

Valorisation des sédiments de dragage en technique routière

Guide méthodologique

Version septembre 2014

Comité de rédaction :

Nor-Edine ABRIAK (Ecole des Mines de Douai)
Raouf ACHOUR (Ecole des Mines de Douai)
Yannick MAMINDY-PAJANY (Ecole des Mines de Douai)
Rachid ZENTAR (Ecole des Mines de Douai)
Mahfoud BENZERZOUR (Ecole des Mines de Douai)
Samira BRAKNI (CD2E)

Comité de lecture :

Groupe D'Experts Scientifiques de Sédimentaires (GES)
Gaëlle MESMACQUES (DREAL Nord Pas de Calais)
Patrice MAUREL (Conseil Régionale 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 :



Sommaire

LISTE DES FIGURES	5
LISTE DES TABLEAUX	6
AVANT-PROPOS	7
1. PROBLEMATIQUE DES SEDIMENTS PORTUAIRES.....	8
2. OBJECTIFS DE LA DEMARCHE SEDIMATERIAUX.....	8
3. PRATIQUES ACTUELLES	9
3.1 STRUCTURE D'UNE CHAUSSEE ROUTIERE	9
3.2 REGLEMENTATIONS ET METHODOLOGIES DISPONIBLES.....	10
3.2.1 Usages routiers envisageables	10
3.2.2 Caractéristiques géotechniques et mécaniques	11
3.2.3 Acceptabilité environnementale.....	12
3.2.4 Production d'une étude impact	12
3.2.5 Résumé de l'étude de faisabilité.....	12
4. METHODOLOGIE DES PROJETS SEDIMATERIAUX.....	14
4.1 PHASE 1 : CARACTERISATION	14
4.2 PHASE 2 : ETUDE EN LABORATOIRE.....	16
4.3 PHASE 3 : ETUDE DE TERRAIN.....	16
5. PHASE 1 : CARACTERISATION.....	16
5.1 CARACTERISATIONS REGLEMENTAIRES	16
5.1.1 Analyse de la dangerosité.....	18
5.1.2 Analyse de radioactivité	21
5.2 CARACTERISATIONS COMPLEMENTAIRES	22
5.2.1 Analyses physiques et géotechniques.....	24
5.2.2 Analyses minéralogiques	25
5.2.3 Analyses mécaniques.....	26
5.2.4 Analyses chimiques.....	26
5.2.5 Analyses environnementales	28
5.3 CARACTERISATION DE L'IMPACT DU PROJET	31
5.3.1 Utilisation d'installations de transit et/ou de traitement.....	31
5.3.2 Etude de l'impact de l'ouvrage à base de sédiment	32
6. PHASE 2 : ETUDE EN LABORATOIRE	40
6.1 ECHANTILLONNAGE SUR LE SITE DE STOCKAGE OU DE DEPOT	40
6.2 ETUDE DE FORMULATION.....	40
6.2.1 Elaboration du matériau routier.....	40
6.2.2 Performances mécaniques	43
6.2.3 Acceptabilité environnementale.....	45
6.3 CONCEPTION ET SUIVI D'UNE PLANCHE EXPERIMENTALE	48
6.3.1 Conception de la planche expérimentale.....	48
6.3.2 Suivi mécanique et environnemental	48

7. PHASE 3 : ETUDE DE TERRAIN	49
7.1 REALISATION D'UN OUVRAGE EXPERIMENTAL.....	49
7.1.1 <i>Caractéristiques techniques de la chaussée</i>	49
7.1.2 <i>Etapes de réalisation de la chaussée expérimentale</i>	50
7.2 SUIVI MECANIQUE ET ENVIRONNEMENTAL.....	51
7.2.1 <i>Suivi in situ des caractéristiques mécaniques</i>	51
7.2.2 <i>Suivi environnemental du plot</i>	51
7.2.3 <i>Essais spécifiques après carottages</i>	54
8. SYNOPTIQUE DE LA METHODOLOGIE SEDIMATERIAUX.....	54
9. ACRONYMES	60
10. BIBLIOGRAPHIE.....	62

Liste des figures

Figure 1. Coupe type d'une structure de chaussée	9
Figure 2. Illustration des différents usages routiers de « type 1 » et de « type 2 » (SETRA, 2011).....	11
Figure 3. Logigramme de la valorisation des matériaux alternatifs en technique routière.....	13
Figure 4. Description de la méthodologie élaborée dans le cadre de la démarche SEDIMATERIAUX	15
Figure 5. Caractérisations réglementaires des sédiments de dragage en vue de leur valorisation à terre	17
Figure 6. Protocole d'évaluation de la propriété de danger H14 pour les sédiments marins et fluviaux	21
Figure 7. Caractérisations complémentaires sur les sédiments bruts.....	23
Figure 8. Synoptique de classification des matériaux selon leur nature, selon la norme NF P 11-300 (CIMBETON, 2009).....	25
Figure 9. Microphotographies obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) d'un sédiment marin	26
Figure 10. Principe de base de l'évaluation des risques	34
Figure 11. Démarche itérative de l'évaluation des risques	35
Figure 12. Schéma de l'évaluation du risque chimique dans l'environnement (Marchand et Tissier, 2005).....	37
Figure 13. Étapes de l'évaluation des risques sanitaires.....	39
Figure 14. Schéma conceptuel de l'évaluation des risques environnementaux et sanitaires d'un ouvrage routier à base de sédiment	40
Figure 15. Distribution granulométrique des constituants d'un matériau routier.....	42
Figure 16. Evolution du pH en fonction de l'ajout de chaux	43
Figure 17. Abaque de classification des matériaux de sous-couches routières aux liants hydrauliques (SETRA-LCPC, 2000).....	45
Figure 18. Procédure de caractérisation environnementale des matériaux alternatifs et routiers d'après le guide « Acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière- Evaluation environnementale ».....	47
Figure 19. Planche expérimentale	48
Figure 20. Étapes de réalisation de l'ouvrage expérimental à base de sédiments portuaires.....	50
Figure 21. Étapes de réalisation d'un plot expérimental.....	52
Figure 22. Prélèvements d'eau de percolation au niveau du plot expérimental (Achour, 2013). (1) et (2) Prélèvement de l'échantillon, (3) et (4) Conditionnement.	52
Figure 23. Prélèvements d'eau au niveau du piézomètre. (1) Piézomètre, (2) Pompe à soupape, (3) Dispositif de prélèvement, (4) Conditionnement des échantillons	53

Liste des tableaux

<i>Tableau 1. Principales voies de gestion des sédiments de dragage sur le territoire national (CETMEF, 2012) ...</i>	8
<i>Tableau 2. Critères de danger à prendre en compte lors de l'évaluation de la dangerosité des sédiments.</i>	18
<i>Tableau 3. Seuils S1 issus de l'arrêté du 9 août 2006.....</i>	20
<i>Tableau 4. Analyses physiques et géotechniques à réaliser sur les sédiments bruts.....</i>	24
<i>Tableau 5. Niveaux de références de l'arrêté du 9 août 2006</i>	27
<i>Tableau 6. Niveaux de référence des arrêtés du 23 décembre 2009 (TBT) et du 08 février 2013 (HAP).....</i>	27
<i>Tableau 7. Valeurs limites en lixiviation permettant de justifier toutes les utilisations visées par le guide d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière (SETRA, 2011).....</i>	28
<i>Tableau 8. Valeurs limites à ne pas dépasser en contenu total pour être candidat à une utilisation en technique routière.....</i>	29
<i>Tableau 9. Valeurs limites en percolation permettant de justifier l'utilisation d'un matériau alternatif en sous couche de chaussée ou d'accotement revêtus et en remblai technique ou accotement.....</i>	29
<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>	30
<i>Tableau 11. Paramètres complémentaires à évaluer pour les déchets granulaires admissibles dans les décharges pour déchets dangereux.</i>	31
<i>Tableau 12. Rubriques potentielles visées par la nomenclature ICPE</i>	32
<i>Tableau 13. Indice portant immédiat (IPI) minimum à obtenir à la mise en œuvre de sous-couches routières (SETRA-LCPC, 2000).....</i>	43
<i>Tableau 14. Comportement mécanique des matériaux utilisés en sous-couches routières.....</i>	44
<i>Tableau 15. Détermination de la classe mécanique d'un sol traité en fonction de ses caractéristiques mécaniques et de son mode de préparation.....</i>	44

Avant-propos

Le présent guide expose la méthodologie et les modalités sous lesquelles les sédiments de dragage peuvent être valorisés en technique routière dans une optique de développement durable, de protection de l'environnement et des populations. Ce guide est issu des travaux de recherche menés par le Département Génie Civil et Environnemental (DGCE) de l'Ecole des Mines de Douai depuis plus de dix ans sur la thématique de valorisation des sédiments de dragage, et ceci en cohérence avec la réglementation nationale et le cadre méthodologique (ADEME, 2010 ; SETRA, 2011) qui prévalait lors de la réalisation des travaux.

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

3.1 Structure d'une chaussée routière

Les chaussées sont composées d'une superposition de couches (figure 1) possédant des caractéristiques mécaniques distinctes. Dans une structure de chaussée, on distingue trois niveaux de couches principales : (i) la couche de forme, (ii) les couches d'assise (couches de base et de fondation), et (iii) les couches de surface (couches de roulement et de liaison).

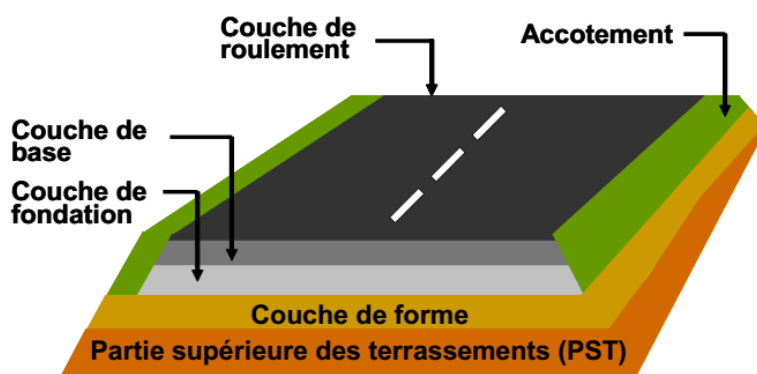


Figure 1. Coupe type d'une structure de chaussée

Le sol-support est surmonté généralement par une couche de forme. L'ensemble sol-support et couche de forme représente la plate-forme support de la chaussée (éventuellement compris la sous-couche). La couche de forme a une double fonction. Pendant les travaux, elle assure d'une part la protection du sol-support contre la pluie et les effets de cycle gel-dégel. D'autre part, elle permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins. En service, elle permet d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou le remblai et d'améliorer la portance à long terme.

La couche de base et la couche de fondation forment le corps de chaussée proprement dit qui a le rôle de réception des charges produites par le trafic et les réparties sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible. La couche de base, plus proche de la surface de la chaussée, subit des contraintes et des déformations notables; il est donc nécessaire qu'elle présente des caractéristiques mécaniques plus élevées que celles de la couche de forme.

La couche de surface se compose de la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison. Elle a deux fonctions, d'une part elle assure la protection du corps de chaussée vis-à-vis des infiltrations d'eau et d'autre

part, elle reçoit directement la pression des pneus de véhicule et la transmet vers le corps de chaussée après avoir subi une déformation admissible.

Dans le massif de chaussée, de haut en bas, la distribution de la charge est de moins en moins importante. Cela permet d'utiliser des matériaux ayant des caractéristiques mécaniques variées en fonction de leur position dans la structure de la chaussée.

3.2 Réglementations et méthodologies disponibles

Les travaux publics (TP) sont de gros consommateurs de matériaux et les granulats constituent un des matériaux de base de cette filière. En effet, les granulats sont des matériaux régulièrement utilisés dans la fabrication du béton ainsi que des chaussées routières. Les granulats produits en France proviennent très majoritairement de carrières terrestres et sont issus de gisements alluvionnaires dont la ressource s'épuise. Dans ce contexte, l'utilisation des sédiments de dragage sous forme de granulats est amenée à se développer pour répondre aux besoins croissants de la filière des travaux publics et en particulier dans le secteur routier.

L'arrêté du 30 mai 2008 encadrant la gestion des sédiments stipule que : « les sédiments non remis dans les cours d'eau doivent faire l'objet, en priorité, dans des conditions technico-économiques acceptables, d'un traitement approprié permettant leur utilisation en tant que granulat ». Par conséquent, les sédiments non immergeables, mais non dangereux peuvent potentiellement être valorisés en technique routière sous réserve qu'ils soient conformes aux spécifications techniques en vigueur.

3.2.1 Usages routiers envisageables

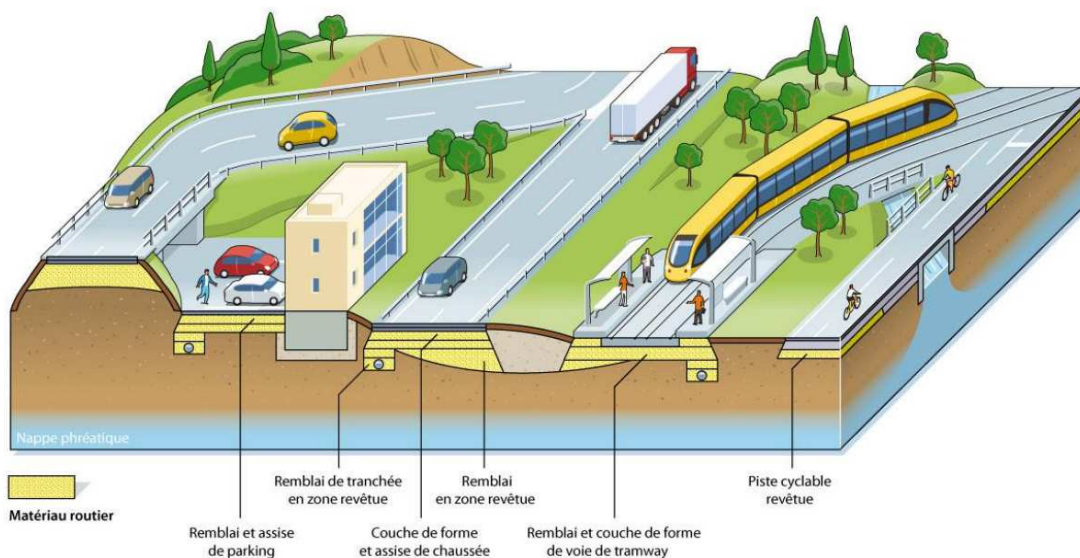
Dans le cadre d'une réutilisation en technique routière, les sédiments de dragage sont considérés comme des « matériaux alternatifs ». Ce terme définit tout matériau élaboré à partir d'un déchet et destiné à être utilisé, seul ou en mélange avec d'autres minéraux alternatifs ou non. Un matériau alternatif est le constituant d'un matériau routier. Conformément au guide méthodologique « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière » (SETRA, 2011), les usages routiers susceptibles d'être envisagés sont les suivants (figure 2) :

- Usages en sous couche de chaussée ou d'accotement revêtus (**usages routiers de type 1**): remblai sous ouvrage, couche de forme, couche de fondation, couche de base, et couche de liaison.
- Usages en remblai technique connexe à l'infrastructure routière et en accotement, dès lors qu'il s'agit d'usages recouverts (**usages routiers de type 2**).

Un ouvrage routier est réputé revêtu si sa couche de surface est réalisée à l'aide d'asphalte, d'enrobés bitumineux, d'enduits superficiels d'usure, de béton, de ciment ou de pavés jointoyés par un matériau lié, et si elle présente en tout point une pente minimale de 1% (SETRA, 2011).

