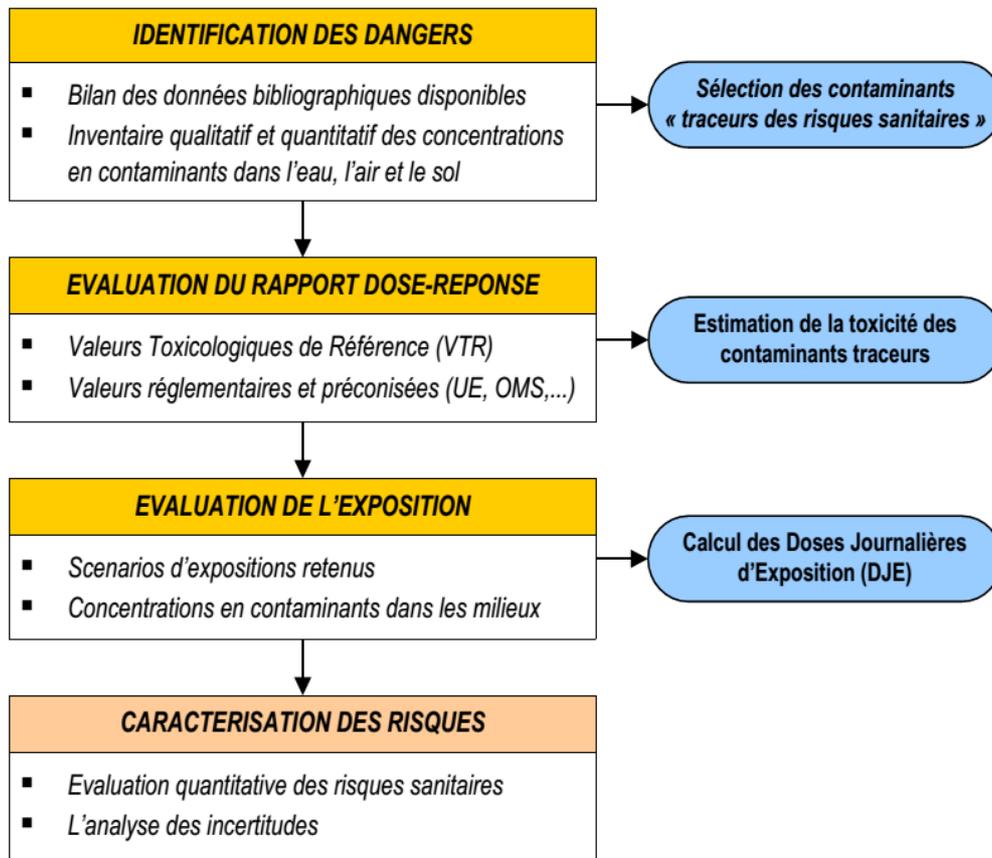


Figure 12. Etapes de l'évaluation des risques sanitaires

Le schéma conceptuel

L'évaluation des expositions consiste à déterminer les émissions, les voies de transfert et les vitesses de déplacement des substances, leur transformation ou leur dégradation afin d'évaluer les concentrations ou les doses auxquelles les populations sont exposées ou susceptibles de l'être. L'exposition à une substance dépend du comportement des matériaux sur lesquels elle est fixée, mais aussi du comportement physico-chimique et de la concentration de la substance dans les compartiments environnementaux ainsi que des voies et des conditions d'exposition des individus en contact avec la substance. Tous ces paramètres doivent donc être déterminés précisément pour quantifier l'exposition des populations cibles.

Le schéma conceptuel a pour objectif de synthétiser les sources, voies de transfert et cibles potentielles de l'opération considérée. Ainsi, chaque type d'opération fait l'objet d'un schéma conceptuel spécifique en fonction du milieu dans lequel l'opération prend place, des espèces naturelles présentes et des activités humaines recensées. Le schéma et alors en exergue les risques potentiels du projet pour l'environnement et la santé humaine.

A titre d'exemple, la figure ci-dessous représente le schéma conceptuel élaboré lors de la réalisation d'un éco-modèle paysager dans le périmètre du Grand Port Maritime de Dunkerque.

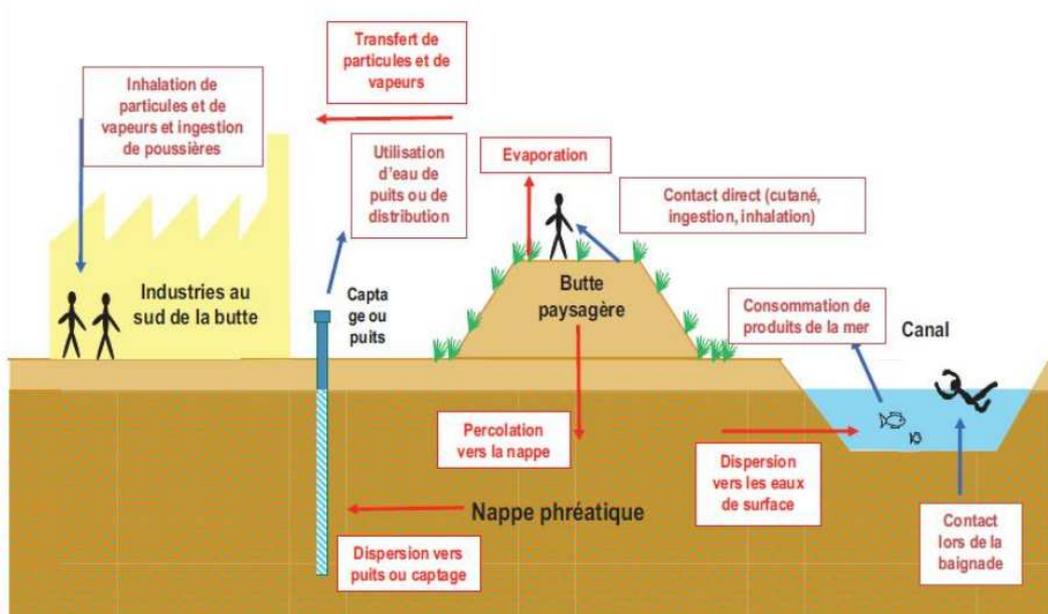


Figure 13. Schéma conceptuel de l'évaluation des risques environnementaux et sanitaires d'un éco-modèle paysager réalisé à base de sédiment

6. Phase 2 : Etude en laboratoire

6.1 Echantillonnage sur le site de stockage ou de dépôt

L'objectif de l'échantillonnage est de donner à chaque élément présent dans le gisement de sédiments la même probabilité de se trouver dans l'échantillon que celle qu'il a dans le lot initial. La stratégie d'échantillonnage devra prendre en compte les dimensions spatiales et temporelles en prélevant toutes granulométries, de façon aléatoire, en multipliant les prélèvements et en tenant compte de la géométrie du tas et de son mode de constitution. Les normes et rapports techniques relatifs à l'échantillonnage fournissent des exigences qu'il est recommandé de suivre. Le guide SETRA (2011) donne une liste des principales méthodes utilisées pour la réalisation de plans d'échantillonnage.

6.2 Etude de formulation

6.2.1 Elaboration du matériau

Suivant leur nature et leur comportement certains sédiments de dragage peuvent être aptes à une utilisation en éco-modèles paysagers sans formulation préalable. L'étude de caractérisation complémentaire, en particulier les analyses mécaniques y figurant, permet d'identifier les gisements de sédiments aptes à être valorisés en l'état et ceux devant faire l'objet d'une étude de formulation. La formulation d'un matériau alternatif avec d'autres matériaux granulaires est généralement pratiquée afin d'améliorer les caractéristiques géotechniques du matériau final et ainsi accroître son domaine d'emploi. Cependant, il faut noter que l'usage des sédiments de dragage en éco-modèles paysagers ne permet pas d'avoir recours à un traitement avec un liant hydraulique ou de la chaux. En effet, ce type de traitement engendre un matériau de pH alcalin, ce qui n'est pas compatible avec l'installation d'une couverture végétale.

6.2.2 Evaluation de l'acceptabilité environnementale

La vérification de l'acceptabilité environnementale est à mener sur le matériau alternatif. Si le matériau alternatif est uniquement mélangé avec des matériaux naturels et/ou avec des matériaux alternatifs élaborés à partir de matériaux de déconstruction du BTP, la vérification de l'acceptabilité environnementale du matériau final n'est pas nécessaire. Dans les autres cas (par exemple lors de l'utilisation d'autres gisements de sédiments de dragage), des analyses environnementales basées sur des tests de lixiviation (NF EN 12457-2 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide/solide de 10 l/kg) et de percolation (NF CEN/TS 14405 : essai de percolation à écoulement ascendant) devront être réalisées.

6.2.3 Evaluation des performances mécaniques

Essai œdométrique

L'objectif de l'essai est de mesurer la relation entre la contrainte appliquée et la déformation engendrée aussi bien en phase de chargement qu'en phase de déchargement. Cette relation peut être exprimée en termes de variation de l'indice des vides en fonction du logarithme de la contrainte verticale appliquée.

A partir de ce résultat, il est possible de mesurer les indices de compression C_c et de gonflement C_s ainsi que la pression de préconsolidation engendrée par l'histoire de chargement que le matériau a subi.

