Document public

Valorisation à terre des sédiments de dragage : retour d'expérience en France et à l'international

Rapport final

BRGM/RP-67329-FR
Août 2017

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Valorisation à terre des sédiments de dragage : retour d'expérience en France et à l'international

Rapport final

BRGM/RP-67329-FR
Août 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2017

P. Bataillard, B. Chevrier et V. Hoang

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : P. Michel	Nom : H. Léprond
Fonction : Correspondante scientifique	Fonction : Responsable de l'unité Sites, sédiments et sols pollués
Date : 16/10/2017	Date : 24/11/2017
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Sédiments, Boues de dragage, Valorisation à terre, Réglementation, France, Europe.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Bataillard P., **Chevrier B. et Hoang V.** (2017) - Valorisation à terre des sédiments de dragage : retour d'expérience en France et à l'international. Rapport final. BRGM/RP-67329-FR, 113 p., 22 fig., 20 tabl.

© BRGM, 2017, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'enlèvement des sédiments accumulés dans les ports et les voies d'eau, y compris les retenues de barrage, est une activité impérative pour le bon fonctionnement de ces installations. Jusqu'aux années 90, elle s'est déroulée sans trop de contraintes : les sédiments marins, *a priori* sans grande valeur géotechnique, étaient généralement immergés au large, les sédiments continentaux étaient soit remis en suspension au fil de l'eau dans les rivières à fort débit (Rhône et Rhin), soit évacués lors de chasse de barrage, soit encore régalés sur berges ou stockés de manière définitive dans des alvéoles dédiées mises en place sur des terrains appartenant très généralement au gestionnaire. Depuis une vingtaine d'années, l'amélioration des diagnostics et des connaissances, le développement d'une plus grande sensibilité des États et des populations aux impacts environnementaux des activités humaines, ainsi que le manque progressif de terrains pour le stockage définitif à terre, ont remis en cause les pratiques de gestion et demandent de nouveaux débouchés à terre des sédiments dragués.

Cette problématique concerne la plupart des pays industrialisés et notamment européens. Les problèmes posés sont plus ou moins criants en fonction des particularités du pays concerné mais globalement, tous encouragent la réutilisation des sédiments dragués dans le respect des directives européennes s'y rapportant. Afin d'apprécier les dernières avancées dans ce domaine, le ministère en charge de l'Environnement a sollicité le BRGM afin qu'il réalise un **état des lieux des pratiques de valorisation à terre des sédiments dragués pour entretien en France et à l'international dans le domaine du génie civil et de l'aménagement paysager**.

L'analyse des normes utilisées par la profession en France (terrassements routiers et plates-formes, remblaiement de tranchées, utilisation comme granulats (fillers) pour bétons, fabrication de granulats expansés pour bétons, production de clinker pour ciment et fabrication de briques de terre cuite), a mis en évidence une seule impossibilité stricte d'un point de vue normatif : la valorisation des sédiments en remblaiement de tranchées, en raison de leur teneur en matière organique souvent trop importante.

Pour les autres voies de valorisation envisagées, l'analyse ne révèle pas d'interdiction pour l'usage des sédiments de dragage, avec toutefois des vérifications à réaliser concernant les teneurs en chlorures, en sulfates et sulfures dans les lixiviats et/ou les solides, pour des applications en tant que granulat pour béton avec armatures métalliques. En outre, les matériaux utilisés doivent répondre à des critères physiques, chimiques ou mécaniques que ne présentent pas les sédiments bruts, mais qui peuvent être atteints par traitement ou mélange avec d'autres matériaux. La ré-utilisation des sédiments dans le BTP ne présente donc pas de limite majeure sur le plan technique.

Mais, si les produits fabriqués expérimentalement ou à l'échelle pilote ont les qualités requises, le passage à l'échelle industrielle se heurte très généralement au coût financier et aux contraintes induites par la fabrication de produits à partir d'un gisement de déchets hétérogènes, parfois contaminés. Une fois les contraintes techniques maîtrisées, il apparaît, effectivement, indispensable de satisfaire d'autres critères en vue de garantir le succès de la filière de valorisation :

- proposer des coûts de production proportionnés aux enjeux, et tenant compte de la compétition avec des matériaux primaires souvent peu onéreux ;
- s'assurer de l'existence d'un marché capable d'absorber la production en tenant compte de la possible concurrence entre le produit recyclé et des matériaux primaires ;

- assurer la pérennité de la filière grâce à une bonne connaissance du « gisement » de sédiments dragués (quantité et qualité) ;
- maîtriser les aspects juridiques : responsabilité du producteur du déchet, autorisation légale d'exploitation et de modalité de réutilisation des matériaux ;
- s'assurer de l'acceptabilité sociale du matériau produit qui peut souffrir de son image de déchet potentiellement contaminé.

En France, il semble que les atouts que présente la valorisation (préservation des ressources, moindre impact environnemental, source abondante de matériaux, …) pèsent actuellement assez peu face à ceux des filières classiques. Ces dernières sont bien implantées et parviennent encore à fournir un matériau naturel de qualité garantie à un coût inférieur au prix de revient de celui des sédiments dragués à des fins d'entretiens du réseau navigable (ports et voies d'eau). Dans ces conditions, les industriels sont réticents à modifier leur procédé bien éprouvé tout en risquant la fabrication d'un produit de qualité perçue moindre.