Un ouvrage routier est réputé recouvert si les matériaux routiers qui y sont présents sont recouverts par au moins 30 centimètres de matériaux naturels, et s'il présente en tout point de son enveloppe extérieure une pente minimum de 5% (SETRA, 2011).

Usages routiers "type 1"



Usages routiers "type 2"

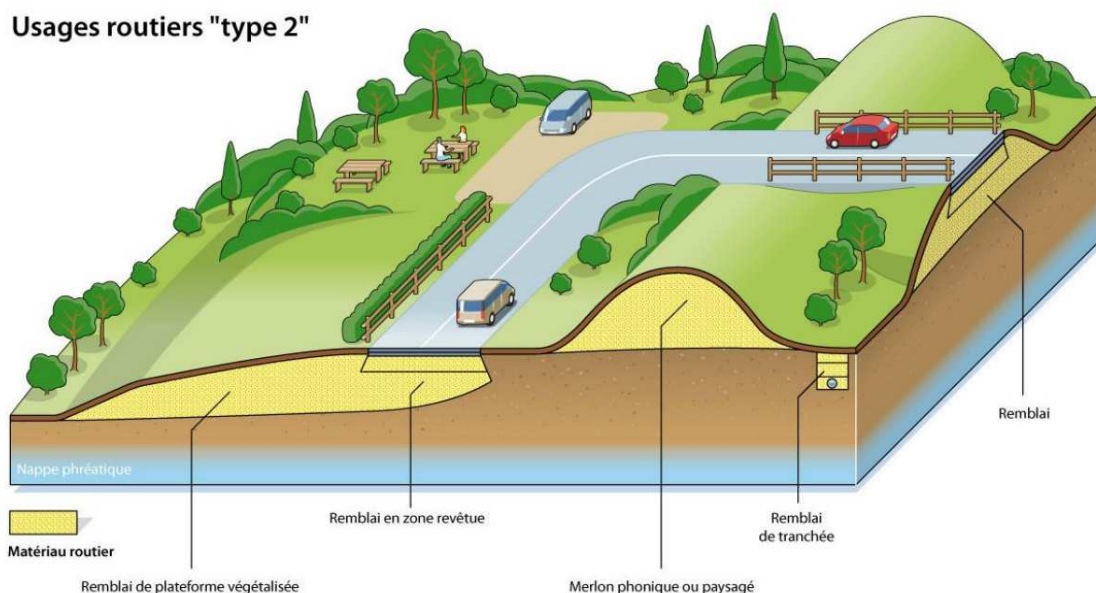


Figure 2. Illustration des différents usages routiers de « type 1 » et de « type 2 » (SETRA, 2011)

3.2.2 Caractéristiques géotechniques et mécaniques

Les conditions d'utilisation des matériaux en terrassement routier sont précisées dans le « guide technique de réalisation des remblais et des couches de forme » du SETRA-LCPC dont la dernière édition date de juillet 2000. 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) découle directement de ce guide. Elle est également connue sous l'appellation « Classement GTR » et permet de définir les caractéristiques géotechniques des matériaux naturels et sous-produits industriels (y compris déchets de démolition) pouvant faire l'objet d'une utilisation en remblai et couche de forme d'infrastructures routières.

3.2.3 Acceptabilité environnementale

Le guide d'acceptabilité environnementale du SETRA (2011) fournit une démarche d'évaluation de l'acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs élaborés à partir de déchets et destinés à être utilisés en techniques routières sous forme de granulats, de graves, de sols, de fillers ou de liants. L'objectif global de l'étape de caractérisation environnementale est de démontrer, pour l'usage routier envisagé, que les émissions des sédiments de dragage et du matériau routier sont compatibles avec le respect des objectifs de qualité des eaux visés par le guide méthodologique.

La démarche d'évaluation environnementale comporte trois niveaux d'investigations permettant de graduer l'effort de démonstration en fonction du risque que présentent les matériaux concernés, vis-à-vis de l'environnement :

- le niveau 1 repose sur la réalisation d'essais de lixiviation et d'analyses en contenu total ; pour ce niveau d'évaluation le guide propose des seuils similaires à l'arrêté du 28/10/2010 pour l'acceptabilité des matériaux étudiés en technique routière
- le niveau 2 repose sur la réalisation d'essais de percolation, des seuils spécifiques sont proposés pour valider
- le niveau 3 repose sur la production d'une étude spécifique. Contrairement aux niveaux précédents, le guide ne propose pas de seuils pour justifier de l'acceptabilité environnementale des matériaux. Pour ce niveau d'évaluation, l'expertise des émissions des matériaux de dragage et routiers peut se faire sur la base de la directive cadre sur l'eau.

La réalisation d'une étude spécifique, associée au niveau 3 de caractérisation environnementale, est à envisager lorsque les niveaux 1 et 2 de caractérisation environnementale ne permettent pas de justifier de l'acceptabilité en technique routière d'un matériau alternatif et/ou routier, ou que les procédures ou les essais associés ne sont pas adaptés à la nature des matériaux étudiés.

3.2.4 Production d'une étude impact

La réalisation d'une infrastructure routière implique au préalable une évaluation des risques environnementaux et sanitaires liés à l'utilisation de sédiments de dragage non immergeables. Cette étude d'impact dispose d'une assise réglementaire (articles L.122-1 et suivants et R122-1 et suivants du code de l'environnement) et son contenu est précisé à l'article R122-5 du code de l'environnement.

3.2.5 Résumé de l'étude de faisabilité

La figure 3 résume les différentes étapes nécessaires à la réalisation d'un projet de valorisation de matériaux alternatifs en technique routière. Le cadre méthodologique en vigueur fournit les essais à réaliser ainsi que les seuils à respecter pour la valorisation de matériaux alternatifs comme les sédiments de dragage. Bien que ce référentiel technique n'ait pas été conçu spécifiquement pour les sédiments de dragage, il est aujourd'hui largement utilisé pour étudier la faisabilité de la valorisation des sédiments de dragage en technique routière. Ainsi, des sédiments de dragage classés comme « inertes et non dangereux » ou « non inertes et non dangereux » peuvent

être valorisés à grande échelle uniquement sur la base d'essais géotechniques, mécaniques et environnementaux (niveaux 1 et 2 du guide SETRA, 2011) réalisés à l'échelle du laboratoire.

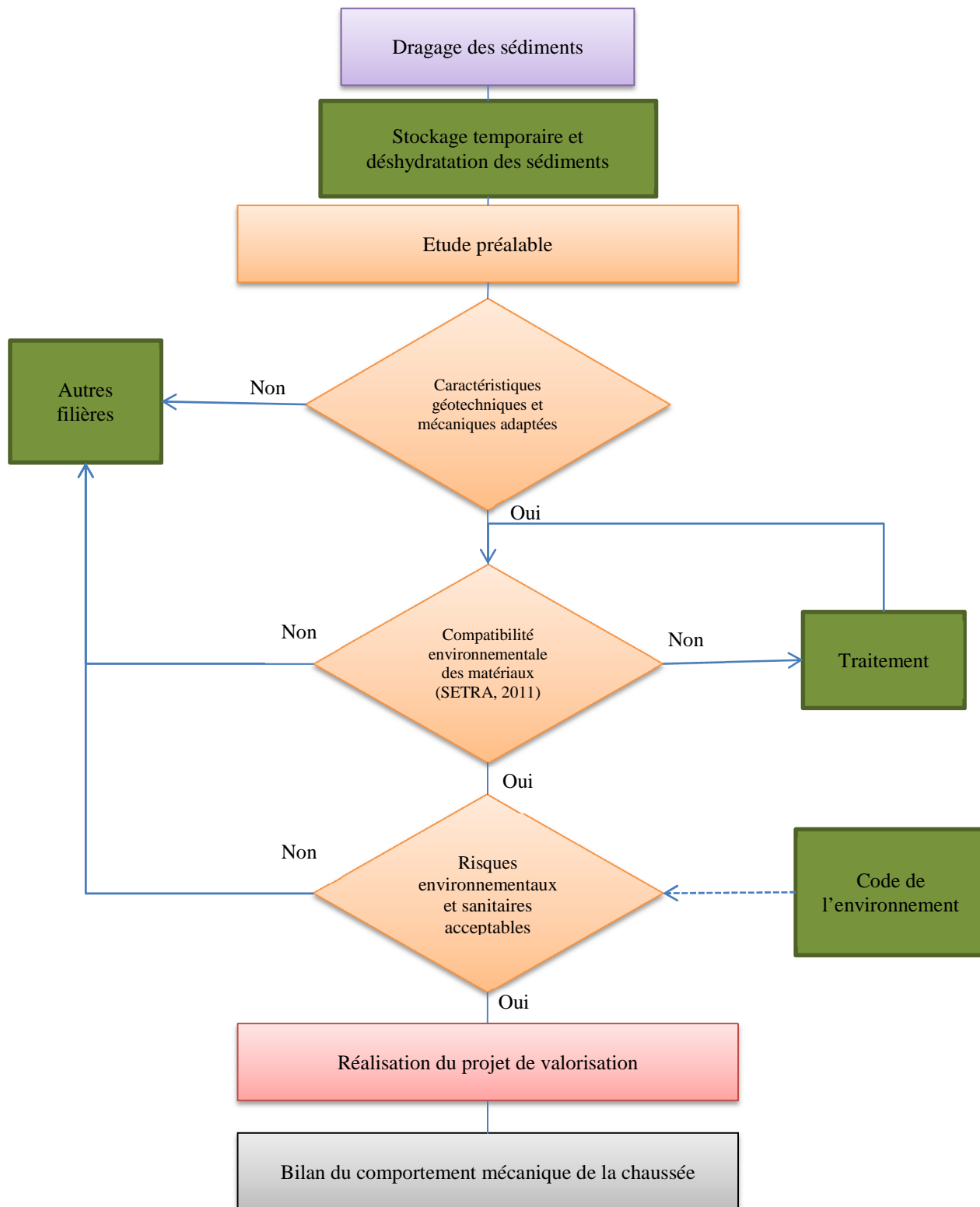


Figure 3. Logigramme de la valorisation des matériaux alternatifs en technique routière

4. Méthodologie des projets SEDIMATERIAUX

Compte tenu de la nature et du comportement des sédiments de dragage, l'utilisation d'essais de laboratoire ne permet pas de justifier de la faisabilité technique, mécanique et environnementale de la valorisation de ces matériaux en technique routière.

A ce titre, la méthodologie expérimentale suivie dans le cadre de la démarche SEDIMATERIAUX nécessite, par principe, de prendre plus de précautions que les référentiels existants 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 4):

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

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.

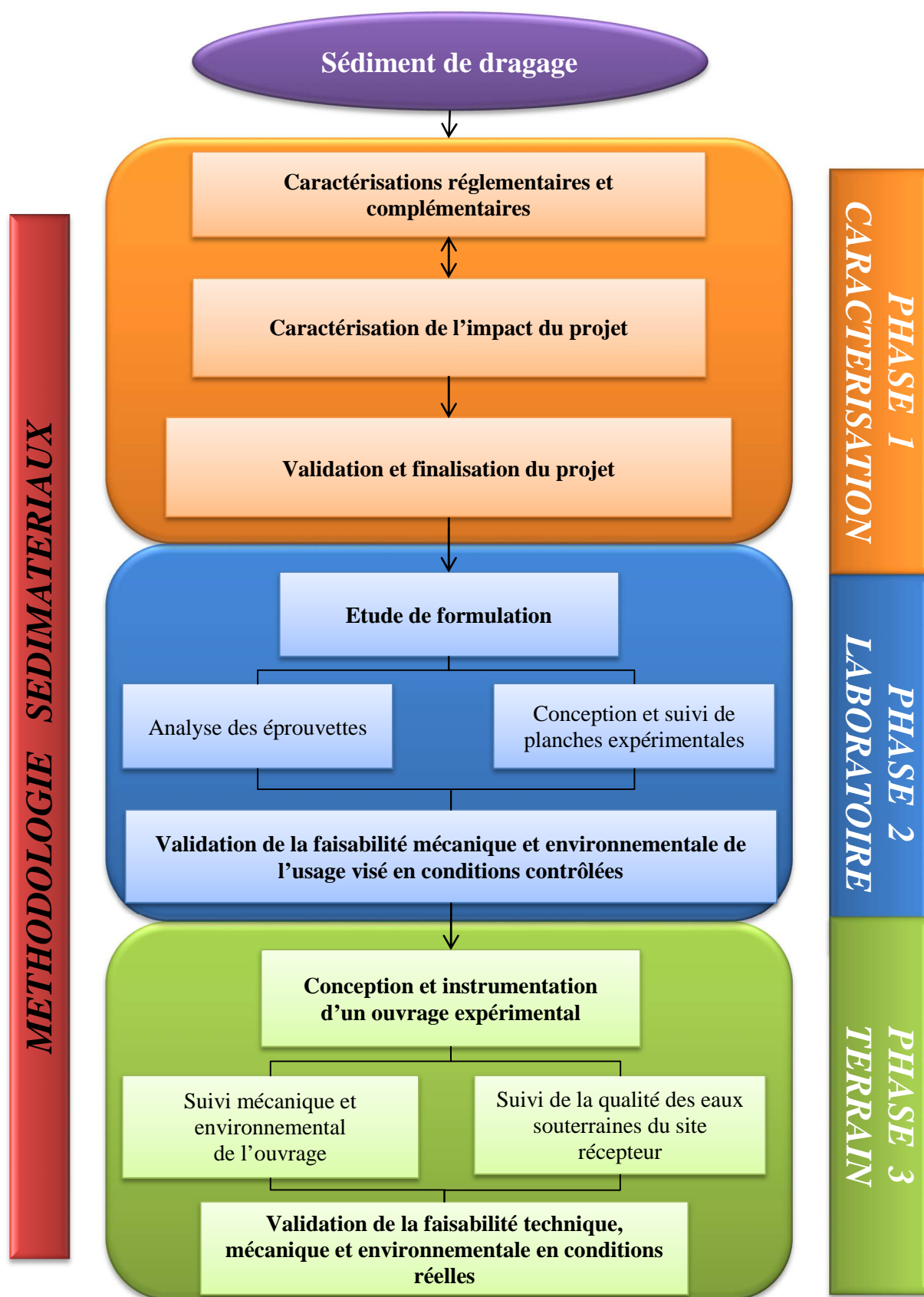


Figure 4. Description de la méthodologie élaborée dans le cadre de la démarche SEDIMATERIAUX

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 obtenus sur le terrain avec les essais de laboratoire et les référentiels techniques et réglementaires permettra de valider la faisabilité technique et environnementale de la filière de valorisation visée.

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 à travers la réalisation d'essais complémentaires (Figure 5). 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 de sédiments 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.