Essai à la boîte de cisaillement

Cet essai consiste à étudier la résistance au cisaillement d'un échantillon suivant un plan de rupture imposé et supposé horizontal. On distingue deux types d'essais en fonction du drainage :

Consolidé non drainé : utilisé pour étudier le comportement du sol à court terme. Son principe consiste à appliquer une vitesse de déplacement assez élevée tout en assurant une diffusion homogène des efforts appliqués ;

Consolidé drainé : essai très lent auquel on applique une vitesse de déplacement très faible afin de reproduire le comportement du sol à long terme.

Le principe de la boîte de cisaillement direct consiste à placer l'échantillon à l'intérieur des deux demi-boîtes indépendantes. La force de cisaillement exercée sur la demi-boîte inférieure et la force normale est exercée sur la demi-boîte supérieure. Grâce au système d'acquisition, le tassement vertical et la charge de cisaillement appliqués sont mesurés durant l'essai.

Essai triaxial

Les essais triaxiaux sont utilisés principalement pour déterminer la résistance au cisaillement des sols. Ils représentent aussi les essais de référence pour l'étude des lois de comportement des sols et en particulier pour l'étude de la déformabilité des sols quand on sort des conditions unidimensionnelles de l'essai œdométrique. Cet essai est réalisé sur une éprouvette cylindrique placée dans une cellule permettant de lui appliquer simultanément une pression latérale et une charge axiale. L'essai triaxial permet de déterminer l'angle de frottement et la cohésion des sédiments dans des conditions spécifiques.

6.3 Conception et suivi d'une planche expérimentale

6.3.1 Conception de la planche expérimentale

L'étude en laboratoire consiste à mettre en place une planche expérimentale dans le but d'étudier le comportement mécanique et environnemental du matériau testé (Figure 14).

Une planche d'essai est un ouvrage de taille réduite (1 à 2 m²) au sein duquel le matériau testé est mis en œuvre dans des conditions représentatives de l'usage étudié (épaisseur, compacité, pentes, etc.) et soumis à des conditions d'exposition contrôlées permettant de reproduire des conditions extérieures fixées ou accélérées (ex : pluviométrie annuelle en 6 mois), ou encore des qualités de pluie spécifiques à certains scénarios (ex : pluies acides). La planche expérimentale est équipée afin de collecter les eaux qui ont percolé à travers la structure ainsi que les eaux de ruissellement, de manière séparée.

La hauteur et la perméabilité de l'éco-modélé paysager doivent être choisies de manière à reproduire la structure de l'ouvrage la plus défavorable pour l'étude du comportement à la lixiviation du matériau testé.

Une planche expérimentale témoin est également mise en œuvre. Elle reproduit la même structure mais utilise, en lieu et place du matériau testé, un matériau naturel pris comme référence (de préférence siliceux). Elle permet de valider le fonctionnement de la planche expérimentale intégrant le matériau testé.



Figure 14. Etapes de réalisation d'une planche expérimentale pour l'étude d'un d'éco-modélé paysager

6.3.2 Suivi mécanique et environnemental

Le suivi de la planche expérimentale consiste à prélever des échantillons d'eau et de matériau afin de suivre respectivement les émissions de polluants et les performances mécaniques du matériau au cours du temps. La réalisation de carottage des matériaux de la structure en fin, voire en cours de suivi de la planche expérimentale, est conseillée pour valider les hypothèses formulées en laboratoire.

Les analyses d'eau sont réalisées sur des échantillons filtrés à $0,45 \mu\text{m}$ et les principaux paramètres à déterminer sont les suivants : pH, conductivité, potentiel redox, température, anions (chlorures, sulfates, fluorures), cations (éléments majeurs : Ca, Mg, Na, ...), éléments traces (As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn), et polluants organiques.

Dans le but de déterminer l'impact de l'ouvrage à base de sédiments sur les écosystèmes et d'évaluer les risques chimiques à l'égard des ressources vivantes animales et végétales, il est également recommandé de mettre en œuvre des essais écotoxicologiques normalisés (XP CEN ISO/TS 21268-1, 2, 3, 4).

L'évaluation du comportement mécanique, sur les échantillons carottés en cours ou en fin d'expérience, est réalisée à l'aide d'essais œdométriques, à la boîte à cisaillement, et triaxiaux.

7. Phase 3 : Etude de terrain

Une fois les formulations établies à l'échelle du laboratoire, des applications sur le terrain sont réalisées à travers la conception de pilotes ou de plots expérimentaux. Ces prototypes permettent l'étude en conditions réelles d'utilisation du matériau. Des analyses environnementales étudient la mobilité de certains polluants et comparent les résultats obtenus avec les prévisions réalisées à partir des essais de laboratoire. D'autres paramètres concernant le comportement mécanique et géotechnique du matériau sont vérifiés et comparés aux prévisions attendues. Si l'ensemble des résultats ne montre pas de dérive par rapport aux prévisions, la filière de valorisation peut ainsi être validée, en prenant soin de définir précisément les conditions de mise en œuvre.

7.1 Réalisation d'un ouvrage expérimental

La réalisation d'un ouvrage expérimental incluant un plot de terrain a pour objectif d'étudier le comportement du matériau testé tout en s'affranchissant des effets d'échelle qui peuvent apparaître lors de la réalisation d'essais en laboratoire.

Le plot expérimental permet de réaliser un suivi géotechnique, mécanique et environnemental de la structure de l'ouvrage et de valider les études de laboratoire correspondantes. Le suivi des paramètres susceptibles de présenter des variations dans la vie de l'ouvrage eu égard à la particularité de celui-ci, c'est-à-dire le fait qu'il soit réalisé avec des sédiments de dragage, permet d'apprécier la stabilité générale de l'ouvrage. Il est recommandé de réaliser un suivi de l'ouvrage sur plusieurs années (au minimum 12 mois) afin de tenir compte des variations saisonnières.

7.1.1 Caractéristiques techniques de l'ouvrage

Les principales caractéristiques techniques à prendre en compte pour la constitution d'un éco-modelé paysager à base de sédiment sont : la hauteur de l'ouvrage, les pentes qui devront être préférentiellement douces sur chaque versant Nord et Sud, la composition physico-chimique et les caractéristiques géotechniques des matériaux utilisés, les plantations adaptées à l'environnement et à l'exposition des versants peuvent être envisagées.

La réalisation d'un plan d'aménagement paysager a pour objectif de créer un milieu évoquant celui existant au voisinage de l'éco-modelé. Pour permettre de répondre à cet objectif, plusieurs critères doivent être pris en compte : la morphologie de l'éco-modelé, les végétaux à mettre en place et la végétation spontanée potentielle. Cette section présente à titre d'exemple les caractéristiques de l'éco-modelé paysager réalisé dans le périmètre du Grand Port Maritime de Dunkerque.

Morphologie de l'éco-modélé paysager

Le profil retenu correspond à la morphologie des dunes littorales (Figure 15) :

- Une façade maritime présentant la plus forte pente (pente de 3/2)
- Une pente plus douce (3/1) à l'arrière de l'éco-modélé
- Le sommet de l'éco-modélé aura une hauteur variable de 5 à 7 mètres.

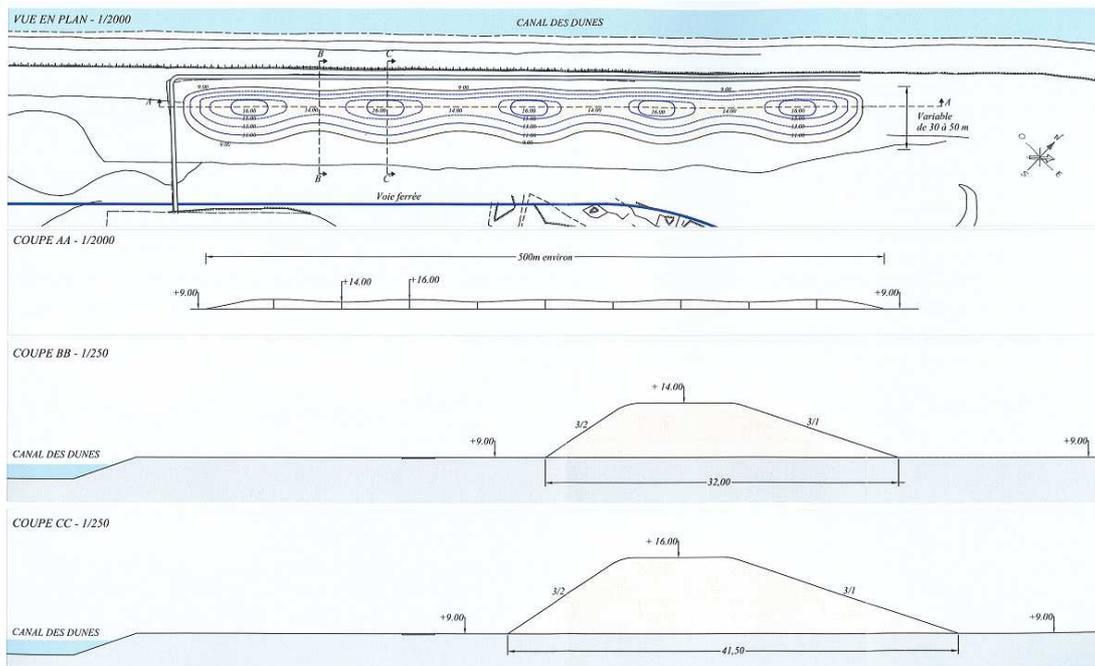


Figure 15. Exemple de la géométrie de l'éco-modélé paysager réalisé dans le périmètre du GPMD

Instrumentation de l'ouvrage

Les éco-modelés paysagers sont composés de sédiments préalablement traités par déshydratation, surmontés d'une couche de terre végétale d'une trentaine de centimètre dans la plupart du temps (ou à définir dans des cas particuliers), permettant à la végétation de s'y fixer. Dans le cas où l'étude d'impact met en évidence un risque sanitaire ou environnemental lié à la pollution du sédiment utilisé, l'ouvrage devra être isolé du sol à l'aide d'une géo-membrane afin d'éviter les risques de contamination du sol et de la nappe phréatique.