Au niveau européen, tout en explorant les voies de valorisation en génie civil à forte technicité (fabrication de briques, de ciment, de billes d'argile expansées, …), les pays favorisent les solutions de valorisation les moins interventionnistes. Il s'agit généralement du régalage sur berges, de l'incorporation des sédiments au sol, d'aménagement paysager et de la réhabilitation de sites dégradés, ainsi que de création de zones d'habitats faunistiques sur le littoral. Les pays montrant un taux de valorisation les plus élevés ont en commun le fait qu'ils ont développé une réglementation sur le sol et élaboré des guides pour la réutilisation des matériaux dans ce contexte. C'est le cas du *soil quality decree* aux Pays-Bas, de l'ordonnance sur le sol en Allemagne et du décret sur la gestion des sols de la région Flamande en Belgique. Ces trois pays ont également « allégé » le poids de la réglementation déchet soit en sortant globalement de son cadre les sédiments réutilisés (Pays-Bas), soit en spécifiant les voies de valorisation qui n'entrent pas dans ce cadre (Allemagne), soit encore en basculant quasi-automatiquement vers le statut de matériau une fois celui-ci valorisé (Belgique). Ces allégements sont plus ou moins implicites et ne font pas l'objet de décret ou d'ordonnance spécifiquement rédigé à cet effet.

Les Pays-Bas sont l'État qui a fait les choix les plus drastiques en matière de gestion des sédiments de dragage. Les sédiments sont effectivement considérés comme une composante nécessaire au bon fonctionnement du milieu. Ce dernier comprend l'ensemble du bassin versant, c'est-à-dire, le milieu aquatique et le milieu terrestre adjacent. En conséquence, et en pratique, les sédiments dragués ne sont considérés comme des déchets que s'ils ne peuvent pas être valorisés au sein du bassin versant (Rijkswaterstaat, 2007). L'objectif à atteindre, en lien avec la Directive Cadre Eau, est le bon état des masses d'eau qui, pour le Rijkswaterstaat, n'implique pas la remédiation des sédiments tant que ces derniers ne sont pas source de contaminants. Pour les experts du Rijkswaterstaat, la définition de Valeur de Référence de la Qualité des sédiments est utile pour le contrôle des sources mais n'est pas un bon point de départ pour l'étude de risque et le choix de la remédiation. Ces dernières doivent se baser sur les concentrations en polluants des sédiments effectivement transférables (solubles et/ou biodisponibles) soit vers la colonne d'eau, soit vers le biote (Molenaar, 2014). Les méthodes de routine pour caractériser ces fractions ainsi que les indices de risques correspondants pour l'Homme et l'écosystème (indicateur msPAF) sont disponibles dans un guide élaboré par le Ministeries van verkeer en waterstaat (Rijkswaterstaat, 2010). Bien qu'il soit toujours délicat de comparer des seuils décisionnels entre pays du fait d'une déconnexion avec la méthode qui les emploie, il apparaît que les seuils néerlandais sont, d'une certaine manière, plus « permissifs » que les seuils français. Ce tournant politique a été pris au milieu des années 2000 et aurait permis d'augmenter très significativement la ré-utilisation des sédiments aux Pays-Bas. On notera, par exemple, que la relocalisation des sédiments en milieu subaquatique en vue de recréer des habitats pour la faune et la flore est une voie de réutilisation majeure

aux Pays-Bas et en Allemagne. En France, cette voie de réutilisation n'est que très rarement mentionnée. Les contextes géographique et géologique des Pays-Bas sont certes différents de la France mais la relocalisation des sédiments fins, dragués sur les côtes françaises, en vue d'étendre progressivement les zones d'habitats faunistiques sur le littoral serait à étudier comme alternative au clapage. De même, la construction de sol à base de sédiments fluviaux dragués en vue de requalifier des sites dégradés serait à étudier et à faciliter.

L'analyse des réglementations en vigueur dans les pays voisins montre que les textes réglementaires français ouvrent autant de possibilités de valorisation à terre que leurs homologues étrangers mais les outils permettant une prise de décision rapide sont absents pour la plupart. La réglementation française sur les déchets se veut protectrice pour l'Homme et l'Environnement. Pour cela, elle fait appel à des outils et des méthodes d'évaluation des risques majorants. Elle impose la mise en place d'une traçabilité des matériaux valorisés et définit les responsabilités des acteurs. Elle ouvre la porte à de nombreuses voies de valorisation des sédiments mais, il appartient au maître d'ouvrage de prouver leur bien-fondé et leur innocuité. En pratique, l'organisation de la filière est jugée lourde par les différents acteurs. Surtout, les maîtres d'ouvrage et les bureaux d'étude ne savent pas toujours où fixer les limites de l'exercice visant à définir l'innocuité des matériaux : les études demandées peuvent s'avérer onéreuses, sans garantie de validation des résultats par les services instructeurs de l'État, ce qui peut décourager les initiatives. La valorisation des boues de dragage se heurte donc, à des problèmes d'incertitudes à plusieurs niveaux (mais finalement tous liés à l'hétérogénéité du gisement) : qualité du gisement, validation par les services de l'État et pérennité des ouvrages. Dans les pays réputés pour avoir facilité la valorisation à terre des sédiments (Pays-Bas, Flandres, Allemagne), des seuils de qualité chimique sont disponibles pour la plupart des voies de valorisation ce qui fluidifie la prise de décision.

En conclusion, les procédures validées par les services de l'État, s'avèrent donc généralement d'une grande aide pour établir clairement la démarche à suivre et procurer les outils de caractérisations *ad hoc*. Plus qu'un guide simplificateur dédié au projet de dragage et au volet de gestion des sédiments, la problématique de la valorisation à terre des sédiments de dragage a surtout besoin de la mise en place de ces outils permettant une prise de décision sans ambiguïté possible.