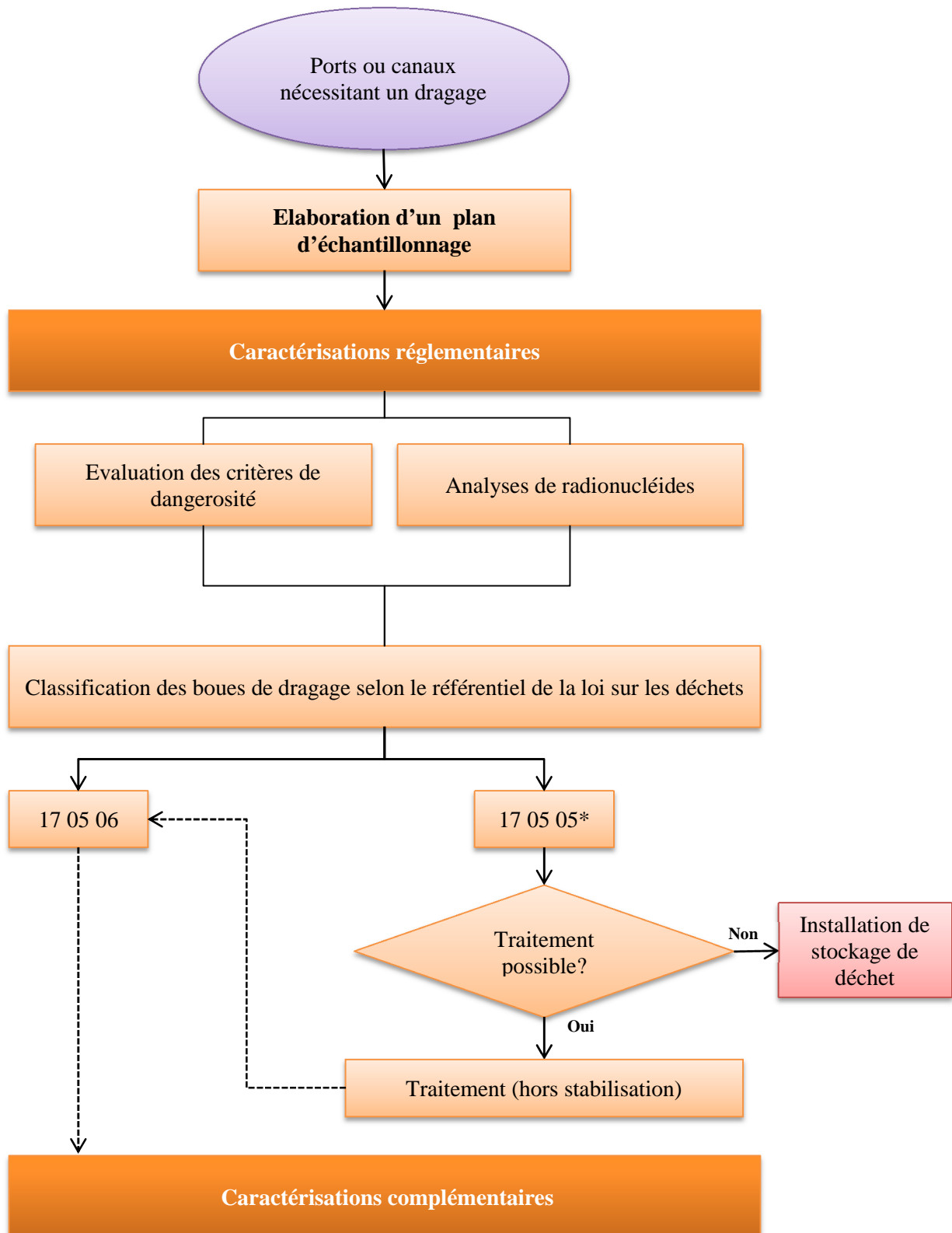


Figure 5. Caractérisations réglementaires des sédiments de dragage en vue de leur valorisation à terre

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 peroxyde 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 « Dangers des sédiments ». Dans cette approche, les tests sont généralement réalisés par étapes (Figure 6). 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 chronique 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 « dangers 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.

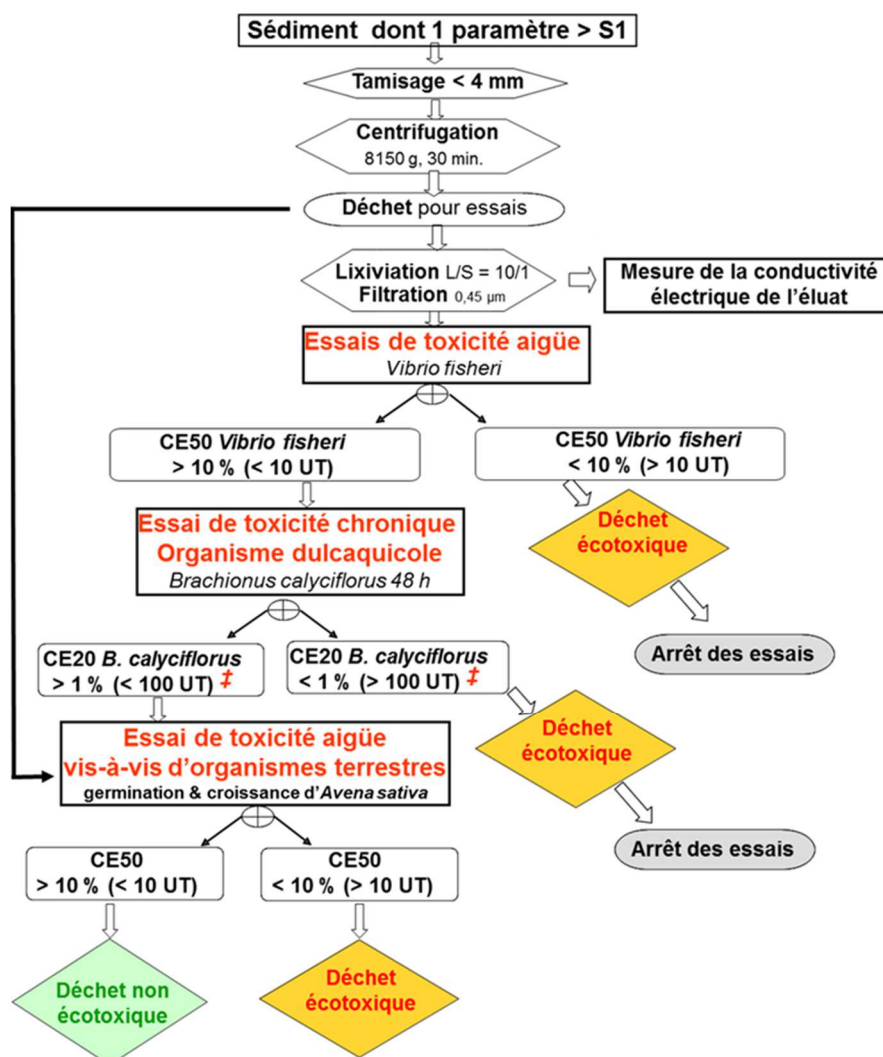


Figure 6. Protocole d'évaluation de la propriété de danger H14 pour les sédiments marins et fluviaux

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 leurs gisements 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 7). 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.

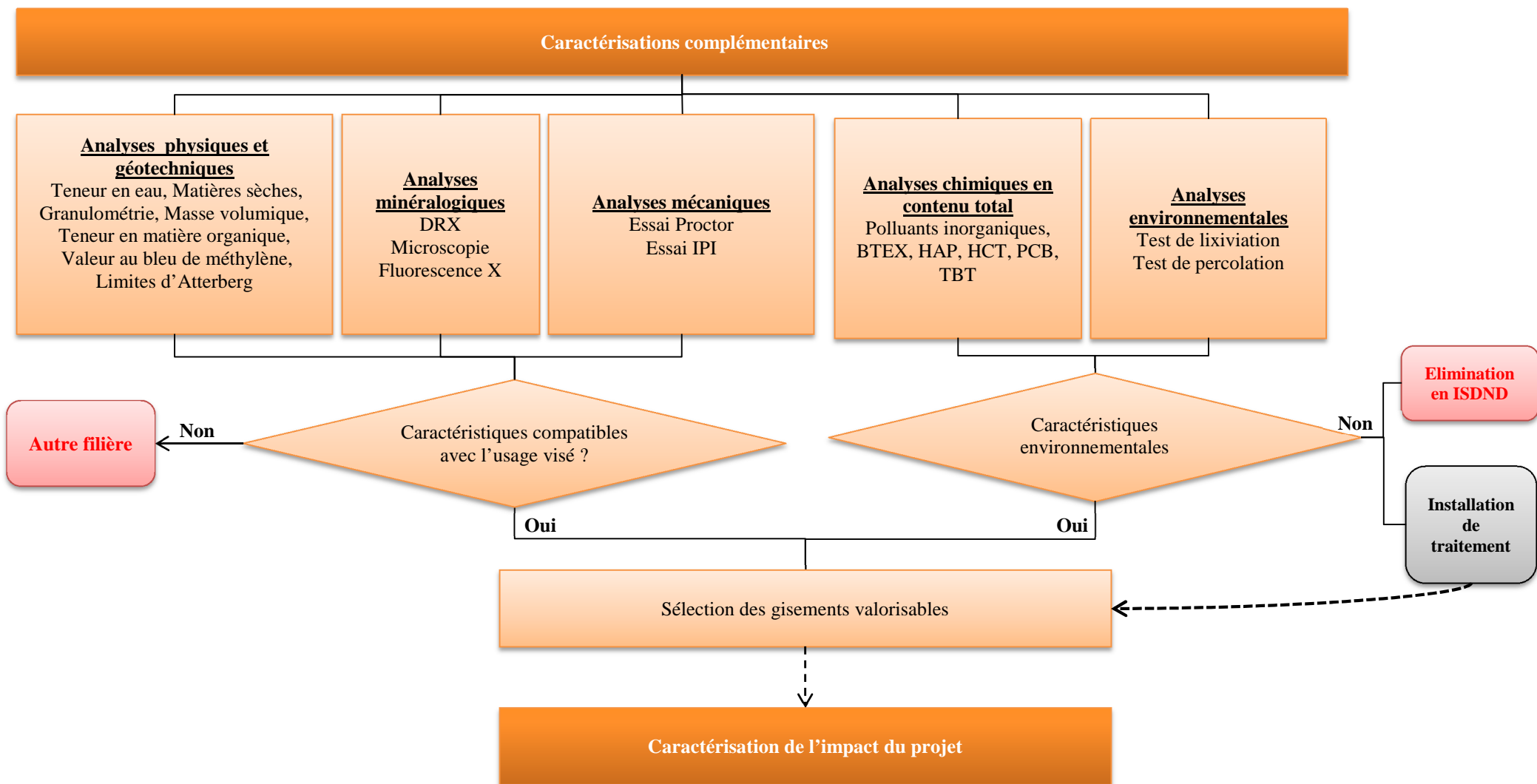


Figure 7. Caractérisations complémentaires sur les sédiments bruts

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

Le guide technique SETRA-LCPC (2000) comporte une classification précise d'une grande variété de matériaux (Figure 8). Ainsi, suivant les spécificités du matériau le guide propose des techniques de traitement adaptées. 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 8). 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.

Ce type de matériau est difficile à utiliser dans la construction des routes en raison de leur sensibilité à l'eau et de leur compressibilité. En outre, les sédiments bruts présentent un faible Indice Portant Immédiat. Pour augmenter la performance mécanique des sédiments, une addition de correcteurs granulaires suivie par un traitement aux liants hydrauliques et/ou aériens (ciment et/ou chaux) est généralement utilisée.

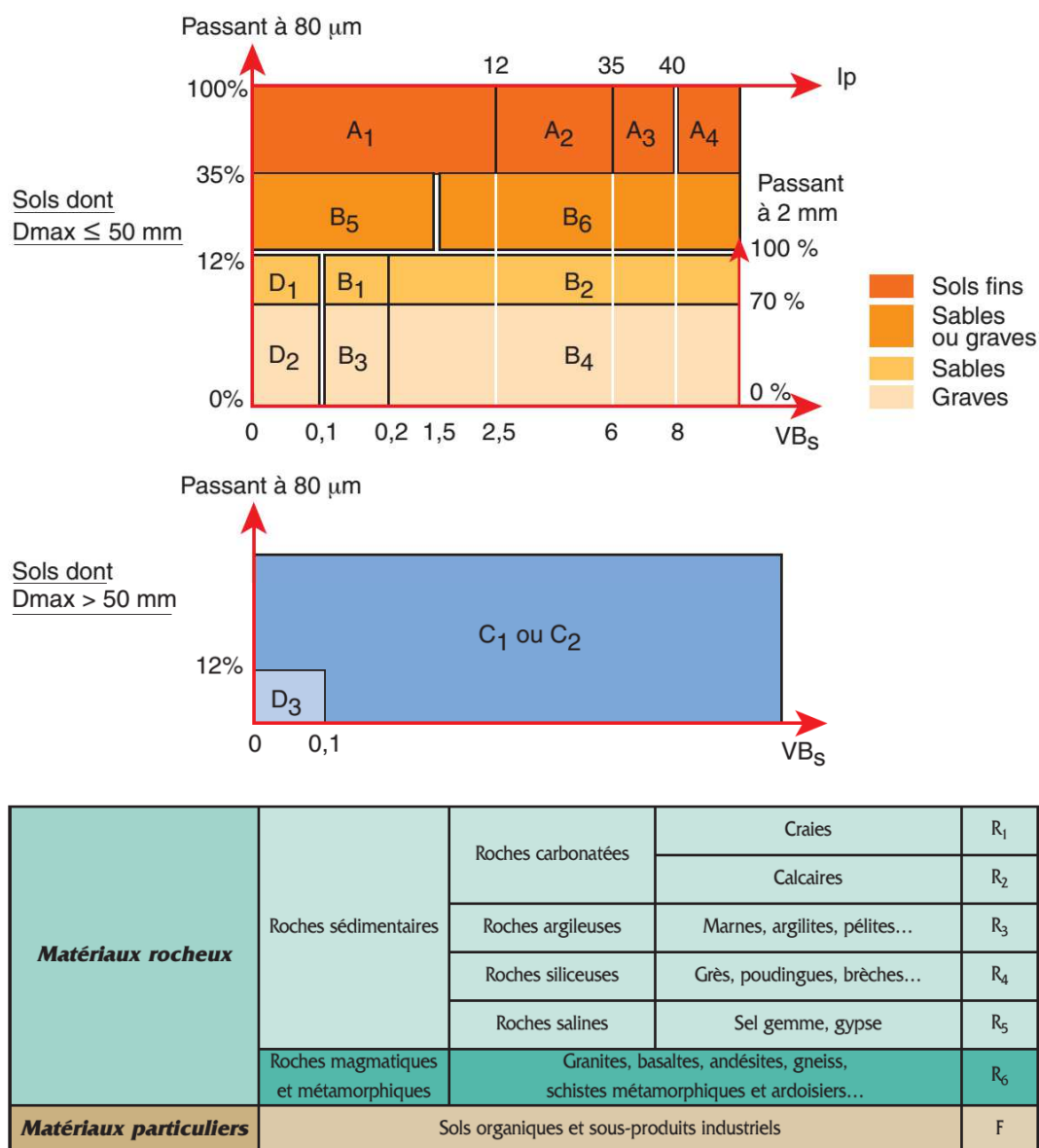


Figure 8. Synoptique de classification des matériaux selon leur nature, selon la norme NF P 11-300 (CIMBETON, 2009)

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 (amorphes ou cristallisées) qui pourraient poser problème lors de la valorisation des sédiments (Figure 9). 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.

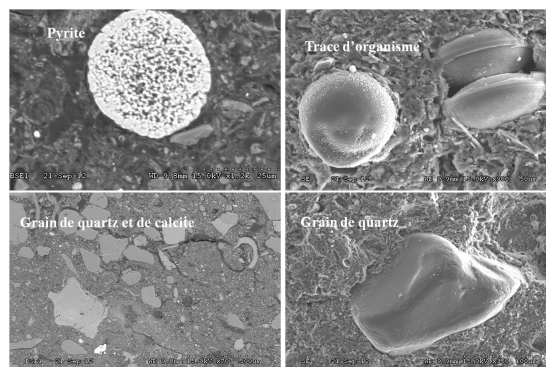


Figure 9. Microphotographies obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) d'un sédiment marin

5.2.3 Analyses mécaniques

L'emploi des sédiments dans les couches de route doit satisfaire des conditions minimales de portance. Pour ce faire, la caractérisation mécanique des sédiments bruts est réalisée selon le Guide technique SETRA-LCPC (2000). Cette étape est déterminante pour mener à bien l'étude de formulation du matériau routier.