Dans l'objectif d'assurer un suivi rigoureux d'un éco-modélé paysager à base de sédiments de dragage, il est nécessaire de choisir et d'implanter l'instrumentation adaptée pour suivre l'évolution géotechnique et l'impact environnemental de l'ouvrage sur son environnement. A ce titre, le tableau ci-dessous récapitule et propose un modèle d'instrumentation type.

Tableau 13. Instruments de mesure des différents paramètres

Analyses	Instruments	Paramètres à mesurer
Géotechniques	Repères géométriques de surfaces : Piquets en bois ou des bornes cimentées	Suivi topographique classique moyennant un tachéomètre électronique
	Tassomètre hydrostatique	Mesure des tassements
	Inclinomètres	Suivi des glissements des talus artificiels
	Sondes de mesure de la teneur en eau	Mesure de la teneur en eau
	Sonde de mesure de pression interstitielle	Mesure de pression interstitielle
Environnementales	Sonde thermique	Mesure de la température
	Piézomètres	- Prélèvement des eaux d'infiltration - Suivi du niveau d'eau - pH, conductivité, température
	Lysimètres (bassin à lixiviats)	Prélèvement de lixiviats

Le suivi environnemental de l'ouvrage tient une place importante dans la validation de la faisabilité de la filière étudiée. Ce suivi est essentiellement basé sur la mise en place de piézomètres au niveau de l'ouvrage et dans un périmètre rapproché, ceci afin de suivre la qualité des eaux de percolation et souterraine. Il est recommandé de suivre la qualité des eaux du milieu récepteur sur une durée similaire à celle de l'ouvrage qui est généralement d'une année au minimum.

Le choix de la technique de forage utilisée lors de la réalisation des piézomètres est lié à la nature du terrain et aux dimensions souhaitées (diamètre et profondeur). En général, les techniques utilisées pour la mise en place de piézomètres au sein de tels ouvrages doivent éviter de perturber toute pollution en place, par le déplacement de celle-ci ou par son augmentation par la mise en œuvre de fluides de forage. La figure ci-dessous résume les principales étapes de la mise en place d'un piézomètre sur un éco-modelé paysager. L'objectif de ce dispositif est de récupérer les eaux d'infiltration lors des épisodes pluvieux afin de réaliser un suivi mensuel des concentrations en contaminants dans l'eau.



Figure 16. Installation des piézomètres

Végétaux utilisés

Sur la façade maritime, sur le sommet de l'éco-modelé et sur le versant arrière de l'éco-modelé ont été plantés :

- Fétuque des sables (*Festuca juncifolia*)
- Carex des sables (*Carex arenaria*)
- Lotier corniculé (*Lotus corniculatus*)
- Fétuque rouge (*Festuca rubra ssp genuina*)
- Agrostis maritime (*Agrostis alba var. maritima*)
- Pénicaut maritime (*Eryngium maritimum*)

Sur le versant arrière de l'éco-modelé paysager ont été plantés (figure 17):

Argousier (*Hippophae rhamnoides*) : 50% de la surface plantée, 1 unité/m²

Sureau Noir (*Sambucus nigra*) : 15% de la surface plantée, 1 unité/m²

Lyciet (*Lycium barbarum*) : 15% de la surface plantée, 1 unité/m²

Saule rampant (*Salix repens ssp arenaria*) : 5% de la surface plantée, 1 unité/m²

Fusain d'Europe (*Euonymus europaeus*) : 5% de la surface plantée, 1 unité/m²

Prunelier (*Prunus spinosaa*) : 5% de la surface plantée, 1 unité/m²

Troëne sauvage (*Ligustrum vulgare*) : 5% de la surface plantée, 1 unité/m²

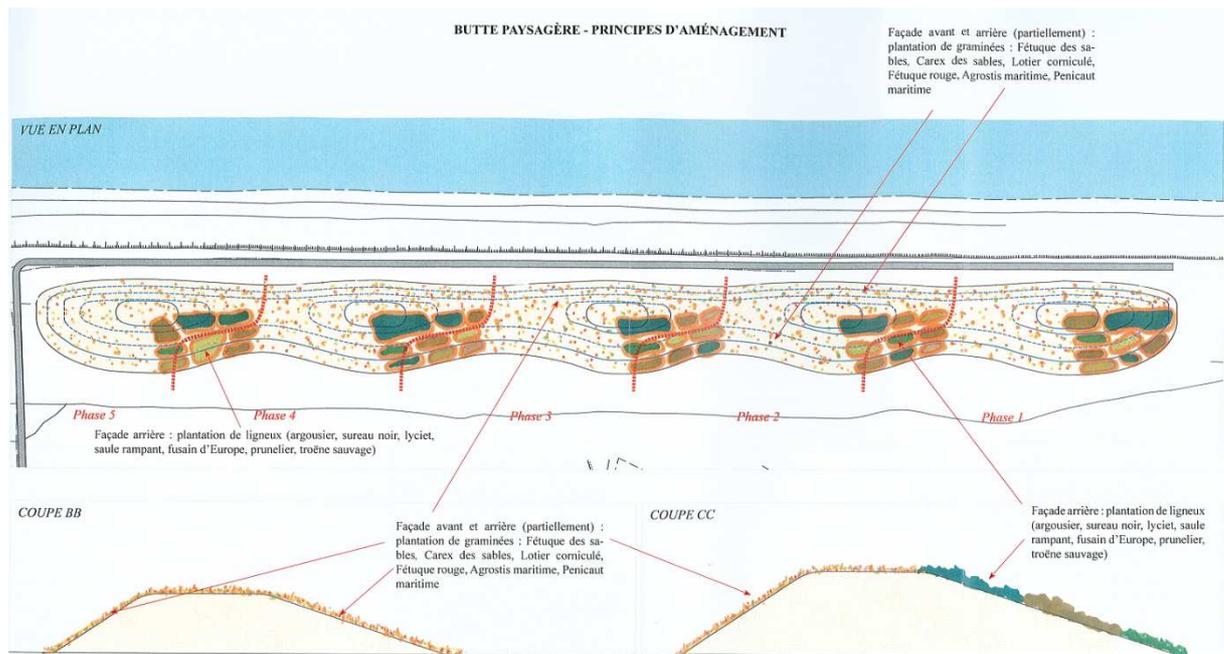


Figure 17. Végétaux sélectionnés pour l'aménagement de l'éco-modélé du GPMD

Éléments pour la constitution d'un cahier des charges d'aménagements paysagers

Les ensemencements de graminées se feront à l'avant et à l'arrière de l'éco-modélé paysager, entre les plantations de ligneux. Ces ensemencements sont possibles d'octobre à mars, hors périodes de gel, en sable humide.

Les plantations de ligneux correspondent aux associations phytosociologiques du site et sont, par conséquent adaptés aux conditions particulières du milieu : sol sablonneux, pauvre, supportant les vents desséchants et les embruns marins. Les apports d'amendement organique peuvent être utilisés pour favoriser leur reprise.

Paradoxalement ces plantes robustes sont de reprise assez capricieuse à cause de leur système racinaire. Les plantes sont prévues en plants d'une année avec godet anti-chignon. Durant la plantation, les racines de ces plantes ne supportent pas d'être exposées au dessèchement. Les végétaux sont plantés à une densité d'une plante par mètre carré.

Pour favoriser leur auto-protection coté vents dominants, deux rangées extérieures, pour chaque massif, seront plantées à une densité de deux plantes au mètre carré. Il convient lors de la plantation de n'effectuer aucun alignement, ni écartement régulier.

La plante dominante dans cette association est l'argousier, les autres plantes sont dispersées de façon aléatoire par petits groupes de trois plantes de même essence.

Au sein des massifs, il est prévu de laisser de petit espace vide de trois à quatre mètre carré pour favoriser l'émergence de plantes spontanées qui apporteront de la diversité et un effet plus naturel.

Pour l'entretien de ces plantations, les remblais seront sans aucun doute riches en graines et une germination importante est à prévoir. Il convient, durant deux années après la plantation, de faucher les

massifs juste pour éviter l'étouffement des jeunes plantations, 5 passages par an est un maximum. L'usage d'herbicide est à proscrire en sol sableux, la localisation en milieu naturel s'accorde bien de cette technique de fauchage.