Sommaire

1. Introduction 13

2. Qualités intrinsèques des sédiments - premières conséquences sur leur gestion... 15

2.1. PRÉCISIONS LEXICALES : « SÉDIMENT » OU « BOUE » DE DRAGAGE ? 15

2.2. TERMINOLOGIE UTILISÉE DANS LES TEXTES RÉGLEMENTAIRES EUROPÉENS 17

2.3. UNE NATURE VARIÉE MAIS UN FONCTIONNEMENT CONTRÔLÉ PAR UN NOMBRE LIMITÉ DE PARAMÈTRES 18

2.3.1. Facteurs de contrôle de la chimie des sédiments 18

2.3.2. Le potentiel d'oxydoréduction : un paramètre clef 19

2.3.3. Des conditions favorables au piégeage des métaux et des polluants organiques hydrophobes 21

3. Valorisation des boues de dragage dans des ouvrages du génie civil : analyse des normes et guides en vigueur 23

3.1. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MINÉRALOGIQUES DES SÉDIMENTS 23

3.1.1. Caractéristiques géotechniques 23

3.1.2. Minéralogie 24

3.2. VALORISATION DES SÉDIMENTS EN TERRASSEMENTS ROUTIERS 24

3.2.1. Classification selon la norme NF P 11-300 24

3.2.2. Conditions d'utilisation des matériaux en remblais et couches de forme 26

3.2.3. Traitement des sédiments 27

3.2.4. Synthèse sur la valorisation des sédiments en terrassements routiers 27

3.3. VALORISATION DES SÉDIMENTS EN REMBLAIEMENT DE TRANCHÉES 28

3.4. VALORISATION DES SÉDIMENTS EN GRANULATS POUR BÉTON 29

3.4.1. Classification des sédiments selon les normes « granulats » 29

3.4.2. Caractéristiques mécaniques 29

3.4.3. Caractéristiques chimiques 31

3.4.4. Valorisation en granulats d'argile expansés 32

3.4.5. Synthèse sur la valorisation des sédiments en granulats pour béton 33

3.5. VALORISATION DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE EN CLINKERS POUR CIMENT 34

3.5.1. Le clinker Portland 34

3.5.2. Composition et notation des ciments courants 34

3.5.3. Exigences mécaniques, physiques, chimiques et de stabilité 34

3.5.4. Synthèse sur la valorisation des sédiments de dragage en clinker Portland 36

3.6. VALORISATION DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE EN BRIQUES DE TERRE CUITE 37

4. Retour d'expérience concernant la valorisation des sédiments en génie civil.....39

4.1. VALORISATION DES SÉDIMENTS EN GRANULATS POUR BÉTON ET ASSIMILÉ 39

4.2. VALORISATION DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE EN CLINKERS POUR CIMENT ET ASSIMILÉ 41

4.3. VALORISATION DES SÉDIMENTS POUR LA FABRICATION DE BRIQUES ET DE GRANULAT EXPANSÉS.....42

4.4. VALORISATION DES SÉDIMENTS EN AMÉNAGEMENT, RÉHABILITATION DE SITE ET AGRICULTURE.....43

4.5. COMPORTEMENT DES POLLUANTS AU COURS DE LA VALORISATION 46

4.6. DES FILIÈRES À INTÉGRER DANS DES MARCHÉS 47

5. État des lieux de la valorisation à terre des sédiments en Europe : approche réglementaire 51

5.1. UNE RÉUTILISATION À TERRE CROISSANTE AUX PAYS-BAS 51

5.1.1. Genèse du principe de gestion intégrée des sédiments 51

5.1.2. La gestion à terre des sédiments de dragage en pratique aux Pays-Bas 53

5.1.3. Bilan de l'approche néerlandaise 60

5.2. GESTION DES SÉDIMENTS EN ALLEMAGNE 61

5.2.1. Une gestion largement dominée par la remise en suspension en Allemagne...61

5.2.2. Une réglementation également variée.....63

5.2.3. Déclenchement de la gestion à terre.....63

5.2.4. Valorisation des sédiments gérés à terre 64

5.2.5. Bilan de l'approche allemande 66

5.3. UNE GESTION EXCLUSIVEMENT À TERRE EN RÉGION WALLONNE.....66

5.3.1. Classification des sédiments dragués 66

5.3.2. Devenir possible des sédiments dragués de catégorie A 68

5.3.3. Actualisation prochaine des textes réglementaires et bilan de l'approche wallonne 72

5.4. GESTION DES SÉDIMENTS DRAGUÉS EN RÉGION FLAMANDE 73

5.4.1. Contexte et enjeux.....73

5.4.2. Une valorisation résolument tournée vers les matériaux du génie civil.....74

5.4.3. Bilan de l'approche flamande.....77

5.5. GESTION DES SÉDIMENTS DRAGUÉS AU ROYAUME-UNI 78

5.5.1. Contexte et enjeux.....78

5.5.2. Des voies navigables intérieures sans vocation à développer le transport de marchandises 78

5.5.3. Une valorisation à terre soumise au « permis environnemental » 79

5.5.4. Bilan de l'approche britannique et les recommandations de la Marine Management Organisation.....81

6. État des lieux de la valorisation à terre des sédiments en France 83

6.1. DOCUMENTS RÉGLEMENTAIRES MAJEURS ORIENTANT LA GESTION DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE 83
6.1.1. Rappel du contexte réglementaire communautaire 83
6.1.2. Canaux et cours d'eau 84
6.1.3. Milieu marin 85
6.1.4. Partage du caractère dangereux/non dangereux des sédiments dragués 85