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.

Pour une couche de forme, la teneur en eau optimale et la densité correspondante sont déterminées par l'essai Proctor 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.

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 (Éléments 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 lors de l'étape de zonage 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 du 08 février 2013 (HAP)

Polluants (µg/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 technique routière, la caractérisation environnementale devra se faire à l'aide d'essais normalisés en s'appuyant sur les référentiels réglementaires et techniques existants, à savoir le guide « Acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière » (SETRA, 2011) et la directive 1999/31/CE. Ces référentiels permettent d'identifier les possibilités de valorisation des matériaux inertes et non inertes sur la base de seuils en contenu total, en lixiviation, et en percolation.

Référentiel SETRA (2011)

Ainsi, les sédiments de dragage doivent être caractérisés selon leur comportement à la lixiviation (norme NF EN 12457-2), à la percolation (norme NF CEN/TS 14405) et selon leur teneur intrinsèque en éléments polluants par gisement homogène. Il faut noter que les substances mesurées en contenu total sont déjà prises en compte dans le cadre de la loi sur les déchets. Si les teneurs mesurées respectent les seuils du guide SETRA (tableaux 7, 8 et 9), le sédiment est qualifié de matériau alternatif et sa valorisation en technique routière est possible.

Tableau 7. Valeurs limites en lixiviation permettant de justifier toutes les utilisations visées par le guide d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière (SETRA, 2011)

Paramètres	Quantité relarguée cumulée à L/S = 10 l/kg (essai de lixiviation NF EN 12457-2 ou NF EN 12457-4)		
	Valeur à respecter par au moins 80% des échantillons (mg/kg de matière sèche)	Valeur à respecter par au moins 95% des échantillons (mg/kg de matière sèche)	Valeur à respecter par 100% des échantillons (mg/kg de matière sèche)
As	0,5	1	1,5
Ba	20	40	60
Cd	0,04	0,08	0,12
Cr total	0,5	1	1,5
Cu	2	4	6
Hg	0,01	0,02	0,03
Mo	0,5	1	1,5
Ni	0,4	0,8	1,2
Pb	0,5	1	1,5
Sb	0,06	0,12	0,18
Se	0,1	0,2	0,3
Zn	4	8	12
Fluorure	10	20	30
Chlorure (*)	800	1600	2400
Sulfate (*)	1000	2000	3000
Fraction soluble (*)	4000	8000	12000
pH	[5,5-12,5]	[5,5-12,8]	[5,5-13 ,0]

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

Tableau 8. Valeurs limites à ne pas dépasser en contenu total pour être candidat à une utilisation en technique routière

Paramètre	Valeur à respecter par au moins 80% des échantillons (mg/kg matière sèche)	Valeur à respecter par 100% des échantillons (mg/kg matière sèche)
COT(*)	3000	6000
BTEX (Benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes)		6
PCB (Polychlorobiphényles, 7 congénères) Congénères n°28, 52, 101, 118, 138, 153 et 183		1
HCT (hydrocarbures totaux, C10 à C40) (*)		500
HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) (*)		50

(*) Pour les usages en assise de chaussée (couche de base ou de fondation) ou en couche de surface (couche de roulement ou de liaison), les valeurs limites associées au carbone organique total (COT), aux hydrocarbures totaux (HCT) et aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) peuvent être adaptées, notamment pour tenir compte de la contribution des liants bitumeux (COT et HCT) ou de la technique de mise en œuvre (HAP). Toute modification de valeur limite devra être validée par le ministère en charge du développement durable, notamment dans le cadre de l'élaboration d'un guide d'application.

Tableau 9. Valeurs limites en percolation permettant de justifier l'utilisation d'un matériau alternatif en sous couche de chaussée ou d'accotement revêtus et en remblai technique ou accotement

	Scénario « sous couche de chaussée ou d'accotement revêtus »	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)	Valeur (mg/kg de matière sèche)
As	0,8	0,5
Ba	56	28
Cd	0,32	0,16
Cr Total	4	2
Cu	50	50
Hg	0,08	0,04
Mo	5,6	2,8
Ni	1,6	0,8
Pb	0,8	0,5
Sb	0,4	0,2
Se	0,5	0,4
Zn	50	50
Fluorure	60	30
Chlorure	10000	5000
Sulfate	10000	5000
pH	[5,5-12,5] à respecter par au moins 5/7 des percolats [5,5-12,8] à respecter par au moins 6/7 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		Percolation	Lixiviation		Percolation
	(NF EN 12457-1)		(NF CEN/TS 14405)	(NF EN 12457-1)		(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. L'étape de stockage peut permettre de réaliser ces modifications.

Une teneur en eau importante, telle que celle rencontrée dans un sédiment, présente un inconvénient majeur pour une valorisation en technique routière. 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.

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, l'étude d'impact est obligatoire au titre de la législation ICPE. Le contenu de l'étude 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	2517
	Non pulvérulent	2515
	Broyage, concassage	2515
	Criblage, tamisage, etc.	2515
	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 Etude de l'impact de l'ouvrage à base de sédiment

La gestion à terre des produits de dragage peut être à l'origine de dispersion des 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.

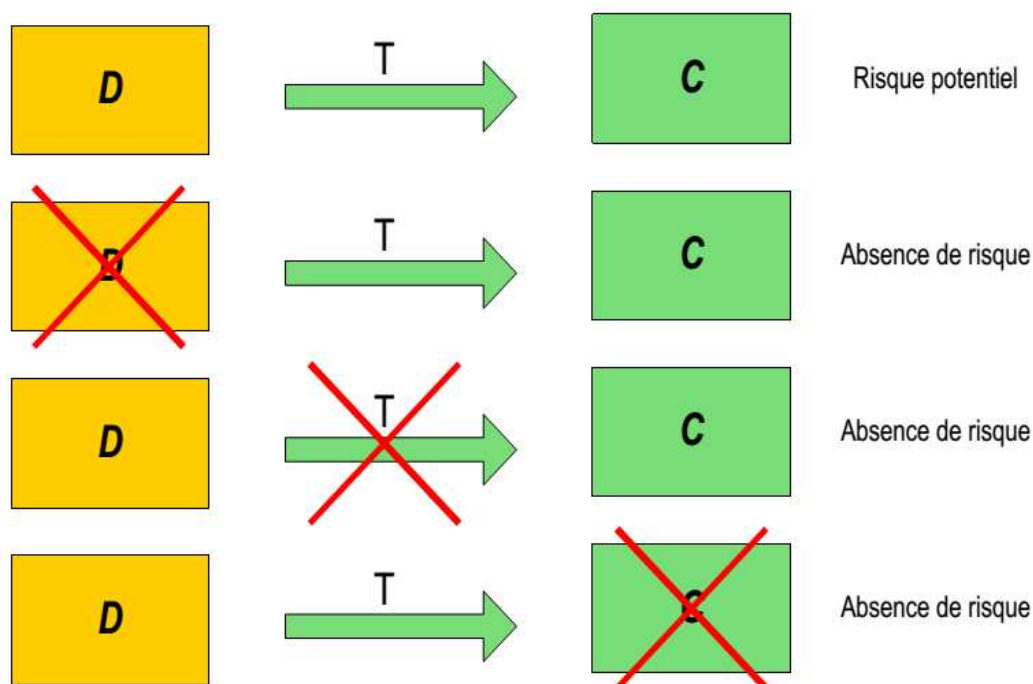


Figure 10. Principe de base de l'évaluation des risques

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 physico-chimiques plus poussés, amélioration de la connaissance du comportement de la cible, etc.)

Cette approche itérative peut être résumée par le logigramme suivant.

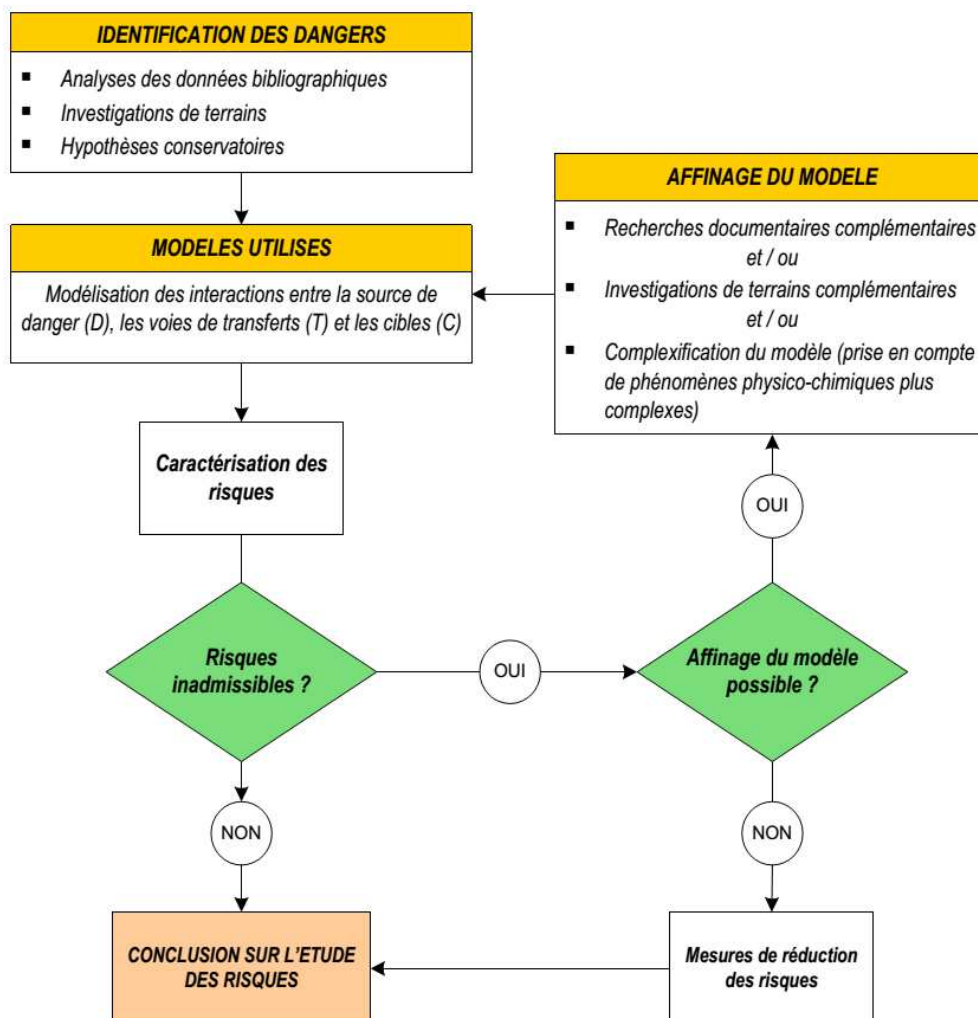


Figure 11. Démarche itérative de l'évaluation des risques

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.

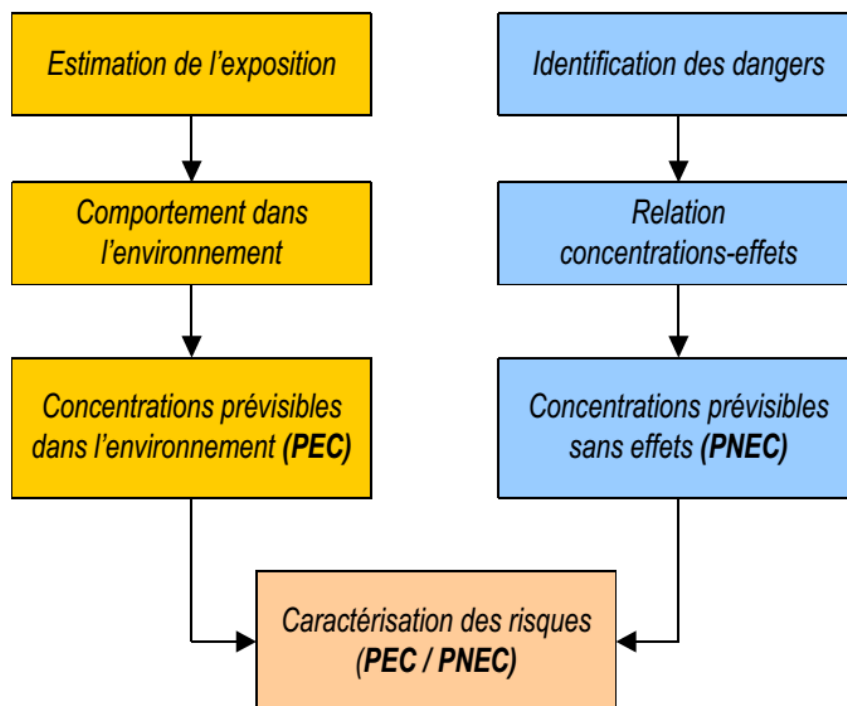


Figure 12. Schéma de l'évaluation du risque chimique dans l'environnement (Marchand et Tissier, 2005)

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.

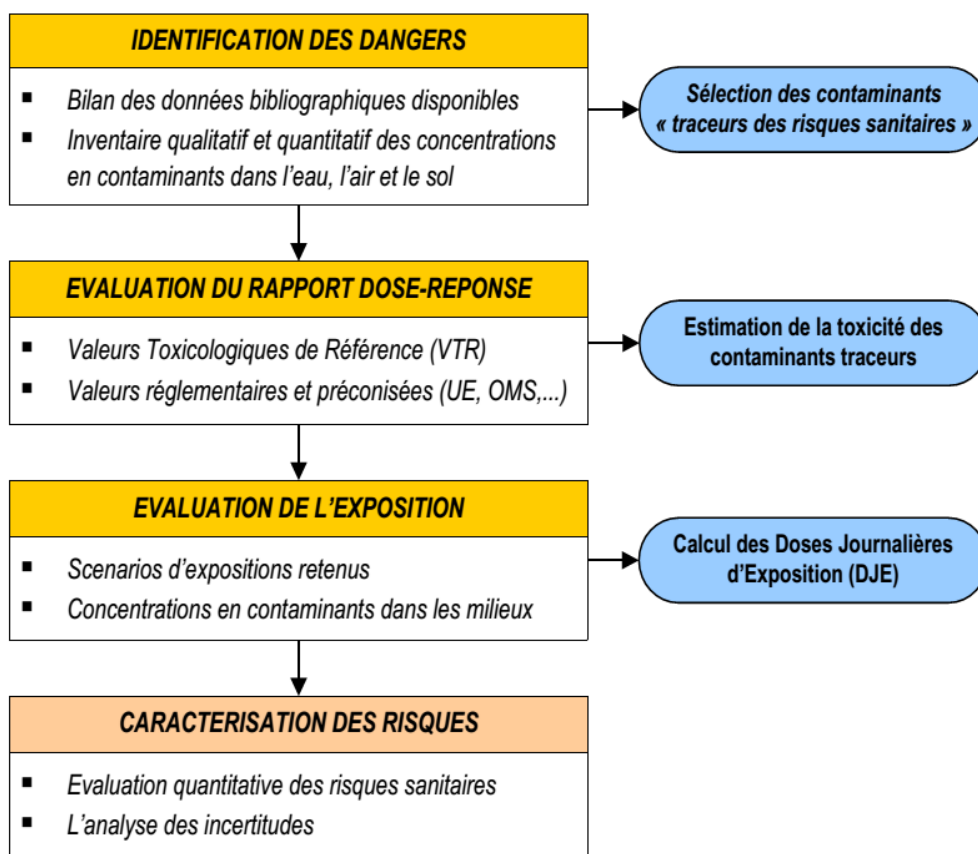


Figure 13. Etapes de l'évaluation des risques sanitaires

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 met 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 de la route du Freycinet 12 dans le périmètre du Grand Port Maritime de Dunkerque.