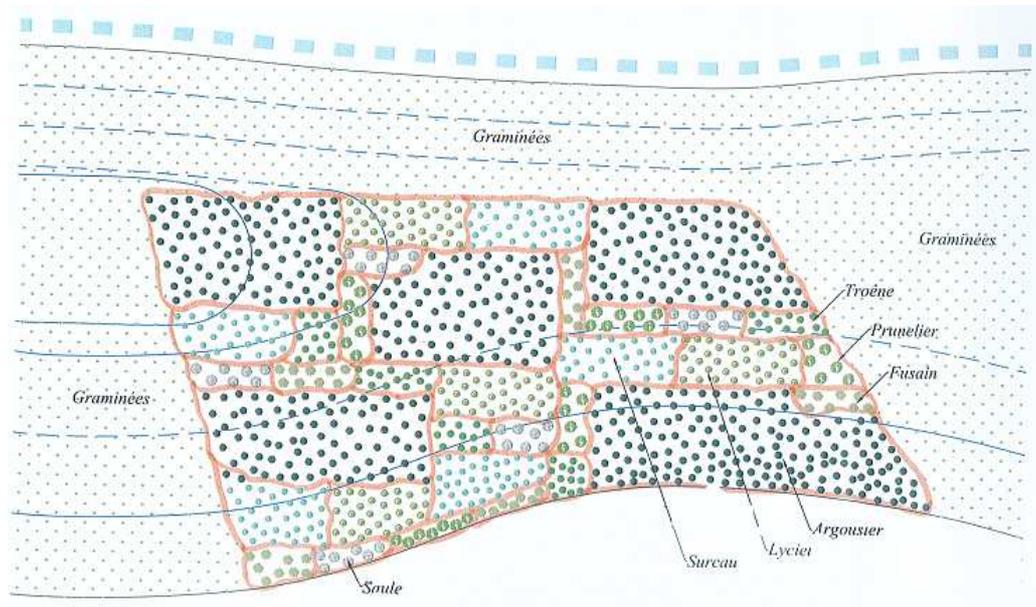


Figure 18. Plan de végétation mise en œuvre sur l'éco-modèle paysager du GPMD

7.2 Suivi mécanique et environnemental

7.2.1 Analyses sur carottes de sédiments

Les carottages sont des essais destructifs très riches en information sur l'état d'un ouvrage. Cette technique de prélèvement consiste à découper et à extraire d'un ouvrage un échantillon solide cylindrique. L'observation visuelle d'une carotte permet de connaître l'état et la nature du matériau. Dans le cadre du suivi mécanique et environnemental de l'éco-modèle paysager il est recommandé de planifier au moins deux campagnes de carottage par an afin de caractériser le comportement mécanique et environnemental du matériau.

Après réalisation de l'éco-modèle paysager, des carottages sont réalisés afin de suivre l'évolution dans le temps du comportement mécanique des sédiments. Les campagnes de carottages sont généralement réalisées par vibro-percussion et en rotation à l'aide d'une sondeuse.

Pour les essais mécaniques, 2 carottes de sédiment seront prélevées sur une profondeur de 4m. Les essais œdométriques, à la boîte à cisaillement, et triaxiaux, seront réalisés sur différentes parties de la carotte pour des échantillons de hauteurs égales à 1 m.

Concernant les analyses environnementales, 1 carotte de 4 m est prélevée sur la partie la plus haute de l'ouvrage, une 2ème de 2m sera prélevée sur le flanc.

Les essais réalisés correspondent à des tests de lixiviation et de percolation normalisés. L'objectif de l'étude environnementale est d'apporter des informations sur le comportement à long terme des polluants présents dans l'ouvrage.

7.2.2 Suivi environnemental des eaux piézométriques

Echantillonnage

Les instruments de prélèvement peuvent être scindés en deux grandes catégories : les échantillonneurs et les pompes. Ils peuvent être dédiés à un seul piézomètre ou non. La décision d'utiliser un équipement dédié est fonction du nombre de campagnes envisagées, de la difficulté à décontaminer l'équipement, de la sensibilité des analyses à la présence de matières en suspension et de l'accessibilité des points d'échantillonnage.

La pompe utilisée lors du suivi des piézomètres est une pompe à soupape qui peut être utilisée dans des tubages de petit diamètre (jusqu'à 2 cm) et présente d'ailleurs plusieurs avantages puisqu'elle est simple d'utilisation, fiable, portable et nécessite peu d'entretien. Le système de pompage peut être utilisé jusqu'à une profondeur de 40 à 60 m pour la purge ou l'échantillonnage des puits.

Les principaux inconvénients de la pompe à soupape sont la turbulence créée par l'agitation de la tubulure dans le puits, qui mélange sans arrêt la colonne d'eau dite stagnante (eau contenue dans le tubage plein du puits, au-dessus de la crépine) avec l'eau tirée de l'aquifère ainsi que l'usure de la tubulure sur les parois. Si le puits n'a pas été développé correctement, les valves peuvent bloquer. L'action de déplacement cyclique de la tubulure peut augmenter significativement la turbidité de l'échantillon et provoquer une aération de la colonne d'eau à échantillonner.

Les concentrations de certains paramètres peuvent en être affectées, comme les gaz dissous, les contaminants hydrophobes sensibles aux matières en suspension et les métaux traces. L'influence des facteurs cités ci-dessus sur les résultats doit être convenablement évaluée.

La procédure d'échantillonnage doit permettre de fournir au laboratoire des échantillons représentatifs (quant aux espèces considérées) de la composition de l'eau au moment du prélèvement.

Paramètres physico-chimiques recherchés

Les analyses d'eau sont réalisées sur des échantillons filtrés à 0,45 µm et les principaux paramètres à déterminer sont les suivants :

- pH
- Conductivité
- Potentiel redox
- Température
- Anions (chlorures, sulfates, fluorures)
- Cations (éléments majeurs : Ca, Mg, Na, ...)
- Eléments traces (As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn)
- Hydrocarbures aromatiques polycycliques
- Carbone organique dissous (COD)

7.2.3 Suivi de la qualité des eaux et sédiments dans les plans d'eaux riverains

Le suivi de l'impact environnemental de l'ouvrage sera réalisé par la comparaison des résultats des analyses mentionnées ci-dessous (notamment celles des eaux souterraines et de surface) avec l'état initial.

Paramètres de suivi des eaux de surface

Les polluants peuvent être transportés par les eaux de ruissellement ou d'infiltration et atteindre les plans d'eau avoisinants l'ouvrage. L'évaluation de cet impact peut être obtenue par un suivi des paramètres importants que nous pouvons observer sur le tableau ci-dessous, ces paramètres doivent être évalués lors de la caractérisation de l'état initial et les valeurs trouvées serviront comme base de comparaison pour mettre en évidence les changements au fil du temps.

Les valeurs seuils utilisés pour la caractérisation de l'état initial sont contenus dans le NQE (Normes de qualité environnementales), représentatives du bon état des eaux de transition, fixées par la directive 2008/105/CE du 16 décembre 2008 ; et les eaux de baignade, limites de qualité pour la baignade dans les eaux côtières et de transition représentatives d'une bonne qualité, fixées par la Directive 2006/07/CEE du 15 février 2006.

Paramètres de suivi des sédiments des plans d'eau

Les polluants pouvant atteindre les plans d'eau peuvent se décanter et donc impacter les sédiments de ces cours d'eau. Pour évaluer cet impact, un suivi de ces sédiments portant sur l'évolution des concentrations en polluants susceptibles d'être transférés peut être envisagé. Le suivi sera réalisé par des analyses effectuées sur des prélèvements des échantillons de sédiments des cours d'eau voisins.

Paramètres complémentaires

Le suivi de l'impact environnemental de l'ouvrage pourra être complété par :

- L'observation de l'état de la faune et de la flore sur l'ouvrage et ses alentours et la comparaison avec un site témoin à différentes saisons de l'année, sur une période de 3 à 4 ans.
- L'analyse de sol à l'aval de l'ouvrage ou aux points de rejets des eaux de ruissellements provenant de la zone de celui-ci.

7.2.4 Cadre réglementaire pour l'évaluation de la qualité des eaux

Les directives-cadres européennes relatives à l'eau (2000) et à la qualité de l'air ambiant ainsi que le Grenelle de l'environnement ont imposé la surveillance des milieux et la lutte contre les pollutions. Pour atteindre les objectifs fixés, divers outils réglementaires sont utilisés (lois, plans, etc.). Concernant la ressource en eau et les milieux aquatiques, le réseau routier se doit d'être en conformité avec les objectifs réglementaires fixés notamment par la Directive Cadre sur l'eau (DCE, 2000) et la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (2006).

Le gestionnaire routier doit également se conformer au SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) local, instrument de planification qui fournit, à l'échelle de chaque bassin hydrographique, les dispositions permettant d'assurer la protection et l'amélioration de l'état des eaux et des milieux aquatiques. La DCE donne pour objectif d'atteindre le Bon État des Masses d'Eau à l'horizon de 2015 et, plus généralement de ne pas dégrader l'état des masses d'eau.

Le Bon État est défini par le respect de seuils, appelés « Normes de Qualité Environnementales » (NQE), fixés pour un certain nombre de paramètres physico-chimiques et biologiques :

- Pour les eaux de surface, les seuils sont listés dans l'Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface.
- Pour les eaux souterraines, les seuils sont listés dans l'arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines.