6.2. VOIES DE GESTIONS MENTIONNÉES DANS L'ARRÊTÉ DU 30 MAI 2008 86
6.2.1. Épandage 86
6.2.2. Régalage sur berge, aménagement paysager, remblaiement et réhabilitation de site 87
6.2.3. Valorisation en travaux publics 88

6.3. CONSÉQUENCES DU RÉGIME AUTORISATION/DÉCLARATION SUR LES ÉTUDES PRÉALABLES DES PROJETS DE DRAGAGE ET DE GESTION À TERRE DES SÉDIMENTS 89
6.3.1. Le régime Autorisation / Déclaration 89
6.3.2. Dossier d'Autorisation « Loi sur l'eau » 89
6.3.3. Dossier ICPE 90
6.3.4. Simplifier pour gagner en efficacité 94
6.3.5. Délais et coûts des études préalables 95

6.4. CONSÉQUENCE DU STATUT DE DÉCHET DES SÉDIMENTS DRAGUÉS VALORISABLES 96
6.4.1. Quelles différences d'interprétations entre pays européens ? 96
6.4.2. Peu importe la porte tant qu'elle est facile à ouvrir 99

7. Conclusion 103

8. Bibliographie 105

Liste des figures

Figure 1 : Aperçu de quelques faciès de sédiments. 16

Figure 2 : Transformation d'un hydroxyde de fer en sulfure de fer dans un sédiment marin (L'Estaque, France) ; cette transformation se fait en surface de l'ancien minéral sur quelques µm d'épaisseur comme le montre la figure de droite où S remplace O dans l'édifice cristallin (d'après Bataillard *et al*., 2014). 19

Figure 3 : Potentiel redox des principales réactions d'oxydo-réduction dans les eaux naturelles à pH 7 (flèches noires) et pH 8 (flèches blanches) d'après Sigg (2000). Calculs réalisés pour des activités des couples redox égales à 1 ; et des concentrations de $\{Mn^{2+}\}$ et de $\{Fe^{2+}\}$ de 1.10^{-6} M. 20

Figure 4 : Différences de couleur des sédiments entre la surface (brun clair) et la profondeur (gris foncé à noir) sur une plage de Charente-Maritime à marée basse (France). Les grains blancs sont des carbonates généralement constitués de débris de coquilles. .20

Figure 5 : Site de dépôt sub-aquatique de sédiments non valorisables aux Pays-Bas. 22

Figure 6 : Tableau synoptique de classification des matériaux (source AFNOR, 1992). 25
Figure 7 : Schéma de principe d'une structure routière (source : www.planete-tp.com). 26
Figure 8 : Coupe type d'une tranchée (source AFNOR, 2005). 28
Figure 9 : Démarche de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction (source AFNOR). ..31
Figure 10 : Exemple d'efflorescences sur des briques non protégées. 38
Figure 11 : Blocs de béton réalisés avec des sédiments non-immergeables traités (droite : port de Dunkerque, gauche : rade de Toulon). 40
Figure 12 : Réutilisation des sédiments non-immergeables traités du port de Dunkerque en aménagement paysagé (Lalaut, 2014). 44
Figure 13 : Réhaussement de parcelles agricoles à l'embouchure du Couesnon (50, France) dans le cadre des travaux de désenvasement du Mont-Saint-Michel en 2014. 45
Figure 14 : Schéma d'implantation des installations d'HAROPA - Port de Rouen pour la gestion des sédiments de dragage (source : http://www.haropaports.com/). 46
Figure 15 : Devenir des sédiments dragués de VNF en 2009 - % du volume (Prévost, 2010) 47
Figure 16 : Aperçu des classes de réutilisation à terre des sédiments dragués (modifié de Rijkswaterstaat [2014]). 54
Figure 17 : Carte des fonctions d'usage des sols de la ville de Rotterdam (vert : usage « nature », jaune : usage agriculture, orange : usage habitation, rouge : usage industrie) (extrait de Roeloffzen, 2013). 55
Figure 18 : Carte de la qualité des sols sur 0 - 1 m de la ville de Rotterdam (vert : qualité « nature », jaune : qualité agriculture, orange : qualité habitation, rouge : qualité industrie, violet : hors gamme - teneurs supérieures aux valeurs d'intervention) (extrait de Roeloffzen, 2013). 55
Figure 19 : Vue satellitaire d'une partie des installations de traitement des sédiments de dragage du port de Rostock (Allemagne). Se distinguent aisément de gauche à droite : la rampe de déchargement des boues, les lagunes de déshydratation et les andains de sédiments pelletables. Ce site a une superficie d'environ 65 ha (source : GoogleEarth). 62
Figure 20 : Illustrations d'un centre de regroupement de boues de curage de catégorie B en région wallonne (Saint-Ghislain - juillet 2009). En haut, vue d'ensemble du site et des andains (végétalisation spontanée). En bas, vues des dispositifs de surveillance (piézomètres) et de gestion des eaux du site. 68
Figure 21 : Un « narrow boat », bateau typique de faible capacité fréquentant les voies navigables britanniques - Source : https://www.waterways.org.uk/blog/historic_narrow_boat_features. La plupart ont été reconvertis en bateau de tourisme. 79
Figure 22 : Gestion hiérarchique des déchets selon la Communauté Européenne. La réutilisation d'un produit (re-use) ne le classe pas comme un déchet (source http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/). 97

Liste des tableaux

Tableau 1 : Extrait de la liste de codification des déchets (Annexe II de l'article R. 541-8 du Code de l'environnement) - les sédiments dragués sont codifiés sous les n° 17 05 05* et 17 05 06 et sous la dénomination « boue de dragage ». 17