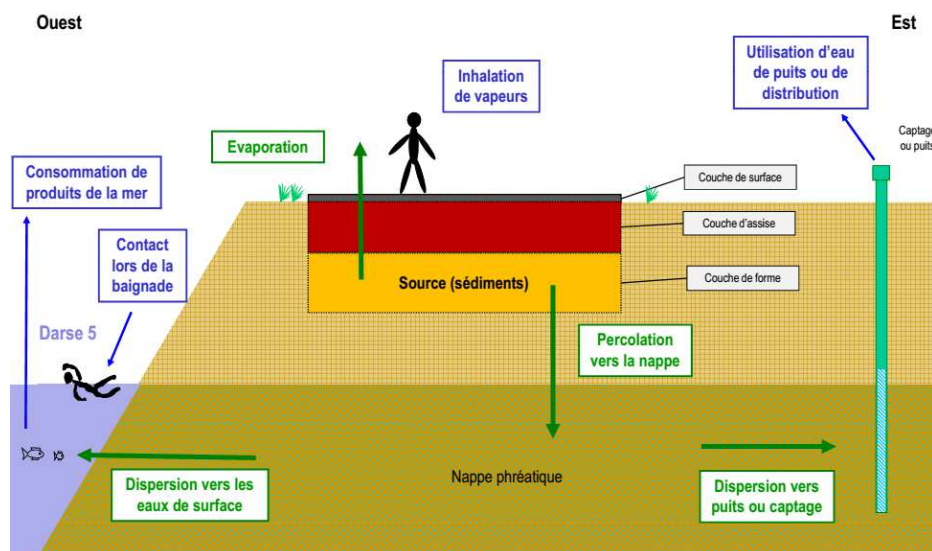


Figure 14. Schéma conceptuel de l'évaluation des risques environnementaux et sanitaires d'un ouvrage routier à base de sédiment

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 routier

Composition du matériau routier

Le but de l'étude de formulation consiste à examiner la possibilité de remplacer une fraction de sable utilisée dans les matériaux routiers par des sédiments de dragage. En raison de sa disponibilité dans le port, l'utilisation du sable

de dragage dans la formulation des matériaux routiers à base de sédiment fin présente une solution économique intéressante pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques des matériaux dragués. Le mélange composé de sédiment et de sable de dragage doit ensuite être traité avec de la chaux vive et du liant hydraulique.

Concernant la composition et les pourcentages utilisés dans la formulation des matériaux routiers, il est recommandé de s'appuyer sur les travaux de thèse réalisés ces dernières années à l'école des Mines de Douai (Dubois, 2006; Tran, 2008; Achour, 2013). Dans le cas d'une utilisation en sous-couches routières, les proportions utilisées sont généralement 1/3 de sédiment fin et 2/3 de sable de dragage. La quantité de liant hydraulique est fixée à 6%, ce qui est typiquement utilisée pour un traitement en construction routière et la proportion de chaux à ajouter est déterminée par le test de fixation limite (Tremblay, 1998).

Correcteurs granulaires

Le choix des correcteurs granulaires doit satisfaire des contraintes économiques, techniques et environnementales. Les travaux de Dubois (2006) ont permis de montrer que les mélanges associant entre autres du sable et des sédiments fins de dragage répondent aux exigences mécaniques nécessaires pour une utilisation en sous-couches routières. La méthodologie proposée pour le choix et l'ajout du correcteur granulaire est principalement basée sur les paramètres suivants:

- La limitation de la proportion de la fraction fine dans les mélanges.
- La limitation de la quantité de matières organiques.
- L'optimisation de la quantité de sédiments fins.
- L'optimisation de la distribution granulométrique.

L'optimisation de la distribution granulométrique est une étape particulièrement importante dans la constitution du squelette granulaire du matériau routier. Une courbe granulométrique peut être caractérisée par le calcul des coefficients d'uniformité (C_u) et de courbure (C_c). Le coefficient C_u permet de savoir si la granulométrie est serrée ($C_u < 2$) ou étalée ($C_u > 2$).

Le coefficient C_c vient en complément de C_u et permet de déterminer si la granulométrie est bien graduée ($1 < C_c < 3$) ou mal graduée ($C_c < 1$ ou $C_c > 3$). Ces coefficients peuvent être calculés à l'aide de valeurs caractéristiques d'ouverture du tamis laissant passer x % du poids des grains (D_{10} , D_{30} , D_{60}) (Achour, 2013)

La figure 15 présente des exemples de courbes de distribution granulométrique de constituants potentiels d'un matériau routier (30% de sédiments fins, 70% de sable de dragage, 6% de liant hydraulique et 1% de chaux). Avec des coefficients C_c et C_u respectifs de 1,8 et 6 la distribution granulométrique du mélange respecte bien les critères d'uniformité et de courbure.

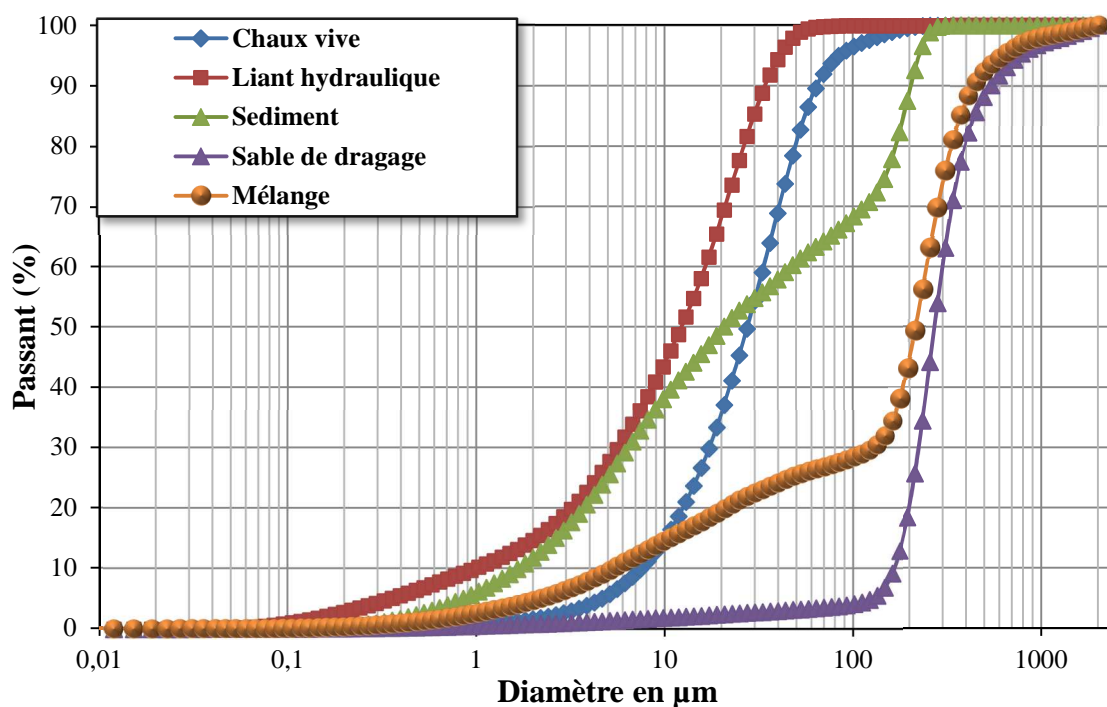


Figure 15. Distribution granulométrique des constituants d'un matériau routier

En termes d'impacts sur l'environnement, l'innocuité des sables utilisés doit être vérifiée au travers d'essais de lixiviation et/ou de percolation (cf. paragraphe 6.2.3). Les résultats des essais sont comparés aux seuils de lixiviation du guide méthodologique SETRA (2011) pour l'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière.

Liants hydrauliques

Le liant hydraulique est un constituant important dans le traitement des matériaux pour une utilisation en technique routière. Sa capacité à agglomérer les granulats confère au matériau une cohésion permanente dont l'importance dépend de la nature du matériau traité, du type de liant, de la quantité introduite, de la compacité atteinte lors de la mise en œuvre, de la température du milieu et enfin de l'âge du mélange.

La technique de traitement des sédiments au liant hydraulique est particulièrement adaptée pour l'élaboration d'un matériau routier, cette technique consiste à valoriser les sédiments portuaires en place en incorporant le liant et en mélangeant, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène. Le liant hydraulique est un mélange comportant des proportions variables d'éléments hydrauliques comme le clinker, les laitiers de haut fourneau, des éléments pouzzolaniques et des fillers calcaires.

La Chaux

La chaux vive est généralement utilisée dans les traitements de stabilisation, mais peut aussi être utilisée comme additif aux liants hydrauliques. Dans le cadre du traitement des sédiments fins, l'intérêt de la chaux consiste à diminuer la teneur en eau des produits traités mais aussi à produire de l'hydroxyde de chaux permettant l'activation des pouzzolanes éventuellement ajoutées ou pouvant être présentes dans le matériau à traiter. La teneur en chaux est déterminée par le test de fixation limite, l'essai consiste à déterminer le pH d'une suspension de sédiment, à un rapport liquide/solide (L/S) de 5 en présence d'un pourcentage croissant de chaux vive jusqu'à pH constant.

Par exemple, dans le cas des sédiments portuaires un ajout de chaux à hauteur de 1 % permet d'obtenir un pH constant (Figure 16).

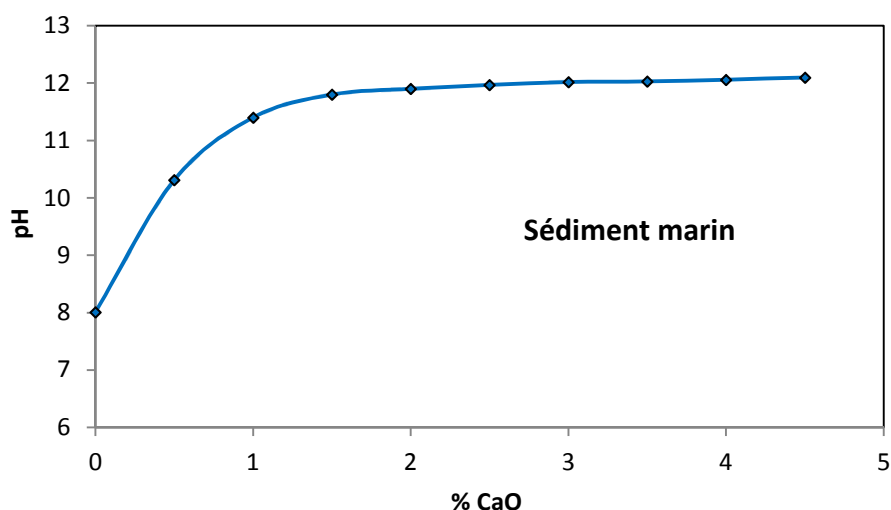


Figure 16. Evolution du pH en fonction de l'ajout de chaux

6.2.2 Performances mécaniques

Portance immédiate

Dans le cas d'une utilisation en couche de forme, les essais de poinçonnement sont conduits sur éprouvettes compactées avec l'énergie Proctor Normal et à la teneur en eau maximale prévisible. Lors d'une utilisation en assise de chaussée, la portance à obtenir à la mise en œuvre ne doit en aucun cas être inférieure à 20 IPI (indice portant immédiat), de manière à garantir une mise en œuvre sans déformation de la couche. Les valeurs minimales d'IPI à obtenir pour chaque type de matériau sont précisées dans le tableau 13.

Pour les couches d'assise de chaussée, les essais de poinçonnement sont conduits sur éprouvettes à la teneur en eau de la formule d'étude et compactées avec l'énergie Proctor modifié.

Tableau 13. Indice portant immédiat (IPI) minimum à obtenir à la mise en œuvre de sous-couches routières (SETRA-LCPC, 2000)

Type d'utilisation	Couche de forme			Assise de chaussée	
Classes de sols	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁ - A ₂	B sableux
	C ₁ A ₁	C ₁ A ₂	C ₁ A ₃		
	B ₅	B ₆			
	C ₁ B ₅	C ₁ B ₆			
IPI minimum	20	15	10	20	30

Performance mécanique à court terme

Les performances mécaniques à court terme des matériaux routiers à base de sédiments doivent être évaluées selon les critères définis dans le guide SETRA-LCPC (2000). Les différents essais ainsi que les seuils de décision

nécessaires à l'évaluation des performances mécaniques des sous-couches routières sont indiqués dans le tableau 14.

Tableau 14. Comportement mécanique des matériaux utilisés en sous-couches routières

		Utilisation en couche de forme		Utilisation en couche d'assise	
Comportement du matériau routier	Indicateur	Seuils de décision		Indicateur	Seuils de décision
Age autorisant la circulation sur la couche traitée	Résistance en compression simple (Rc) à différents âges	$R_c \geq 1 \text{ MPa}$		Résistance en compression simple (Rc)	$R_c \geq 1,0 \text{ MPa (A*)}$ $R_c \geq 1,2 \text{ MPa (B*)}$ $R_c \geq 1,5 \text{ MPa (C*)}$
Tenue à l'immersion au jeune âge	Rci après 28 jours de cure normale à 20°C	$R_{ci}/R_{c60} \geq 0,80$ avec un sol de VBs $\leq 0,5$		Rci après 28 jours de cure normale à 20°C	$R_{ci}/R_{c60} \geq 0,80$ avec un sol de VBs $\leq 0,5$
	Rci 32 jours d'immersion totale dans de l'eau à 20°C	$R_{ci}/R_{c60} \geq 0,60$ avec un sol de VBs $\geq 0,5$		Rci 32 jours d'immersion totale dans de l'eau à 20°C	$R_{ci}/R_{c60} \geq 0,70$ avec un sol de VBs $> 0,5$
	Rc60 après 60 jours de cure normale à 20°C			Rc60 après 60 jours de cure normale à 20°C	
Tenue au gel au jeune âge	Résistance en traction directe Rt ou indirecte Rti.	$R_t \geq 0,20 \text{ MPa}$ ou $R_{ti} \geq 0,25 \text{ MPa}$		Résistance en traction directe Rt ou indirecte Rti.	$R_t \geq 0,20 \text{ MPa}$ ou $R_{ti} \geq 0,25 \text{ MPa}$

*Les lettres définissent les niveaux d'agressivité du trafic sur chantier (SETRA-LCPC, 2000)

Performance mécanique à long terme

En complément des valeurs d'IPI exigées, pour être utilisés en sous-couches routières, les matériaux étudiés doivent présenter de bonnes performances mécaniques à long terme pour assurer un bon fonctionnement de la chaussée sous trafic. Cette propriété est évaluée à travers les essais d'écrasement des éprouvettes cylindriques en compression simple et en compression diamétrale. Les caractéristiques mécaniques sont mesurées à 28 et 90 jours avec les ciments et liants hydrauliques routiers (LHR) « à durcissement rapide », à 180 jours avec les LHR « à durcissement normal ». Le couple E-Rt, mesuré à 90 ou 180 jours, est la base de la définition de la classe mécanique du matériau traité. Il permet de le situer dans l'abaque de la figure 17 et de déterminer la classe mécanique du matériau à l'aide du tableau 15. Par exemple, pour une couche de forme, il faut obtenir au moins une classe mécanique de 5.