En outre, les seuils de la qualité des eaux superficielles utilisées ou destinées à la consommation humaine peuvent également être utilisés pour l'interprétation des résultats de suivi. Les valeurs seuils sont définies dans l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R.1321-2, R.1321-3, R.1321-7 et R.1321-38 du code santé publique selon la synthèse de la réglementation publiée par le ministère de l'Ecologie et du Développement durable au 1^{er} Décembre 2011.

7.3 Suivi de l'état général de l'ouvrage

7.3.1 Inspections visuelles

L'état général des éco-modelés paysagers sera suivi grâce à une inspection visuelle à réaliser par un spécialiste et de manière régulière. Cette inspection visuelle devra se faire sur la base d'une fiche d'inspection qui listera les points essentiels à surveiller avec une appréciation au regard de chaque point. L'inspection visuelle requiert une bonne connaissance des caractéristiques de l'ouvrage à son état d'origine pour pouvoir établir avec rigueur l'évolution de celles-ci. Et pour obtenir des résultats précis, il faudra scinder l'ouvrage en plusieurs zones de 20 ou 30 m de longueur.

Les résultats de l'inspection visuelle devront servir de base dans l'orientation d'inspection plus poussée (réalisée par instrumentation).

Tableau 14. Exemple de fiche type d'inspection visuelle

Points surveillés	Appréciations et commentaires
Etat général de l'ouvrage	
Etat de la végétation	
Etat des plantes de fixation des sédiments	
Apparition de fissures longitudinales (environ d'épaisseur)	
Apparition de fissures transversales (environ d'épaisseur)	
Présence de gonflement ou apparition des amorces de glissement le long des talus	
Apparition des tassements	
Présence d'eau en surface	
Humidité de l'ouvrage par rapport à la saison	
Présence de ravinements	

7.3.2 Suivi de la couche de terre végétale

Il rentre dans le cadre de l'inspection visuelle mais orienté sur un paramètre bien déterminé et qui nécessitera au delà d'une simple inspection une mise en place d'un dispositif de mesure.

La couche végétale recouvrant l'ouvrage sera suivie par l'implantation de piquets sur différents profils en travers, en moyenne tous les 5 m et un relevé semestriel permettra d'apprécier la variation des profondeurs d'ancrage des piquets donc de l'épaisseur de la couche de terre végétale et ainsi établir l'effet de l'érosion sur l'ouvrage.



Figure 19. Suivi de la couche de terre végétale

7.3.3 Suivi des facteurs de stabilité

Cette partie traitera l'ensemble des paramètres qui entrent en jeu dans la stabilité de l'ouvrage, le suivi de ces paramètres permettra d'avoir une appréciation précise sur la durabilité de ces derniers.

Facteurs géométriques de l'ouvrage

Les facteurs d'ordre géométriques sont constitués des paramètres suivants :

- La hauteur de l'ouvrage ;
- L'angle de pente des talus ;
- Le rayon de courbure de l'ouvrage sur le plan horizontal (qui ne fera pas l'objet d'un suivi dans notre cas).

Un relevé topographique (planimétrique et altimétrique) permettra de suivre ces paramètres et les résultats consignés sur un registre de suivi permettront de les comparer à l'état initial ou tout au moins au relevé précédent.

Le relevé topographique sera réalisé à l'aide d'un théodolite, d'un trépied et d'une mire graduée.

Facteurs liés à l'eau souterraine et à l'eau de surface

L'eau interstitielle peut être à l'origine des problèmes d'instabilité de l'ouvrage. Le suivi de son activité est primordial. D'autre part la connaissance de l'activité de l'eau souterraine permettra d'avoir l'importance du transport de polluants vers les sites voisins.

On déterminera le niveau de l'eau souterraine à l'aide de piézomètres placés en amont et en aval des points à surveiller. La connaissance, la précision et la fiabilité de l'élévation du point de mesure sont primordiales pour l'interprétation des conditions hydrogéologiques.

Pour les puits installés au niveau du sol et les puits n'ayant pas d'évent, il est nécessaire de laisser une période de stabilisation (fonction de la perméabilité du milieu capté) avant d'effectuer le relevé des niveaux d'eau.

La qualité de l'information sur les niveaux d'eau est essentielle puisqu'il en sera déduit la direction et la vitesse d'écoulement (et éventuellement leurs variations dans le temps) de l'eau souterraine au site. Les sondes électriques (à enregistrement automatique pour des mesures cadencées) sont les instruments les plus utilisés pour la mesure de la pression d'eau au-dessus du capteur.

L'eau de surface qui peut être à l'origine de phénomènes d'érosion sera suivie grâce à l'inspection visuelle régulière développée plus haut.

Facteurs liés aux actions externes

Les actions externes pouvant affecter la stabilité de l'ouvrage peuvent être naturelles ou liées à l'activité humaine ; elles peuvent se manifester sous forme de :

- Modification des pentes de talus (phénomène d'érosion, actions humaines) ;
- Suppression de la butée de pied ;
- Déboisement ;
- Vibrations sismiques.

Le suivi primaire de ces actions externes se fera à partir des inspections visuelles et en fonction des résultats obtenus, il pourra être envisagé une inspection instrumentée pour mesurer le degré de certaines dégradations développées. En l'apparition de dégradation il pourra être envisagé une étude instrumentée pour évaluer l'ampleur de ces dégradations.

8. Synoptique de la méthodologie SEDIMATERIAUX

La méthodologie développée dans le cadre de la démarche SEDIMATERIAUX comprend trois grandes phases :