Tableau 2 : Classes granumométriques de quelques sédiments dragués français. 23

Tableau 3 : Tableau de synthèse des propriétés des granulats d'argile expansés selon NF P 18-309 (AFNOR, 1982). 33

Tableau 4 : Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques (source AFNOR). 35

Tableau 5 : Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques (source AFNOR). 36

Tableau 6 : Catégories des teneurs en sels solubles actifs (source AFNOR). 38

Tableau 7 : Seuils pour les espèces minérales définis dans la réglementation néerlandaise pour la réutilisation des sédiments (extrait de Delcour et Lefebvre, (2013). 57

Tableau 8 : Statistiques descriptives des concentrations totales en métaux et assimilés dans les sédiments des cours d'eau en France (Mancioppi *et al.*, 2010). 57

Tableau 9 : Valeurs d'émission fixées pour les grands projets à terre aux Pays-Bas (extrait de Delcour et Lefebvre, 2013). 59

Tableau 10 : Seuils dans les sédiments établis en fonction de l'usage social des terrains récepteurs (mg/kg de MS) (extrait de Delcour et Lefebvre, 2013). 65

Tableau 11 : Seuils de prudence dans les sédiments pour les métaux pour une valorisation agricole (en mg/kg MS) (extrait de Delcour et Lefebvre, 2013). 65

Tableau 12 : Seuils de prudence dans les sédiments en fonction de la teneur en humus pour une valorisation agricole (en mg/kg MS) (extrait de Delcour et Lefebvre, 2013). 65

Tableau 13 : Seuils de la réglementation wallonne pour le classement des sédiments dragués (en mg/kg MS). 67

Tableau 14 : Concentration en métaux et assimilés définies en fonction des usages du sol en région wallonne (Décret sols 05/12/08). VR = valeur de référence, VS = valeur seuil, VI = valeur d'intervention (1) valeurs proposées pour le chrome total basées sur le chrome trivalent. (2) valeurs proposées pour le chrome hexavalent basées exclusivement sur les risques pour la santé humaine. (3) VR fixée à la limite de détection (25 % de la valeur paramétrique) imposée par l'arrêté du Gouvernement wallon du 15 janvier 2004 relatif aux valeurs paramétriques applicables aux eaux destinées à la consommation humaine. 70

Tableau 15 : Valeurs maximales permissibles des matériaux pour une réutilisation dans la construction (Cappuyns *et al.*, 2015). 75

Tableau 16 : Seuils fixés pour les métaux et assimilés par la réglementation flamande pour la réutilisation des sédiments (extrait de Delcour et Lefebvre, 2013). Des seuils sont également disponibles pour certains polluants organiques. 76

Tableau 17 : Seuils fixés sur le sol pour les métaux et assimilés pour la réutilisation des sédiments comme des terres excavées (extrait de Delcour et Lefebvre, 2013). 77

Tableau 18 : Seuils fixés pour l'épandage agricole d'après l'arrêté de 1998 (extrait de Delcour et Lefebvre, 2013). 87

Tableau 19 : Estimation des coûts et des délais de réalisation et d'instruction pour une opération de dragage et gestion à terre des sédiments (selon l'expérience des auteurs). 95

Tableau 20 : Comparatif des termes de la directive cadre « déchet » en version anglaise et française. 98

1. Introduction

L'enlèvement des sédiments accumulés dans les ports et les voies d'eau, y compris les retenues de barrage, est une activité impérative pour le bon fonctionnement de ces installations. La périodicité de cet entretien varie en fonction du contexte : annuelle, pour certains chenaux d'accès portuaire, à plusieurs décennies pour certaines retenues de barrage (Raison, 2010).

Cette pratique est très ancienne : elle est contemporaine des ouvrages créés par la main de l'homme de l'antiquité à nos jours (Miquel, 1994 ; Lalandre et Roblin, 2004 ; Grosdemange, 2005). Jusqu'aux années 90, elle s'est déroulée sans trop de contraintes : les sédiments marins, sans grande valeur géotechnique *a priori*, étant très généralement immergés au large, et les sédiments continentaux soient remis en suspension au fil de l'eau dans les rivières à fort débit (Rhône et Rhin), soient évacués lors de chasse de barrage, soient encore stockés de manière définitive dans des alvéoles dédiées mises en place sur des terrains appartenant très généralement au gestionnaire.

Depuis une vingtaine d'années, l'amélioration des diagnostics et des connaissances, le développement d'une plus grande sensibilité des États et des populations aux impacts environnementaux des activités humaines, ainsi que le manque progressif de terrains pour le stockage définitif à terre, ont considérablement compliqué la gestion de ces matériaux (van Hooydonk, 2006). Les pratiques de clapage[1], de remise en suspension et de stockage définitif à terre sont fortement remises en cause alors que les solutions de substitution ne sont pas encore opérationnelles (Mulligan *et al*., 2010). Ce constat est bien connu des acteurs du secteur qui ont établi dans le cadre du Grenelle de l'Environnement en 2010[2], un rapport spécialement dédié aux sédiments de dragage (Duclay *et al*., 2010). Ce rapport comporte 39 recommandations en vue d'améliorer la qualité et la gestion des sédiments marins dragués, mais dont la plupart peuvent s'appliquer également aux sédiments continentaux. Le développement de filières de valorisation à terre fait partie des préconisations du groupe. Ces recommandations guident actuellement les actions du ministère en charge de l'Environnement qui a notamment mis en place des groupes de travail visant à élaborer des guides méthodologiques sur la valorisation des sédiments en technique routière et en aménagements portuaires (recommandations n° 26 et 27 du Grenelle).