Tableau 15. Détermination de la classe mécanique d'un sol traité en fonction de ses caractéristiques mécaniques et de son mode de préparation

Traitement en centrale	Traitement en place	Classe mécanique
Zone 1	-	1
Zone 2	Zone 1	2
Zone 3	Zone 2	3
Zone 4	Zone 3	4
Zone 5	Zones 4 et 5	5

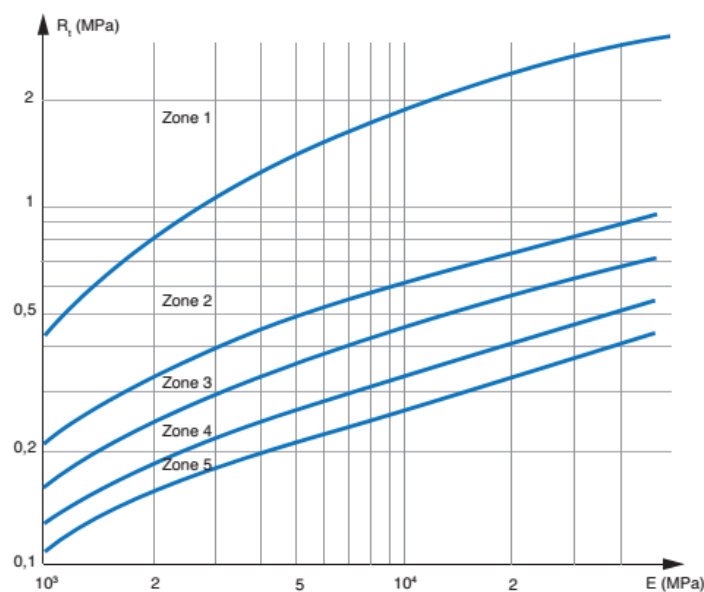


Figure 17. Abaque de classification des matériaux de sous-couches routières aux liants hydrauliques (SETRA-LCPC, 2000)

6.2.3 Acceptabilité environnementale

A ce stade de l'étude, la caractérisation environnementale concerne le matériau routier et les constituants additionnels entrant dans la formulation de ce dernier (par exemple, l'utilisation d'un correcteur granulométrique). Ces matériaux doivent être caractérisés selon leur comportement à la lixiviation et/ou percolation, et selon leur teneur intrinsèque en éléments polluants. Le guide SETRA (2011) propose 3 niveaux différents d'investigation (Figure 18) :

Niveau 1 : Caractérisation basée sur des essais de lixiviation d'après la norme NF EN 12457-2 et d'analyse en contenu total avec une étude de variabilité. La comparaison des concentrations mesurées aux seuils de lixiviation définis dans le guide SETRA permet de juger de la qualité environnementale des matériaux.

Niveau 2 : Caractérisation basée sur des essais de percolation (norme NF CEN/TS 14405) et de lixiviation (norme NF EN 12457-2). La conformité des essais de percolation est évaluée à l'aide des seuils de lixiviation disponibles dans le guide SETRA.

Niveau 3 : Ce niveau de caractérisation est généralement utilisé si le matériau routier présente des seuils de lixiviation non conformes lors de la réalisation des essais de lixiviation et de percolation.

Ce niveau est généralement basé sur une étude spécifique permettant de caractériser l'altération du matériau et l'émission des polluants dans les sols et les eaux souterraines (norme méthodologique NF EN 12920+A1). Pour cette dernière étape les recommandations portent sur la conception et le suivi de plots expérimentaux ou de lysimètres avec collecte des percolats.

En outre, le guide précise que toute fraction non dangereuse issue d'une opération de traitement de déchets dangereux - à l'exclusion de toute opération de stabilisation - est considérée comme un déchet non-dangereux. Il

est interdit de procéder à une opération de stabilisation, une dilution ou à un mélange de déchets dans le seul but de satisfaire aux critères d'acceptabilité définis dans le guide SETRA (2011). Les gisements de sédiments de dragage qui peuvent être valorisés au sein d'ouvrages routiers sont ceux utilisés dans l'élaboration de graves de sédiments dont les caractéristiques mécaniques sont conformes aux normes de spécifications d'usage en vigueur concernant les usages routiers visés et dont les caractéristiques environnementales respectent les critères d'acceptabilité définis dans le guide.

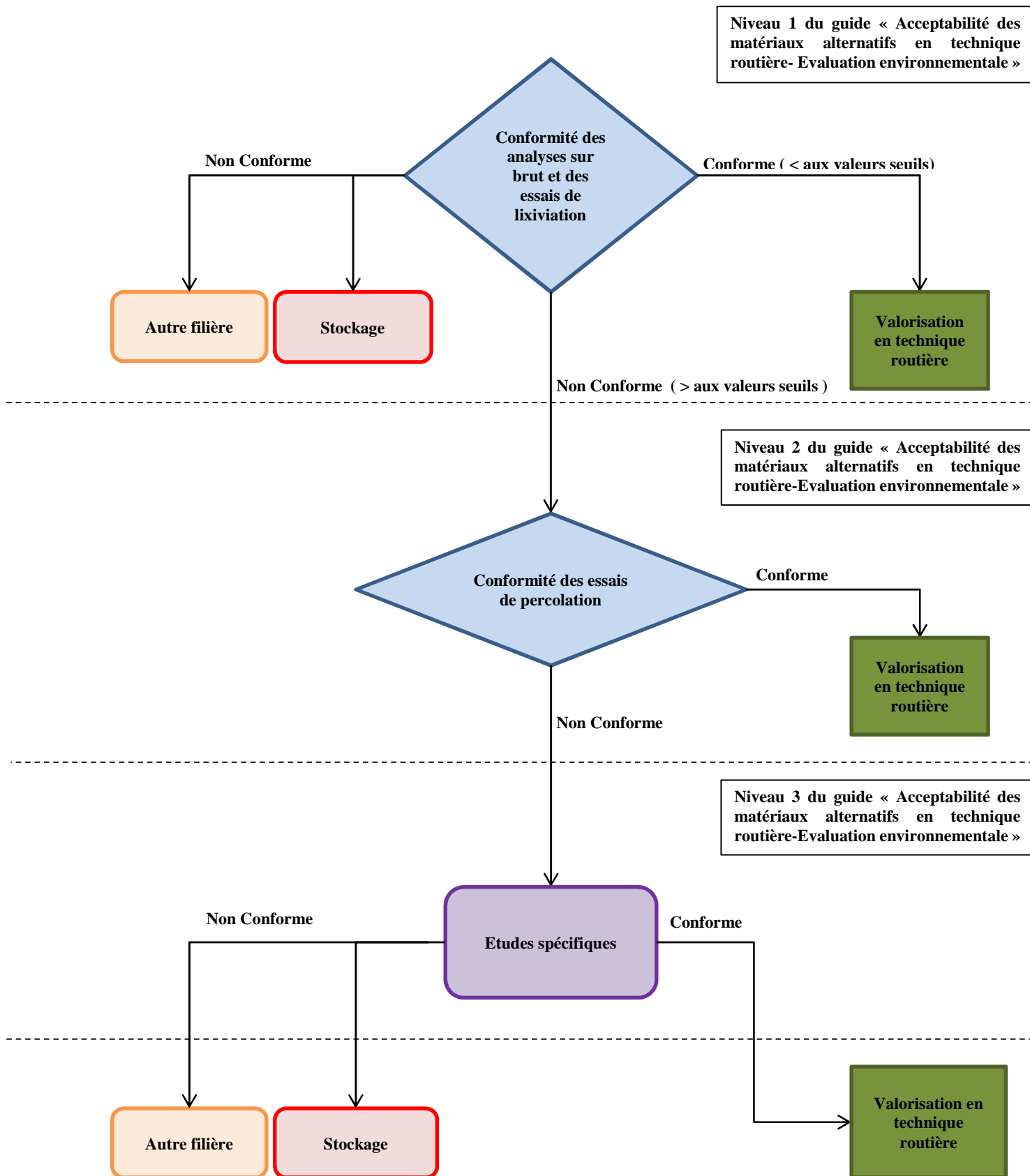


Figure 18. Procédure de caractérisation environnementale des matériaux alternatifs et routiers d'après le guide « Acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière- Evaluation environnementale »

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 routier à base de sédiment (Figure 19).

Une planche d'essai est un ouvrage de taille réduite (1 à 2 m²) au sein duquel le matériau routier est mis en œuvre dans des conditions représentatives de l'usage routier étudié (épaisseur de la couche étudiée, 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 surface de la couche étudiée doit présenter une pente de 2,5%. L'épaisseur et la perméabilité de la couche étudiée doit être choisie de manière à reproduire la structure de l'ouvrage la plus défavorable pour l'étude du comportement à la lixiviation du matériau routier testé.

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



Figure 19. Planche expérimentale

6.3.2 Suivi mécanique et environnemental

Le suivi de la planche expérimentale consiste à prélever des échantillons d'eau et des carottes de matériau routier afin de suivre respectivement les émissions de polluants et les performances mécaniques du matériau routier 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 formulations élaborées en laboratoire.

Le suivi environnemental de la planche expérimentale devra être réalisé selon les recommandations du guide de conception et de suivi des plots expérimentaux et d'essais lysimétriques de l'ADEME (2010). 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, ...), éléments traces (As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn), et polluants organiques. L'évaluation du comportement mécanique, sur les échantillons carottés en cours ou en fin d'expérience, est réalisée à l'aide d'essais de compression simple, de traction et le module d'élasticité. La résistance à la compression du matériau routier est évaluée selon la norme NF EN 13286-41. Quant à la résistance à la traction, elle est déterminée suivant la norme NF EN 13286-42. Sur la base des résultats obtenus au niveau de la résistance à la traction et du module d'élasticité, la classe mécanique du matériau routier est déterminée selon la norme NF EN 13286-4.

7. Phase 3 : Etude de terrain

Une fois les formulations établies à l'échelle du laboratoire, des applications sur le terrain sont réalisées, au travers de pilotes ou de plots expérimentaux. En technique routière, la surface d'un ouvrage est de quelques mètres carrés à plusieurs milliers de mètres carrés. 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 avec les prévisions réalisées à partir des essais de lixiviation. 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, le matériau peut ainsi être mis sur le marché, 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 routier 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 mécanique et environnemental de la structure de l'ouvrage et de valider les études de laboratoire correspondantes. Il est recommandé de réaliser un suivi de l'ouvrage sur une durée minimale de 12 mois afin de tenir compte des variations climatiques (ADEME, 2010).

7.1.1 Caractéristiques techniques de la chaussée

Les travaux menés par l'école des Mines de Douai sur les sédiments non immergeables du Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD) ont permis de développer une formulation adaptée pour la valorisation des sédiments portuaires en sous-couches routières (Achour, 2013). Sur la base des résultats obtenus en laboratoire, un ouvrage routier expérimental a été réalisé au GPMD afin de valider la faisabilité technique de la valorisation envisagée. La construction du plot expérimental a été réalisée suivant les recommandations du guide ADEME (2010) et les hypothèses de conception de la structure routière ont été sélectionnées en fonction du trafic envisagé (Classe de plateforme : PF2 ; Trafic : 100 Pl/ par jour ; Durée : 15 années).

La structure de chaussée a donc été dimensionnée en conséquence et comporte :

- une couche de roulement de 5 cm d'épaisseur ;
- une couche de base de 6 cm d'épaisseur ;
- une couche de fondation à base de sédiment marin traité de 30 cm d'épaisseur ;
- un sol naturel constituant la PST.

7.1.2 Etapes de réalisation de la chaussée expérimentale

Lors de la mise en œuvre de la structure, une couche de sable de dragage de 20 cm d'épaisseur a d'abord été placée sur la plate-forme puis stabilisée avec une niveleuse. Une deuxième couche de sédiments fins de 10 cm d'épaisseur a ensuite été étalée. L'homogénéisation des deux matériaux a été réalisée à l'aide d'un malaxeur épandeur. Le jour suivant, la chaux a été étendue à une proportion de 1% ($\approx 6 \text{ kg/m}^2$). A ce stade, la couche de fondation est composée de sable de dragage, de sédiment marin non immergeable et de chaux vive. Après une période de cure de 24 h, l'étape d'épandage du liant hydraulique routier a été réalisée avec une teneur de 6% ($\approx 36 \text{ kg/m}^2$) avant l'homogénéisation des différents matériaux.

Lors de l'étape finale de la conception, le mélange (sédiment marin, sable de dragage, chaux vive et liant hydraulique) a été compacté au vibro-compacteur (vibrant classe dynamique V4). La teneur en eau étant un paramètre essentiel pendant le processus de compactage, elle a été mesurée à l'aide d'un gamma-densimètre. La teneur en eau moyenne enregistrée est d'environ 10,4% et la densité sèche de $1,98 \text{ t/m}^3$. Suite au compactage de la couche de fondation, une période de repos de 7 jours a été imposée. Ensuite, une campagne de mesure de déflexion de la couche de fondation a été réalisée. Enfin, la couche de base de 5 cm d'épaisseur a été placée au sommet de la couche de fondation, suivie par une couche de roulement de 5 cm d'épaisseur (conforme à la norme NF P 98 150-1). Les étapes de construction de la chaussée expérimentale sont illustrées dans la Figure 20.

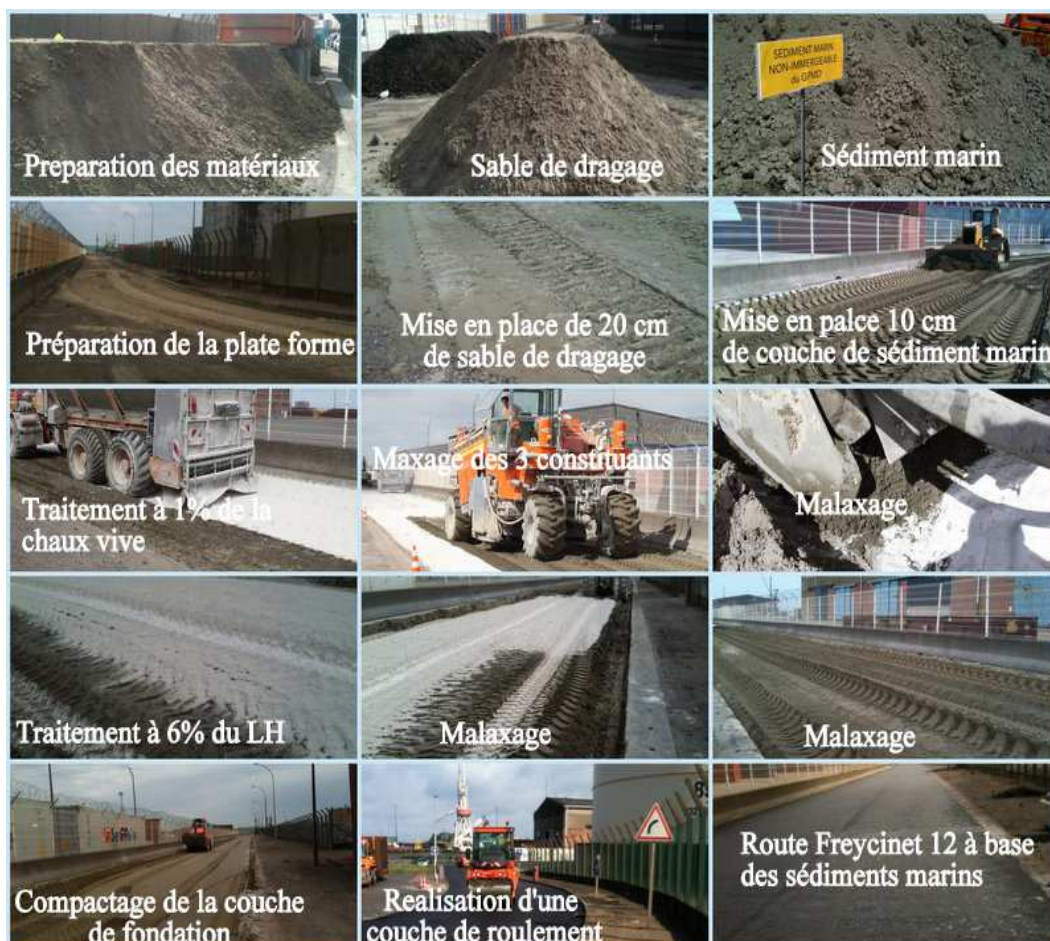


Figure 20. Etapes de réalisation de l'ouvrage expérimental à base de sédiments portuaires

7.2 Suivi mécanique et environnemental

7.2.1 Suivi *in situ* des caractéristiques mécaniques

L'étude de la portance de la structure routière à base de sédiment doit être réalisée *in situ* en effectuant des mesures de déflexion. La campagne de mesure de déflexion doit être réalisée à différents âges de la chaussée (par exemple, 7, 60 et 360 jours). Sur le terrain, l'évaluation de la déflexion se fait à l'aide de la mesure ponctuelle de la déformation verticale de l'ouvrage sous la charge d'un essieu de véhicule de 13 tonnes, suivi par un système balancier tel que la poutre de BENKELMAN. Les résultats de l'étude de déflexion sont ensuite comparés aux essais mécaniques réalisés sur les carottes de chaussée et aux résultats de l'étude de formulation. L'expertise des données permettra d'apprécier les performances mécaniques de l'ouvrage et la faisabilité technique de la valorisation du sédiment marin en technique routière.