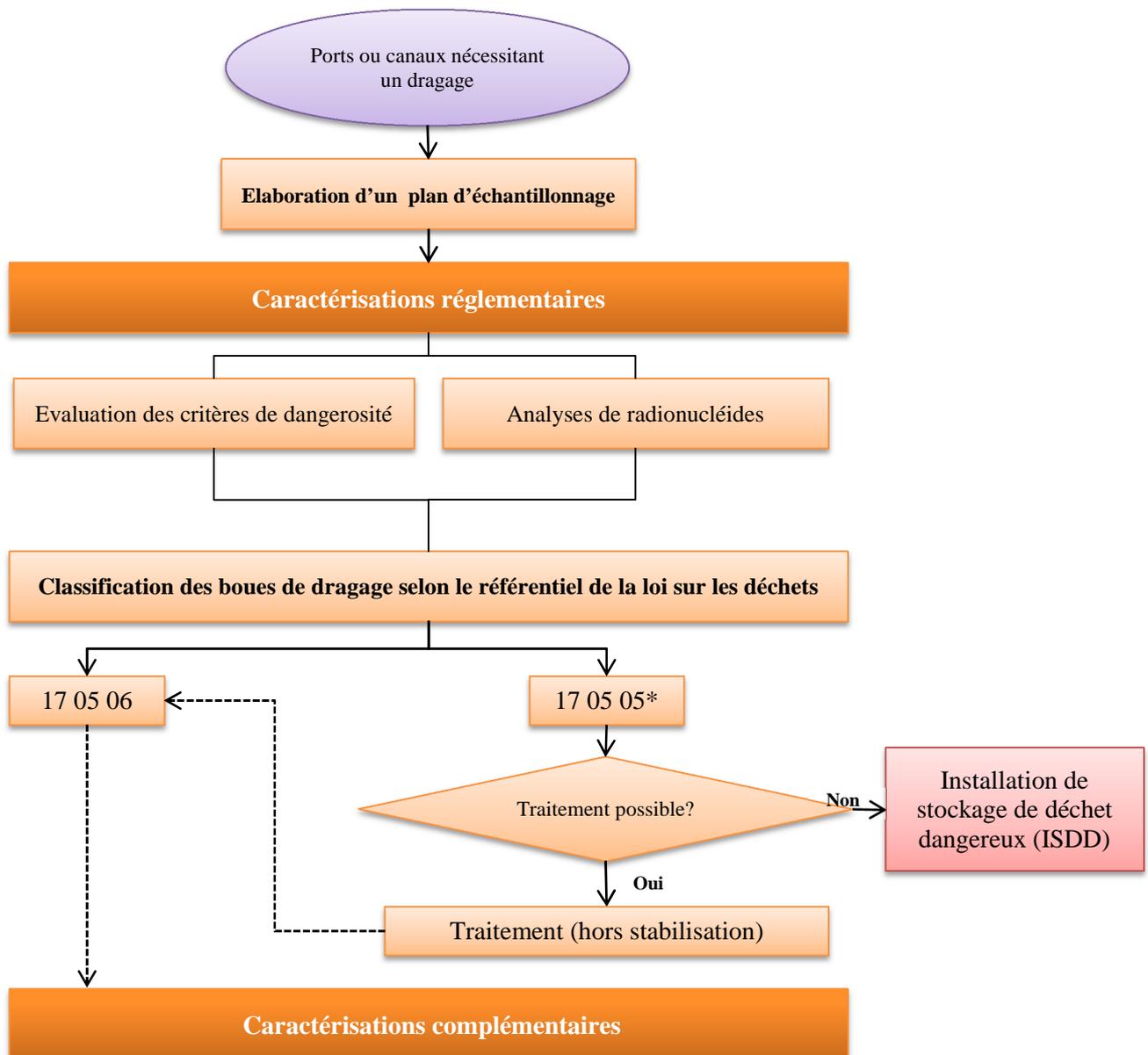
PHASE 1) CARACTERISATION

PHASE 2) ETUDE EN LABORATOIRE

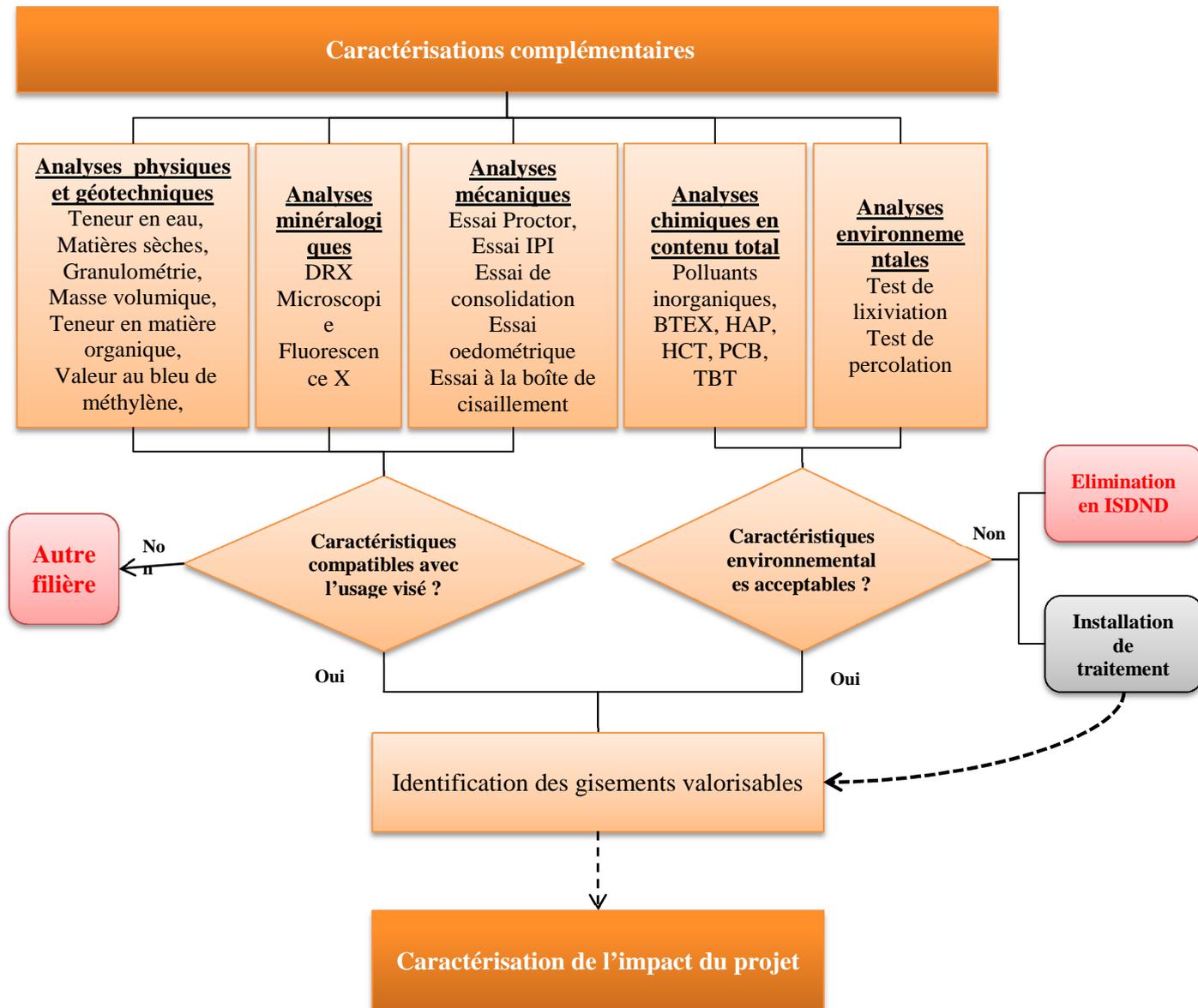
PHASE 3) ETUDE DE TERRAIN

PHASE 1 : Phase de caractérisation comprenant des analyses réglementaires (Phase 1A), complémentaires (Phase 1B) et l'évaluation de l'impact du projet (Phase 1C)

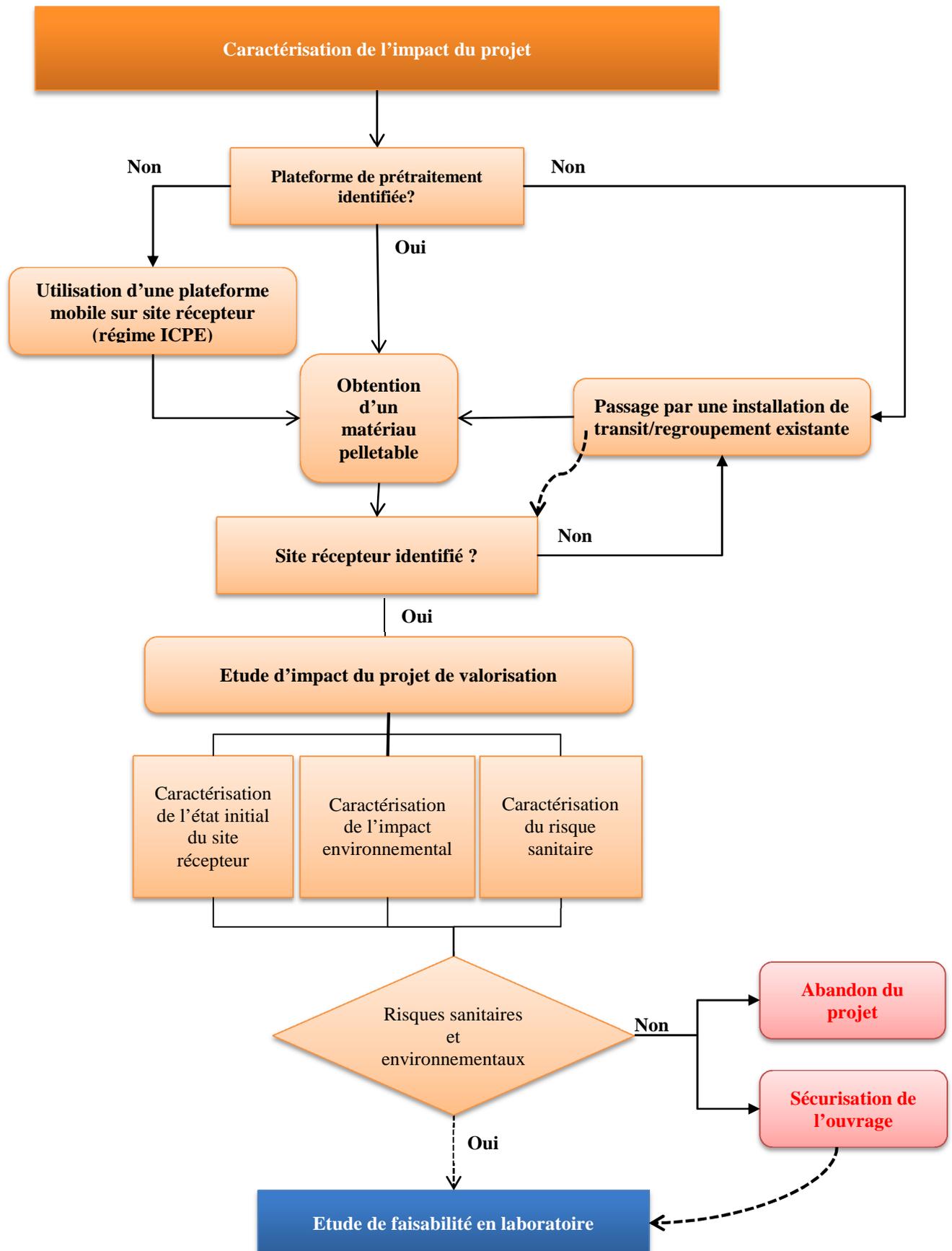
PHASE 1A : Caractérisations réglementaires