La question de la valorisation à terre des sédiments dragués concerne la plupart des pays industrialisés et notamment européens (Brils *et al*., 2014 ; Netzband *et al*., 2007). Les problèmes posés sont plus ou moins criants en fonction des particularités du pays concerné mais globalement, tous encouragent la réutilisation des sédiments dragués dans le respect des directives européennes s'y rapportant (Delcour et Lefebvre, 2013). Les sédiments sont des matériaux complexes par nature, souvent hétérogènes, et en interaction constante avec les autres composantes de l'écosystème dont ils font partie (eau, biote, Homme). L'intervention humaine dans leur cycle d'évolution soulève des questions de tout ordre : techniques, scientifiques, environnementales, économiques et sociétales. En conséquence, les voies de valorisation à terre sont encore, pour la plupart, en devenir.

[1] Pour les ports, dès l'apparition des dragues (*a priori* dès le XVème siècle - Grosdemange, 2005), des chalands sont utilisés pour récupérer les matériaux extraits et les emmener plus au large où ils sont immergés. Ces chalands sont d'abord de simples péniches qui sont ensuite équipées d'un clapet permettant l'ouverture du fond du bateau pour le lâcher instantané des sédiments sur le lieu d'immersion. L'ouverture du clapet a donné le terme consacré de « clapage » (Grosdemange, 2005).

[2] Le Groupe n° 11 du Grenelle de la mer était constitué d'élus, d'ONG, de représentants socio-professionnels, de personnalités qualifiées et de représentants de l'État.

Dans ce contexte, le Ministère en charge de l'Environnement a sollicité le BRGM afin qu'il réalise un état des lieux des pratiques de valorisation à terre des sédiments dragués pour entretien en France et à l'international dans le domaine du génie civil. Dans le détail, et après une première partie dédiée à la présentation de la nature bio-physico-chimique des sédiments et des contraintes qu'elle impose, ce travail vise les réalisations suivantes :

- un bilan des normes techniques françaises susceptibles de bloquer l'intégration des sédiments compte tenu de leurs propriétés géotechniques et chimiques dans les travaux du BTP ;
- un bilan de la faisabilité technique, environnementale, économique et sociétale des ouvrages utilisant ces matériaux ;
- un aperçu des pratiques de gestion et de valorisation dans les pays de l'Union Européenne également confrontés à cette problématique.

En fonction des verrous identifiés, des recommandations pour faciliter cette valorisation sont formulées dans un contexte de gestion intégrée des sédiments de dragage.

2. Qualités intrinsèques des sédiments - premières conséquences sur leur gestion

2.1. PRÉCISIONS LEXICALES : « SÉDIMENT » OU « BOUE » DE DRAGAGE ?

En Science de la Terre, les sédiments sont des matériaux « constitués par la réunion de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport » (Foucault et Raoult, 1988). Certaines disciplines scientifiques considèrent que ce transport se fait exclusivement en phase aqueuse (Mathieu et Lozet, 2011), mais, le sens commun désigne également comme « sédiment » des dépôts éoliens et glaciaires (Le Robert, 1989).

Dans leur ensemble, ces définitions se basent donc uniquement sur le mode de formation de l'objet et non sur sa nature bio-physico-chimique (à l'exception de leur caractère « meuble »). Par conséquent, les « galets » comme les particules les plus fines font partie du sédiment (Figure 1). Cette particularité est à considérer lorsqu'il s'agit de légiférer et rendre applicable une méthode au niveau national. Actuellement, par exemple, des problèmes se posent au sujet de la caractérisation avant curage des sédiments en présence d'une fraction grossière majoritaire, comme c'est le cas en milieu de montagne par exemple. Dérivés des sols, considérés comme des matériaux fins (quasi-totalité des grains < 2 mm), les moyens de prélèvement et les normes se rapportant à la caractérisation de tels échantillons grossiers se révèlent finalement inadaptés. Dans le cas le plus bloquant, c'est l'absence même de méthodologie permettant de mieux caractériser le stock de contaminants présents dans les sédiments grossiers qui biaise le diagnostic et donc limite les opportunités de remédiation et de valorisation.

Figure 1 : Aperçu de quelques faciès de sédiments.

D'autres appellations sont couramment utilisées pour désigner les sédiments mais elles ont chacune une connotation propre à la nature du gisement. Il s'agit, par exemple, des termes « vases », « silts » ou « boues ».

Pour les géologues, la « vase » -du hollandais *wase*- est un « sédiment meuble gorgé d'eau, à éléments détritiques très fins (sablons, limons, argiles), à colloïdes en grande partie d'origine biologique (bactéries, diatomées, pollens, humus, …) à hydroxydes et sulfures de fer ; … » (Foucault et Raoult, 1988). Cette définition informe donc remarquablement sur la typologie du matériau qui est ici de texture fine, contenant de la matière organique essentiellement authigène[3] et en conditions chimiques réductrices.

Au contraire, « Silt » informe très peu sur cette nature, si ce n'est sur la texture du matériau : « silt » est un mot anglais qui désigne un « sédiment détritique meuble dont le grain est compris entre 3,9 µm et 62,5 µm » (Foucault et Raoult, 1988). Même registre pour les termes d'origine latine : « sable » (grains compris entre 50 µm et 2 mm[4]) ou encore « limons » (2µm - 50 µm). Bien entendu, pour le commun des mortels, ces coupures granulométriques ne sont pas connues de manière précise mais l'expérience montre que ces termes sont employés sans erreur lexicale majeure. En outre, les termes « vase », « silt » ou « limon » peuvent être utilisés pour désigner un même sédiment avec raison.