7.2.2 Suivi environnemental du plot

L'instrumentation d'un prototype d'ouvrage doit être réalisée selon les recommandations du guide de conception et de suivi des plots expérimentaux et d'essais lysimétriques de l'ADEME (2010). Ce guide précise notamment les dispositifs à mettre en place lors du suivi environnemental des plots expérimentaux.

Suivi des eaux de percolation

Les polluants présents dans les sédiments de dragage sont susceptibles d'être mobilisés après des événements pluvieux et peuvent représenter une source potentielle de contamination pour les eaux souterraines. Il est donc nécessaire de suivre la qualité des eaux de percolation afin de caractériser l'impact environnemental de l'ouvrage sur l'environnement local.

Conformément au guide de l'ADEME (2010), le plot expérimental comporte une installation de géo-membrane, un système de drainage et d'un bac spécifique pour la récupération des eaux de percolation (figure 21). L'objectif de ce dispositif est de récupérer les eaux de percolation lors des épisodes pluvieux afin de réaliser un suivi mensuel des concentrations en contaminants dissous (figure 22). Le suivi du plot expérimental doit être programmé pour une durée minimale d'une année afin de prendre en compte l'effet des variations saisonnières sur le transfert des polluants.



Figure 21. Etapes de réalisation d'un plot expérimental



Figure 22. Prélèvements d'eau de percolation au niveau du plot expérimental (Achour, 2013). (1) et (2) Prélèvement de l'échantillon, (3) et (4) Conditionnement.

Suivi de la qualité des eaux du milieu récepteur

La mise en place d'un piézomètre à proximité de l'ouvrage permet de suivre la qualité des eaux souterraines et de détecter les contaminations liées à l'implantation de l'ouvrage. Il est recommandé de suivre la qualité des eaux du milieu récepteur sur une durée minimale de 12 mois. Les échantillons d'eau sont généralement prélevés à l'aide d'une pompe à soupape et conditionnés sur le terrain en vue des analyses chimiques en laboratoire (Figure 23).

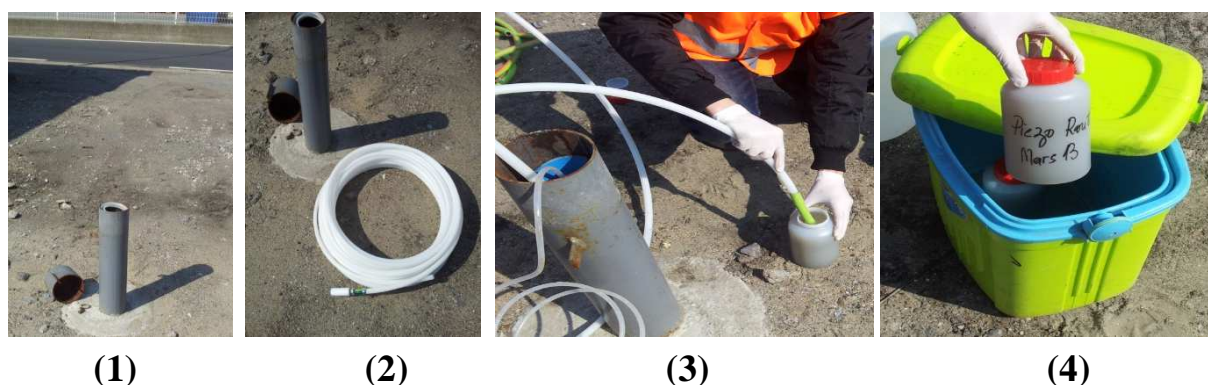


Figure 23. Prélèvements d'eau au niveau du piézomètre. (1) Piézomètre, (2) Pompe à soupape, (3) Dispositif de prélèvement, (4) Conditionnement des échantillons

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)

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.

7.2.3 Essais spécifiques après carottages

Les carottages sont des essais destructifs très riches en information sur l'état des couches d'une chaussée. Cette technique de prélèvement consiste à découper et à extraire d'une chaussée un échantillon solide cylindrique. L'observation visuelle d'une carotte permet de connaître l'état et la nature du matériau routier. Dans le cadre du suivi mécanique et environnemental du plot il est recommandé de réaliser deux campagnes de carottage à 60 et 360 jours afin de caractériser le comportement du matériau routier.

Suivi environnemental à 60 et 360 jours

Dans le cadre du suivi environnemental, des campagnes de carottage de la sous-couche routière sont recommandées à 60 et 360 jours après la réalisation de l'ouvrage. Des essais de lixiviation doivent être réalisés sur les carottes selon la norme NF EN 12457-2 (sur matériau broyé). Pour un prélèvement donné, trois essais sont généralement effectués dans le but d'évaluer la variabilité des résultats. Les polluants recherchés sont similaires à ceux visés par le guide d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière (SETRA, 2011). Les analyses recommandées (éléments traces, chlorures, sulfates) portent sur la fraction extraite des carottes prélevées à 60 et 360 jours, et sont exprimées en mg/kg de déchet stabilisé sec.

Etude de comportement mécanique à 60 et 360 jours

L'évaluation du comportement mécanique est déterminée par les essais de compression simple, de traction et le module d'élasticité. La résistance à la compression du matériau prélevé de la sous-couche routière à 60 jours et 360 jours est évaluée selon la norme NF EN 13286-41. Quant à la résistance à la traction, elle est déterminée suivant la norme NF EN 13286-42. Sur la base des résultats obtenus au niveau de la résistance à la traction et du module d'élasticité, la classe mécanique du matériau routier est déterminée selon la norme NF EN 13286-4.