PHASE 1B : Caractérisations complémentaires

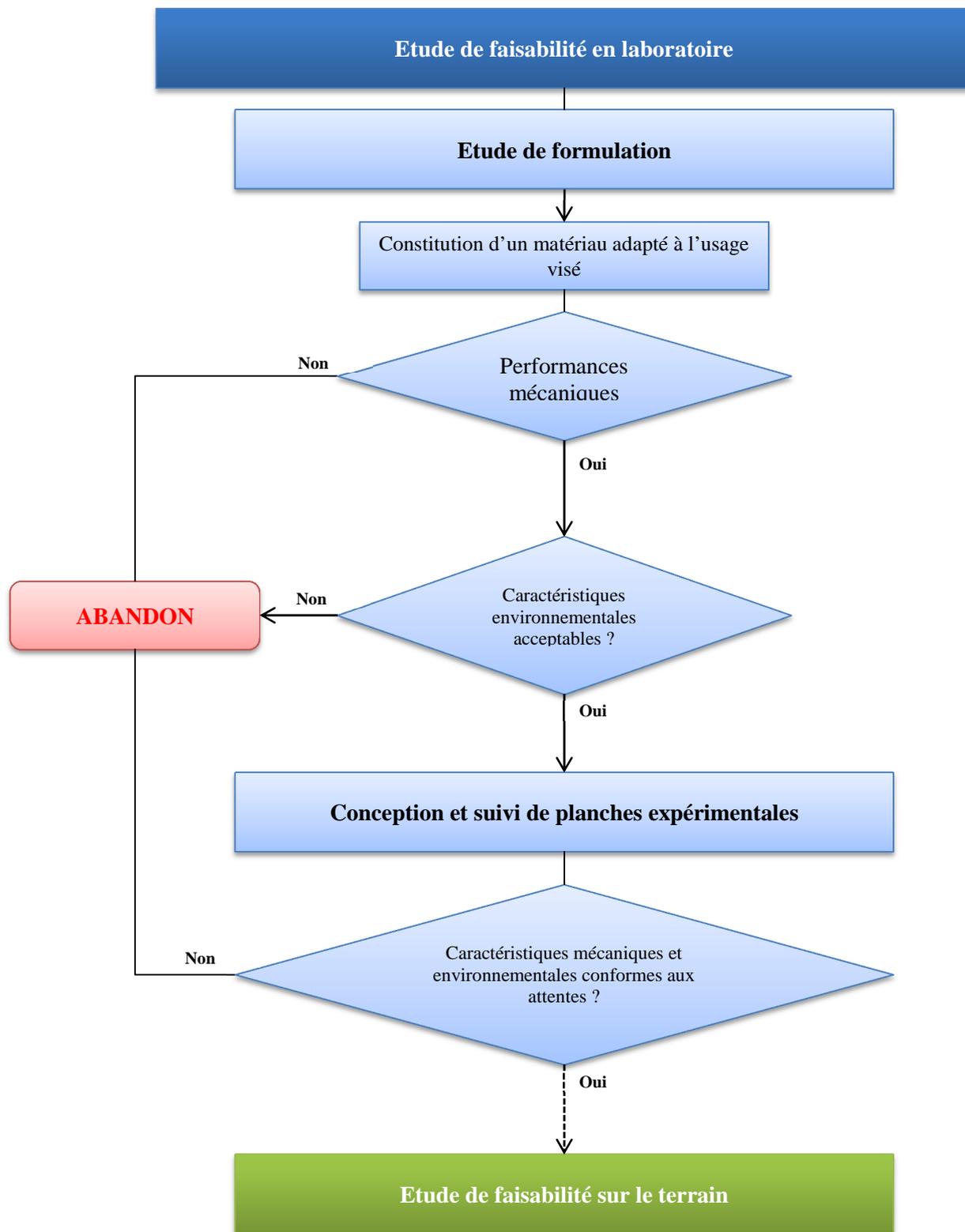


PHASE 1C : Caractérisation de l'impact du projet

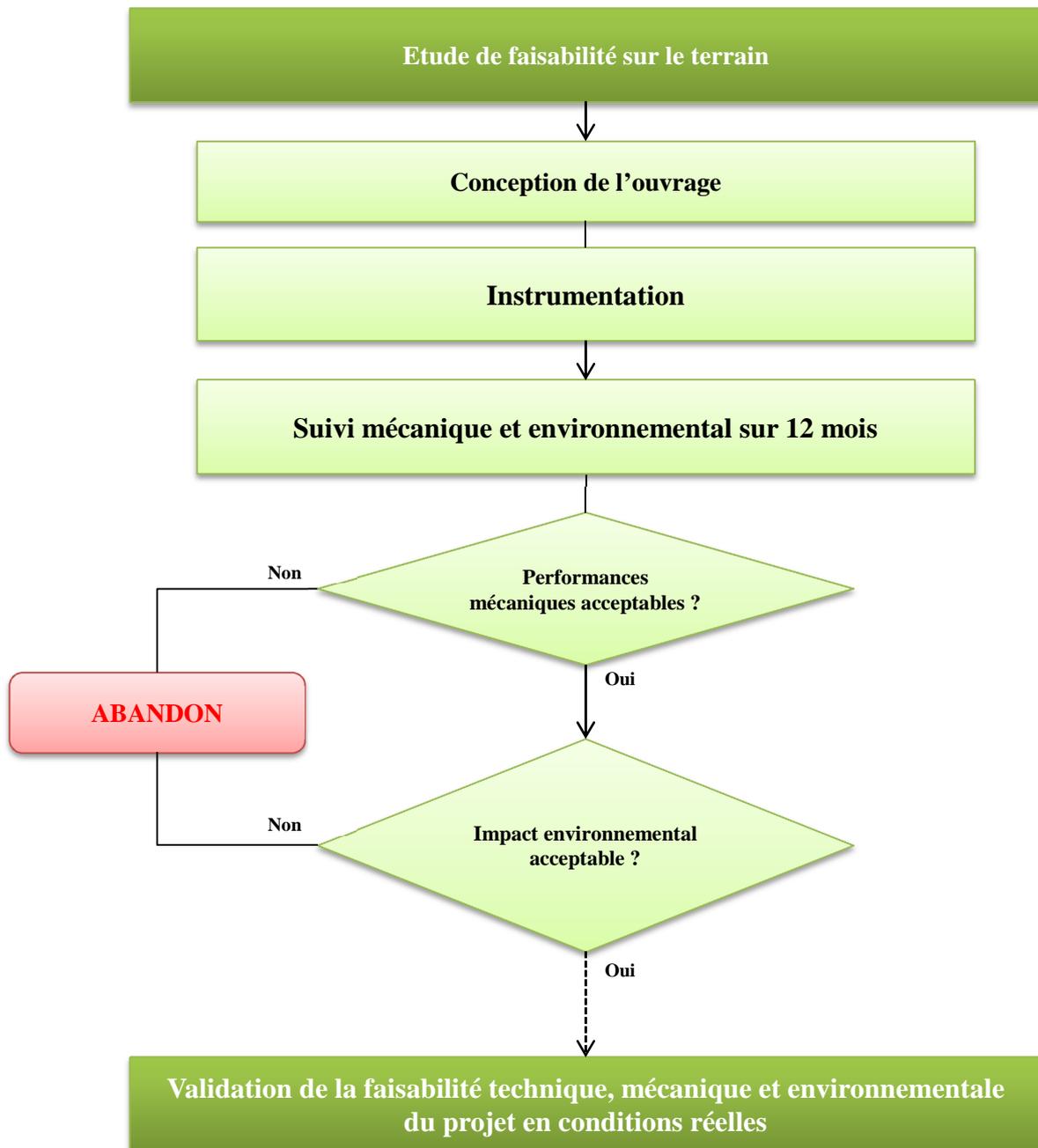


PHASES 2 et 3 : Phases d'études en laboratoire (PHASE 2) et sur le terrain (PHASE 3) permettant de valider la faisabilité technique, mécanique et environnementale du projet.

PHASE 2 : Etude de faisabilité en laboratoire



PHASE 3 : Etude de faisabilité sur le terrain



9. Acronymes

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

CETMEF : Centre d'étude technique maritime et fluvial, le CETMEF a fusionné avec d'autres organismes dont le SETRA pour former le CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) depuis le 1^{er} Janvier 2014

CIMbéton : Centre d'information sur le ciment et ses applications

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EPA : Agence américaine de protection de l'environnement

GPMD : Grand Port Maritime de Dunkerque

INERIS : L'institut national de l'environnement industriel et des risques

SETRA : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements

CD2E : Création et développement des éco-entreprises

VNF : Voies Navigables de France

InVS : Institut de veille sanitaire

UE : Union européenne

CE : Communauté européenne

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

LCPC : Laboratoire central des ponts et chaussées

Termes techniques

VTR : Valeur Toxicologique de Référence

PEC : « Predicted No Effect Concentration) : c'est la plus forte concentration de la substance sans risque pour l'environnement.

PNEC : « Predicted No Effect Concentration) : c'est la plus forte concentration de la substance sans risque pour l'environnement.

ICPE : Installations Classées pour la protection de l'environnement

COD : Carbone organique dissous

COT : Carbone organique total

DCE : Directive cadre sur l'eau

DRX : Diffraction des rayons X

FX : Fluorescence X

MEB : Microscopie Electronique à Balayage

H14 : Critère de danger relatif à l'écotoxicité d'un déchet

HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique

ISDI : Installation de stockage des déchets inertes

L/S : Rapport Liquide/solide

N1/N2 et S1 : Seuils de référence définis pour l'évaluation de la qualité des sédiments (cf. arrêté du 9 août 2006)

W_L : limite de liquidité

NQE : Normes de qualité environnementale

PCB : Polychlorobiphényles

SDAGE : Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux

TBT : Tributylétain

TP : travaux publics

IPI : Indice Portant Immédiat

UT : Unités Toxiques ($UT = 100/CE50$)

CE50 : Concentration Efficace où 50% de l'effet maximal est observé

DCE : directive cadre sur l'eau

BTEX : Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylène

BTP : Bâtiment travaux publics

QD : Quotient de danger

R1/R2 : Seuils de référence définis pour les rejets de polluants en eaux de surface (cf. arrêté du 9 août 2006)

τ : Contrainte tangentielle

C : Cohésion

σ : Contrainte normale

ϕ : Angle de cohésion

VBs : Valeur au bleu de méthylène

Dmax : Dimension maximale en millimètre des granulats contenus dans un échantillon