Enfin, la « boue » est, pour les géologues comme pour les pédologues, un terme général désignant tout dépôt fin, gorgé d'eau et pouvant facilement s'écouler (Foucault et Raoult,

[3] Formée sur place.

[4] Les limites de tailles des grains varient légèrement en fonction des disciplines scientifiques. Par exemple, pour les agronomes et les pédologues, les sables sont compris entre 50 µm et 2 mm. Les géologues utilisent par exemple la classification d'A. Cailleux qui les classe entre 20 et 2 mm.

1988 ; Mathieu et Lozet, 2011). Les géologues l'utilisent également pour désigner les dépôts des bassins océaniques à teneurs élevées en argiles minéralogiques.

Mais, le terme « boue » est largement employé pour désigner divers résidus de traitement industriels (Mathieu et Lozet, 2011). C'est d'ailleurs dans ce sens que le vocable « boue de dragage » est utilisé dans les textes réglementaires français et notamment ceux se rapportant aux déchets (ex : directive 1999/31/CE, article R.541-8 du Code de l'environnement, …) (Tableau 1). Au contraire, le terme « sédiment » est utilisé pour désigner ces mêmes matériaux lorsqu'ils sont « déplacés au sein des eaux de surface », situation dans laquelle ils ne sont pas considérés comme des déchets. De plus, le terme « boue de dragage » permet de faire la distinction entre les sédiments dragués pour entretien, des sédiments dragués pour le génie civil. En France, en 2011, les granulats d'origine marine représentaient 2 % de la production nationale, soit environ 10 millions de m^3 (Augris et Simplet, 2013). Sauf cas particuliers, ces exploitations sont régies par le Code minier et, bien entendu, les sédiments mis à terre sont alors des produits et non des déchets.

17 05	Terres (y compris déblais provenant de sites contaminés), cailloux et boues de dragage.
17 05 03*	Terres et cailloux contenant des substances dangereuses.
17 05 04	Terres et cailloux autres que ceux visés à la rubrique 17 05 03.
17 05 05*	Boues de dragage contenant des substances dangereuses.
17 05 06	Boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17 05 05.
17 05 07*	Ballast de voie contenant des substances dangereuses.
17 05 08	Ballast de voie autre que celui visé à la rubrique 17 05 07.

Tableau 1 : Extrait de la liste de codification des déchets (Annexe II de l'article R. 541-8 du Code de l'environnement) - les sédiments dragués sont codifiés sous les n° 17 05 05 et 17 05 06 et sous la dénomination « boue de dragage ».*

Au final, les termes « boue » et « sédiment » paraissent donc être employés avec une certaine cohérence dans les documents législatifs ; le terme boue étant connoté « déchet » dans ce contexte (et bien que toutes les boues ne soient pas des déchets). Pourtant, il laisse à penser que les sédiments de dragage ayant le statut de déchet sont forcément fins ce qui ne se vérifie pas dans tous les cas.

En définitive, dans un contexte général, les termes « sédiment » et « sédiment de dragage » sont les plus objectifs, et donc, à privilégier. Dans ce rapport, l'objet d'étude est bien ce matériau fin, dragué, gorgé d'eau, pouvant facilement s'écouler, *a priori* difficile à valoriser, parfois contaminé et qui est, réglementairement, en France, un déchet une fois géré à terre ; ce que nous retiendrons comme la définition d'une « boue de dragage ». Les trois termes seront utilisés dans la suite du document.

2.2. TERMINOLOGIE UTILISÉE DANS LES TEXTES RÉGLEMENTAIRES EUROPÉENS

La version anglaise de la Directive Cadre « Déchet » utilise le terme « dredging spoil » qui se traduit par le terme « déblais de dragage ». Les termes « dredging sludge », « dredging slurry » ou « dredging mud » qui pourraient traduire « boue de dragage » ne sont jamais utilisés. Les textes mentionnent également, le vocable « dredged material » ou « dredged sediment ».

Le « Soil Quality Decree » (Pays-Bas), dans sa version anglaise, utilise exclusivement le terme « dredged material » qui est défini de la manière suivante : « material that has come from the

soil via the surface water or the space intended for that water and that consists of mineral parts with a maximum granule size of 2 millimetres and organic substance in a ratio and with a structure that occur naturally in the soil, as well as shells and gravel naturally occurring in the soil with a granule size of 2 to 63 millimetres ». La définition est donc strictement d'ordre bio-physico-chimique, sans aucune connotation.

Le terme « boue de dragage » est uniquement rencontré dans certains documents techniques belges qui ne font pas office de loi (IRGT, 2005 ; DGRNE, 2007). Au contraire, la terminologie « boues » a été proscrite en région Wallonne. Les termes des décrets sont « matières enlevées des cours d'eau » (IRGT, 2005).

2.3. UNE NATURE VARIÉE MAIS UN FONCTIONNEMENT CONTRÔLÉ PAR UN NOMBRE LIMITÉ DE PARAMÈTRES

2.3.1. Facteurs de contrôle de la chimie des sédiments

La richesse lexicale évoquée ci-dessus est une conséquence de la grande variété des sédiments.

La nature du sédiment dépend des facteurs suivants :

- la nature minéralogique et la taille des particules déposées ;
- les conditions chimiques et hydrodynamiques du milieu de dépôt ;
- les apports de matières organiques issues du bassin versant ;
- la température ;
- l'activité biologique du milieu.