8. Synoptique de la méthodologie SEDIMATERIAUX

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

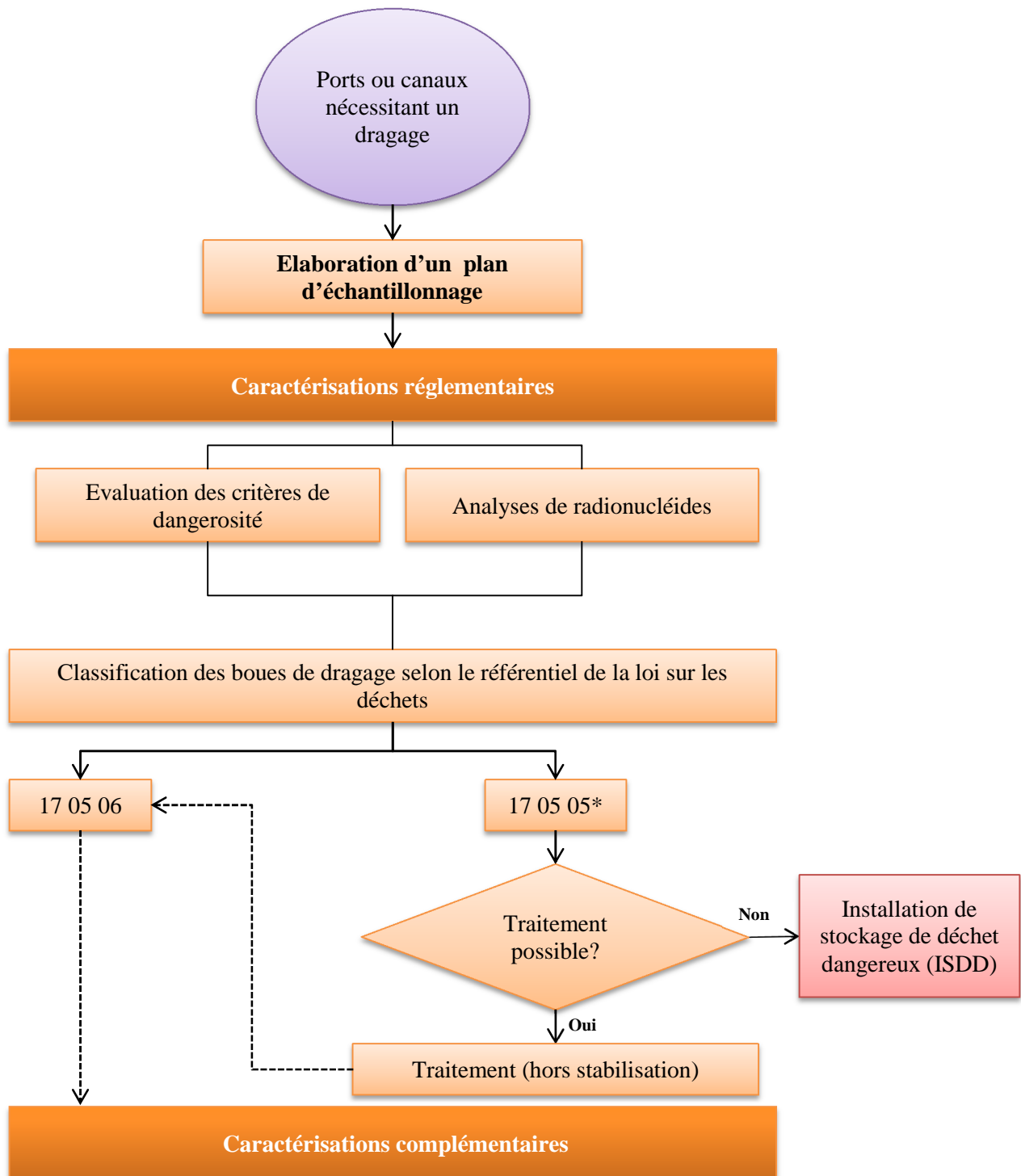
PHASE 1) CARACTERISATION

PHASE 2) ETUDE EN LABORATOIRE

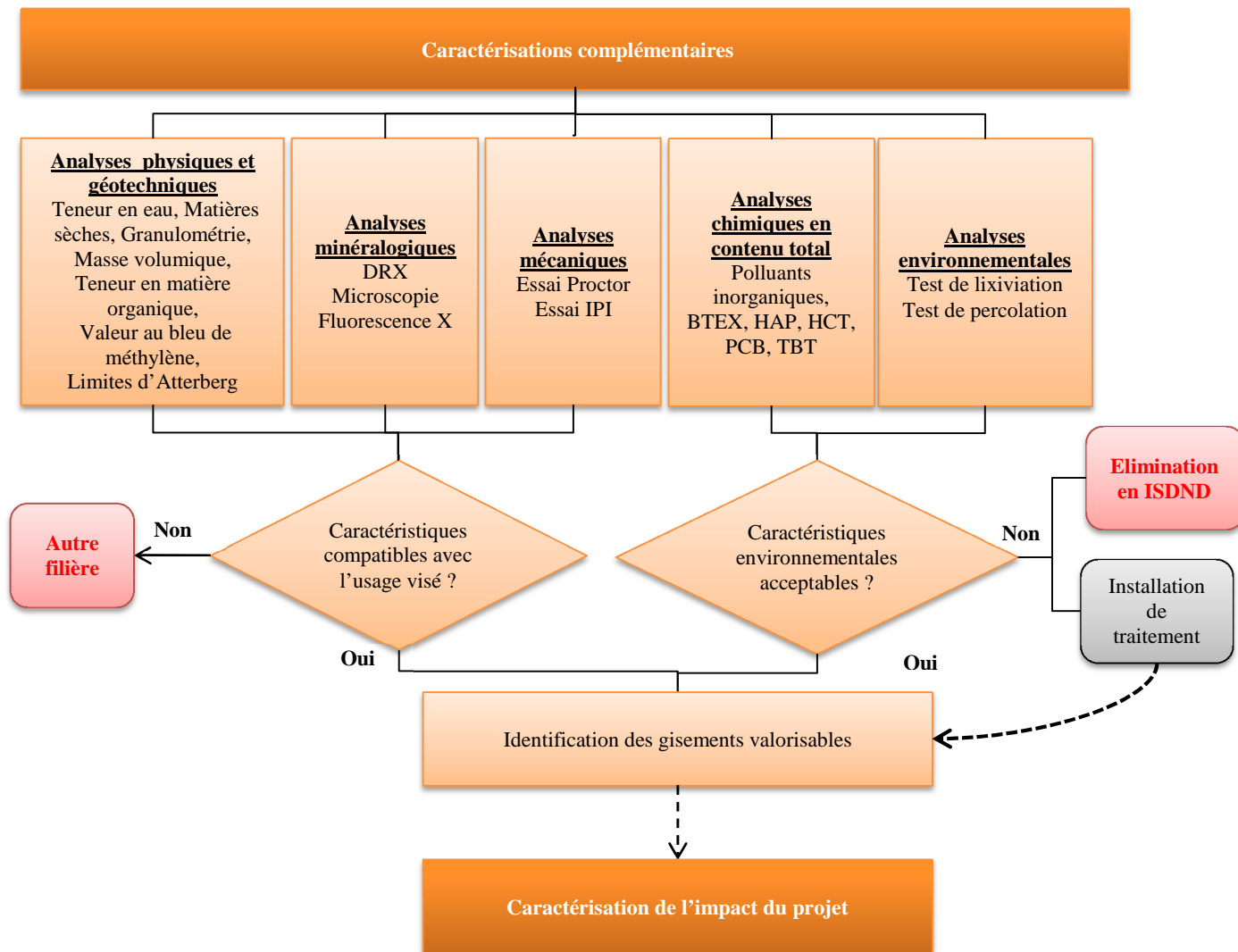
PHASE 3) ETUDE SUR LE TERRAIN

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

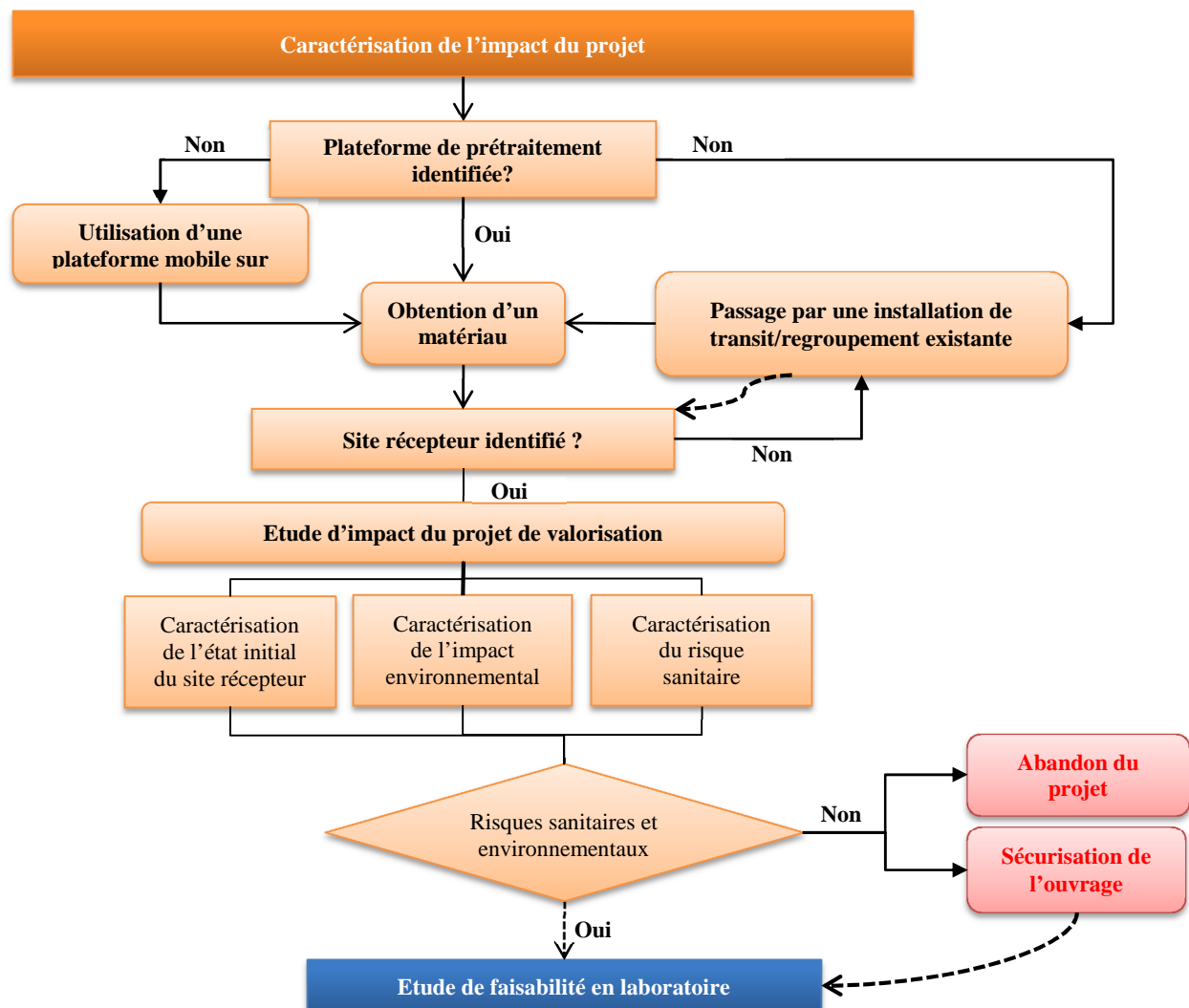
PHASE 1A : Caractérisations réglementaires



PHASE 1B : Caractérisations complémentaires

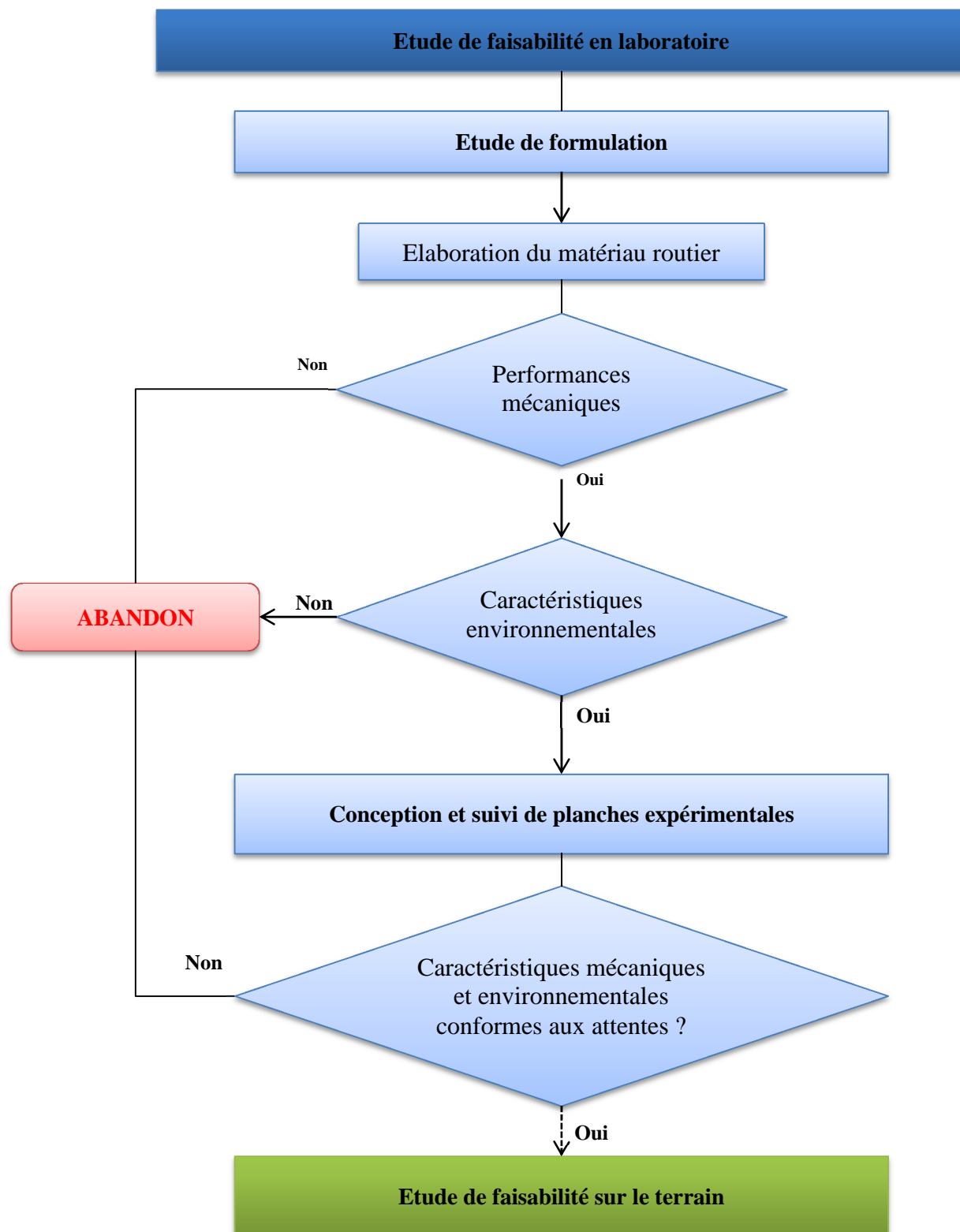


PHASE 1C : Caractérisation de l'impact du projet

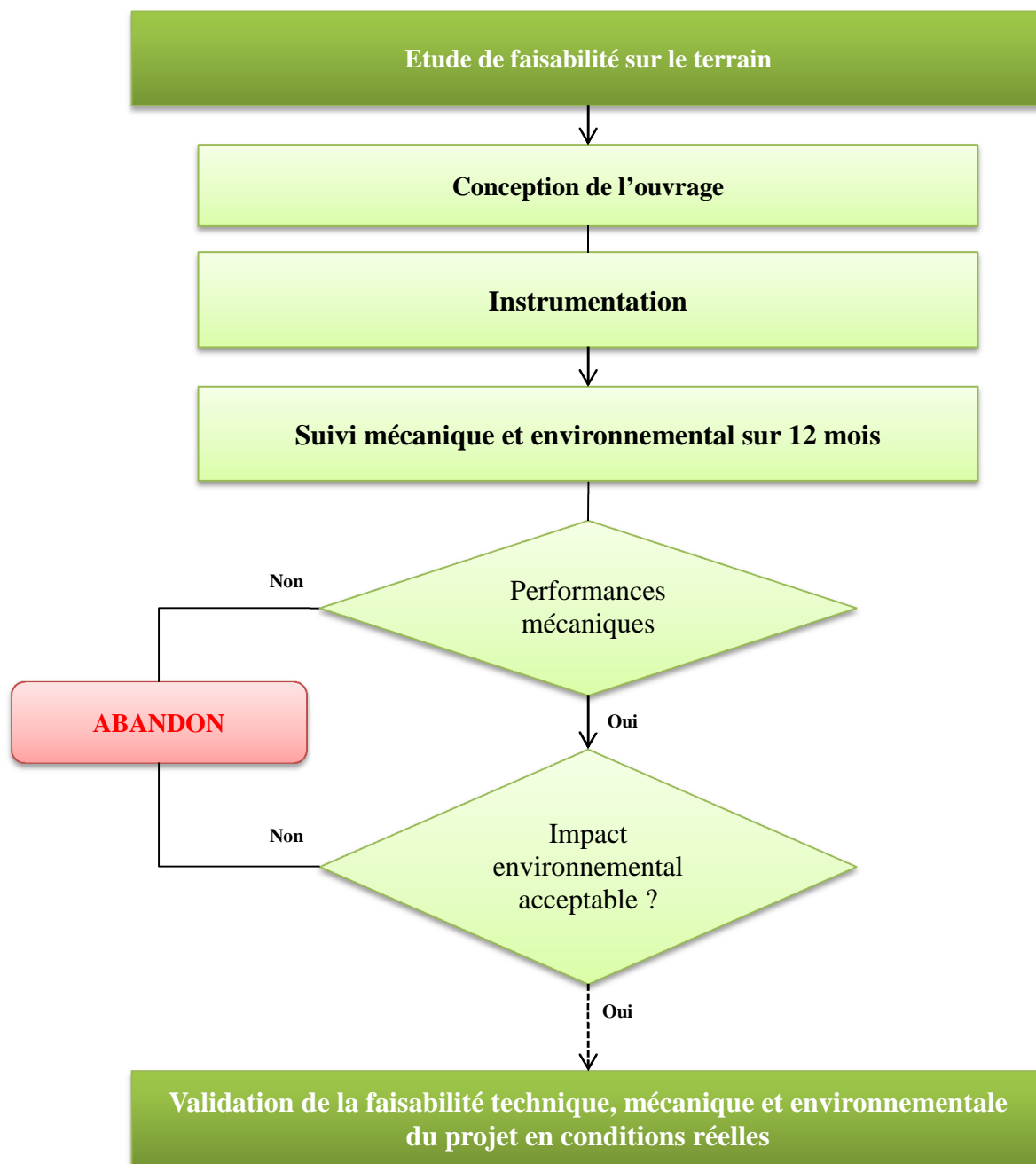


PHASES 2 et 3 : Phases d'études en laboratoire (PHASE 2) et sur le terrain (PHASE 3) permettant de valider la faisabilité technique, mécanique et environnementale du projet.

PHASE 2 : Etude de faisabilité en laboratoire



PHASE 3 : Etude de faisabilité sur le terrain



9. Acronymes

Organismes

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

CD2E : Création et Développement des Eco-Entreprises

CE : Communauté européenne

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

InVS : Institut de veille sanitaire

LCPC : Laboratoire central des ponts et chaussées

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

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

UE : Union Européenne

VNF : Voies navigables de France

Termes techniques

BTEX : Benzène Toluène Ethylène et xylène

CaO : Formule chimique de la chaux

C_c : Coefficient de courbure

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

CE20 : Concentration Efficace où 20% de l'effet maximal est observé

COD : Carbone organique dissous

COT : Carbone organique total

C_u : Coefficient d'uniformité

DCE : Directive cadre sur l'eau

DJE : Doses Journalières d'Exposition

D_{max} : Dimension maximale en millimètre des granulats contenus dans un échantillon

DRX : Diffraction des rayons X

E : module d'élasticité

ERI : Excès de Risque Individuel

FX : Fluorescence X

GTR : Guide des Terrassements Routiers
H14 : Critère de danger relatif à l'écotoxicité d'un déchet
HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
HCT : Hydrocarbures totaux
ICPE : Installations Classées pour la protection de l'environnement
Ip : Indice de plasticité
IPI : Indice portant immédiat
ISDI : Installation de stockage des déchets inertes
ISDND : Installation de stockage des déchets non dangereux
L/S : Rapport Liquide/solide exprimé en L/kg
LHR : Liant hydraulique routier
MPa : Mégapascal
N1/N2 et S1 : Seuils de référence définis pour l'évaluation de la qualité des sédiments (cf. arrêté du 9 août 2006)
NQE : Normes de qualité environnementale
PCB : Polychlorobiphényles
PEC : « Predicted No Effect Concentration » : c'est la plus forte concentration de la substance sans risque pour l'environnement.
PF2 : Classe de plateforme (cf. guide SETRA-LCPC, 2000)
Pl : Poids lourds
PNEC : « Predicted No Effect Concentration » : c'est la plus forte concentration de la substance sans risque pour l'environnement.
PST : Plateforme support de terrassement
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)
Rc : Résistance en compression simple
Rci : Résistance en compression indirecte
Rt : Résistance en traction directe
Rti : Résistance en traction indirecte
SDAGE : Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux
TBT : Tributylétain
TP : travaux publics
UT : Unité Toxique (UT = 100/CE50)
VBs : Valeur au bleu de méthylène
VTR : Valeur Toxicologique de Référence

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

Règlementation

Arrêté du 9 septembre 1997 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 30 mai 2008 fixant les prescriptions générales applicables aux opérations d'entretien de cours d'eau ou canaux soumis à autorisation ou à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-6 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 3.2.1.0 de la nomenclature annexée au tableau de l'article R. 214-1 du code de l'environnement

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

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 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 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

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

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

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

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

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

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

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 tâche.

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 P98-150-1 (2010-06-01) Titre : Enrobés hydrocarbonés - Exécution des assises de chaussées, couches de liaison et couches de roulement - Partie 1 : enrobés hydrocarbonés à chaud - Constituants, formulation, fabrication, transport, mise en œuvre et contrôle sur chantier

NF EN 13286-41 (2003-07-01) Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques

NF EN 13286-42 (2003-09-01) Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 42 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques

NF EN 13286-4 (2003-07-01) Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 4 : méthodes d'essai pour la masse volumique de référence et la teneur en eau en laboratoire - Marteau vibrant

Documents scientifiques et techniques

Achour, R., 2013: « Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiment de dragage ». Thèse de doctorat, Ecole des mines de Douai 185 pages

ADEME, 2010. Guide de conception et de suivi des plots expérimentaux et d'essais lysimétriques, guide technique.

BRGM, 2012. Protocole pour l'évaluation de l'écotoxicité de sédiments destinés à une gestion à terre. BRGM/RP-60835-FR

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.

Dubois, V., 2006 : « caractérisation physico chimiques et environnementale des sédiments marins. Application en technique routière. Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Douai, 291 pages.

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.

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

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

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.

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

Marchand, M; Tissier, C; 2005. IFREMER / INERIS. Analyse du risque chimique en milieu marin – L'approche méthodologique européenne. IFREMER / INERIS. 125 p.

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.

SETRA-LCPC, 2000. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme (GTS), guide technique.

Tran, N.T. 2009 : « valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière » Thèse de doctorat, Ecole des mines de Douai 189 pages.

Tremblay, H. 1998 : « Amélioration mécanique et prédiction de la compressibilité des sols fins au Québec », Thèse de la Faculté des Sciences et de Génie, Université de Laval au Québec.

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