DJE : Doses Journalières d'Exposition

ERI : Excès de Risque Individuel

Cc : indice de compression

Cs : indice de gonflement

KPa : kilopascal

HCT : Hydrocarbures totaux

ISDND : Installations de stockage de déchets non dangereux

Ip : Indice de plasticité

GTR : Guide des Terrassements Routiers

QD : Quotient de Danger

R1/R2 : Seuils de référence définis pour les rejets de polluants en eaux de surface (cf. arrêté du 9 août 2006)

10. Bibliographie

Loi

Loi n° 76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature

Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau

Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques

Arrêtés, décrets, circulaires

Arrêté du 09/09/97 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux

Arrêté du 08/07/03 relatif aux critères et méthodes d'évaluation des propriétés de dangers H1 explosif, H2 comburant, H3 inflammable et facilement inflammable d'un déchet

Arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 4.1.3.0 et 3.2.1.0 de la nomenclature annexée à l'article R. 214-1 du code de l'environnement

Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique

Arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines

Arrêté du 23 décembre 2009 complétant l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 3.2.1.0 et 4.1.3.0 de la nomenclature annexée à l'article R. 214-1 du code de l'environnement

Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement

Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes

Arrêté du 8 février 2013 complémentaire à l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 3.2.1.0 et 4.1.3.0 de la nomenclature annexée à l'article R. 214-1 du code de l'environnement

Circulaire n° 2000-62 du 14 juin 2000 relative aux conditions d'utilisation du référentiel de qualité des sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire défini par l'arrêté interministériel

Circulaire du 4 juillet 2008 relative à la procédure concernant la gestion des sédiments lors de travaux ou d'opérations impliquant des dragages ou curages maritimes et fluviaux

Circulaire du 24/12/2010 relative aux précédents décrets modifiant la nomenclature des ICPE de traitement de déchets

Décision n° 2003/33/CE du 19/12/02 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE

Décret n° 2009-1341 du 29 octobre 2009 modifiant la nomenclature des installations classées

Décret n° 2010-369 du 13 avril 2010 modifiant la nomenclature des installations classées

Directive 2006/7/CE du Parlement européen et du Conseil du 15 février 2006 concernant la gestion de la qualité des eaux de baignade et abrogeant la directive 76/160/CEE

Directive n° 2006/118/CE du 12/12/06 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration

Directive 2008/105/CE du Parlement européen et du Conseil établissant des normes de qualité environnementale dans le domaine de l'eau, modifiant et abrogeant les directives du Conseil 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE, 86/280/CEE et modifiant la directive 2000/60/CE

Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives

Directive Européenne n°96-29 du 13 mai 1996 N° 9629 EURATOM fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants

Directive 1999/31/CE du Conseil du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets

Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau

Règlement (CE) N° 1488/94 de la Commission du 28 juin 1994 établissant les principes d'évaluation des risques pour l'homme et pour l'environnement présenté par les substances existantes conformément au règlement (CEE) no 793/93 du Conseil

Normes

NF EN 12457-2 (2002-12-01) Titre : Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 2 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction de la granularité)

NF P94-050 (1995-09-01) Titre : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.

NF P94-054 (1991-10-01) Titre : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau.

XP P94-047 (1998-12-01) Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau - Méthode par calcination.

NF P94-057 (1992-05-01) Titre : Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation.

NF P94-068 (1998-10-01) Titre : Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache.

NF P94-051 (1993-03-01) Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.

NF P94-052-1 (1995-11-01) Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1 : limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration.

NF P94-093 (1999-10-01) Titre : Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal. Essai Proctor modifié.

NF P94-078 (1997-05-01) Titre : Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

NF EN 15309 (2007-07-01) Caractérisation des déchets et du sol - Détermination de la composition élémentaire par fluorescence X.

NF CEN/TS 14405 (2005-07-01) Caractérisation des déchets - Essai de comportement à la lixiviation - Essai de percolation à écoulement ascendant (dans des conditions spécifiées)

NF ISO 18589-1 (2005-12-01) Titre : Mesurage de la radioactivité dans l'environnement - Sol - Partie 1 : lignes directrices générales et définitions

NF P11-300 (1992-09-01) Titre : Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières

NF EN 12920+A1 (2008-11-01) Caractérisation des déchets - Méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet dans des conditions spécifiées

NF EN 14346 (2007-03-01) Titre : Caractérisation des déchets - Calcul de la teneur en matière sèche par détermination du résidu sec et de la teneur en eau

NF EN 15169 (2007-05-01) Titre : Caractérisation des déchets - Détermination de la perte au feu des déchets, des boues et des sédiments.

XP CEN ISO/TS 17892-3 (2005-08-01) Titre : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 3 : détermination de la masse volumique des particules solides - Méthode du pycnomètre

NF P94-040 (1993-10-01) Titre : Sols reconnaissance et essais - Méthode simplifiée d'identification de la fraction 0/50 mm d'un matériau grenu - Détermination de la granulométrie et de la valeur de bleu.

ISO 13320:2009 (2009-10-01) Titre : Analyse granulométrique – Méthodes par diffraction laser – Principes généraux

XP CEN ISO/TS 17892-10 (2005-08-01) Titre : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 10 : essai de cisaillement direct

XP CEN ISO/TS 17892-5 (2005-08-01) Titre : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 5 : essai de chargement par paliers à l'oedomètre

XP CEN ISO/TS 17892-8 (2005-08-01) Titre : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 8 : essai triaxial non consolidé non drainé

XP CEN ISO/TS 17892-9 (2005-08-01) Titre : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 9 : essai en compression à l'appareil triaxial sur sols saturés consolidés

XP CEN ISO/TS 21268-1 (2009-12-01) Titre : Qualité du sol - Modes opératoires de lixiviation en vue d'essais chimiques et écotoxicologiques ultérieurs des sols et matériaux du sol - Partie 1 : essai en bâchée avec un rapport liquide/solide de 2 l/kg de matière sèche

XP CEN ISO/TS 21268-2 (2009-12-01) Titre : Qualité du sol - Modes opératoires de lixiviation en vue d'essais chimiques et écotoxicologiques ultérieurs des sols et matériaux du sol - Partie 2 : essai en bâchée avec un rapport liquide/solide de 10 l/kg de matière sèche

XP CEN ISO/TS 21268-3 (2009-12-01) Titre : Qualité du sol - Modes opératoires de lixiviation en vue d'essais chimiques et écotoxicologiques ultérieurs des sols et matériaux du sol - Partie 3 : essai de percolation à écoulement ascendant

XP CEN ISO/TS 21268-4 (2009-12-01) Titre : Qualité du sol - Modes opératoires de lixiviation en vue d'essais chimiques et écotoxicologiques ultérieurs des sols et matériaux du sol - Partie 4 : essai de dépendance au pH avec ajout initial d'acide/base

NF P94-074 (1994-10-01) Sols : reconnaissance et essais - Essais à l'appareil triaxial de révolution - Appareillage - Préparation des éprouvettes - Essai (UU) non consolidé non drainé - Essai (Cu+U) consolidé non drainé avec mesure de pression interstitielle - Essai (CD) consolidé drainé

NF P94-071-1 (1994-08-01) Titre : Sols : reconnaissance et essais - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte - Partie 1 : cisaillement direct.

NF P94-071-2 (1994-08-01) Titre : Sols : reconnaissance et essais - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte - Partie 2 : cisaillement alterné.

XP P94-090-1 (1997-12-01) Titre : Sols : reconnaissance et essais - Essai oedométrique - Partie 1 : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers.

Documents scientifiques et techniques

CETMEF, 2012. Enquête « dragage » 2009 - Analyse de données - Février 2012 – CETMEF

CIMBETON, 2009. Terrassements et assises de chaussée – Traitement des sols aux liants hydrauliques, T70.

INERIS, 2013. Evaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires liés aux émissions chimiques émises par les installations classées, DRC - 12 - 125929 - 13162B.

INERIS, 2013. Guide de classement des déchets selon leur dangerosité suivant le Code de l'Environnement et la réglementation SEVESO II (partie applicable aux déchets), DRC-12-125740-06310A

MARCHAND, M ; TISSIER, C ; 2005. IFREMER / INERIS. Analyse du risque chimique en milieu marin – L’approche méthodologique européenne. IFREMER / INERIS. 125 p.

InVS, 2000. Guide pour l’analyse du volet sanitaire des études d’impact.

INERIS, 2003. Guide méthodologique : Evaluation des Risques Sanitaires dans les études d’impact des installations classées – Substances chimiques

ECB, 2003. Technical Guidance Document (TGD) in support of Commission Directives 93/67/EEC on Risk Assessment for new notified substances, Commission Regulation EC No 1488/94 on Risk assessment for existing substances and Directive 98/8 EC of the European Parliament and of Council concerning the placing of biocidal products on the market. European Chemical Bureau. Part I, II, III and IV, Ispra (Italy): 1044 p

European Commission, 2003. Technical guidance documents on risk assessment in support of Commission Directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances, Commission Regulation (EC) N° 1488/94 on risk assessment for existing substances, and Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council concerning the placing of biocidal products on the market.

NRC (National Research Council), 1994. Science and Judgment in Risk Assessment. Washington, DC: National Academy Press.

SETRA, 2011. Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière- Evaluation environnementale. Guide méthodologique.

VNF, 2011. – Circulaire technique – Opération de dragage – VNF/SME/C□TEC/DRAG/e – 26 p