Ces cinq facteurs sont interdépendants. Par exemple, la taille des particules déposées est en partie fonction des conditions hydrodynamiques du milieu de dépôt. Les conditions chimiques du milieu sont elles-mêmes très dépendantes des échanges d'oxygène dissout entre le sédiment et la colonne d'eau, et donc de la perméabilité des sédiments (fonction de la taille des particules et de leur arrangement dans l'espace), mais aussi de l'activité biologique elle-même dépendante de la présence de matière organique et de la température.

Les minéraux des sédiments sont soit hérités du bassin versant (quartz, feldspath, muscovite, smectite, calcite, hématite et autre hydroxydes de fer, …), soit nouvellement formés suite aux transformations des minéraux hérités ou suite à des précipitations de nouveaux composés. Pour les premiers, ce sont les minéraux contenant du fer qui vont subir les transformations les plus importantes si le milieu est pauvre en oxygène (Figure 2). Pour les seconds, il s'agit généralement de carbonates et de sulfures, dont les cinétiques de formation sont contrôlées par l'activité biologique, en lien avec leur métabolisme de dégradation de la matière organique, et la disponibilité de l'oxygène.

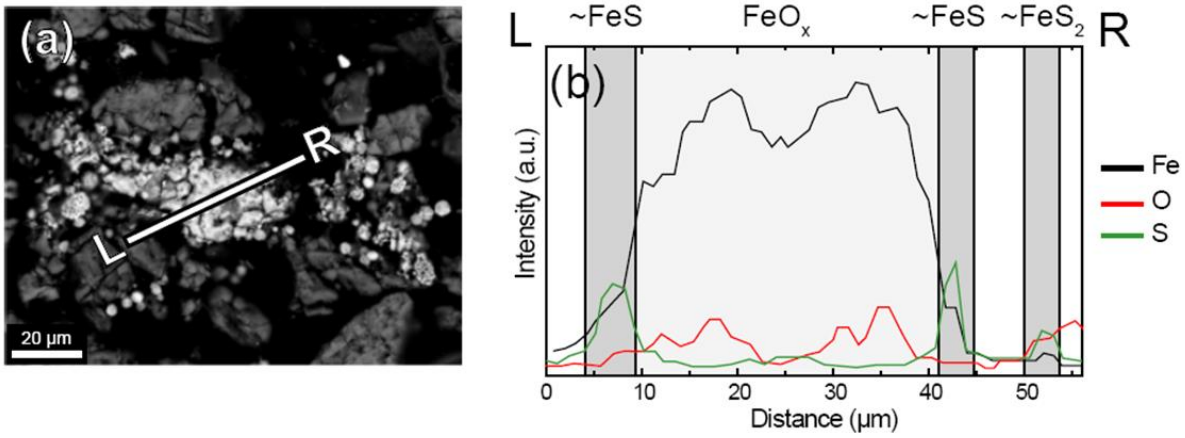


Figure 2 : Transformation d'un hydroxyde de fer en sulfure de fer dans un sédiment marin (L'Estaque, France) ; cette transformation se fait en surface de l'ancien minéral sur quelques µm d'épaisseur comme le montre la figure de droite où S remplace O dans l'édifice cristallin (d'après Bataillard et al*., 2014).*

Les hydroxydes de fer et la matière organique étant des composés ubiquistes dans l'environnement, les mêmes réactions chimiques sont attendues dans l'ensemble des sédiments. C'est finalement la disponibilité en oxygène qui constitue le premier critère d'importance pour comprendre la chimie des sédiments.

2.3.2. Le potentiel d'oxydoréduction : un paramètre clef

Si l'oxygène diffusait aussi vite dans l'eau que dans l'air, et si elle n'était pas consommée par le biote dans la colonne d'eau, les sédiments n'auraient pas une chimie différente de celle des sols. Or, la diffusion moléculaire se fait environ 10 000 fois plus lentement dans l'eau que dans l'air (Calvet, 2003). L'oxygène est le principal comburant des êtres vivants qui l'utilisent comme accepteurs d'électrons au cours de réactions d'oxydo-réduction pour tirer l'énergie nécessaire à leur développement. Sa consommation est importante et la diffusion dans l'eau ne permet généralement pas un apport suffisant d'O_2 dans les sédiments qui sont le siège d'une activité biologique intense.

L'autre moyen d'apporter de l'O_2 au sein du sédiment est la convection, c'est-à-dire, la circulation d'eau contenant de l'O_2 dissout. C'est ce qui se produit dans les milieux combinant forte courantologie et perméabilité des sédiments comme les rivières de montagne à la sédimentation grossière et les zones côtières sujettes aux marées ou au courants et pourvues de sédiments majoritairement constitués de sables et de graviers. Ce sont ces formations qui peuvent faire l'objet d'exploitation minière. Cette partie des sédiments fortement influencée par la convection des eaux de la rivière est appelée « zone hyporhéique ».

Dans les zones plus calmes et aux sédiments moins perméables, les phénomènes convectifs sont limités et le milieu peut rapidement manquer d'oxygène. Dans ces conditions, les bactéries s'adaptent et utilisent d'autres accepteurs d'électrons pour leur métabolisme. L'équilibre redox fait intervenir deux couples chimiques, constitués d'une forme réduite et d'une forme oxydée conjuguée. Par conséquent, dans les sédiments, une succession d'équilibres s'établit en mettant en jeu une série d'accepteurs d'électrons autre que l'oxygène (Figure 3). Dans les sédiments récemment déposés, on observe successivement la réduction du nitrate (NO_3^-) puis du manganèse (Mn(III et IV)), du fer (Fe(III)), des sulfates (SO_4^{2-}) et enfin celle du gaz carbonique (CO_2).

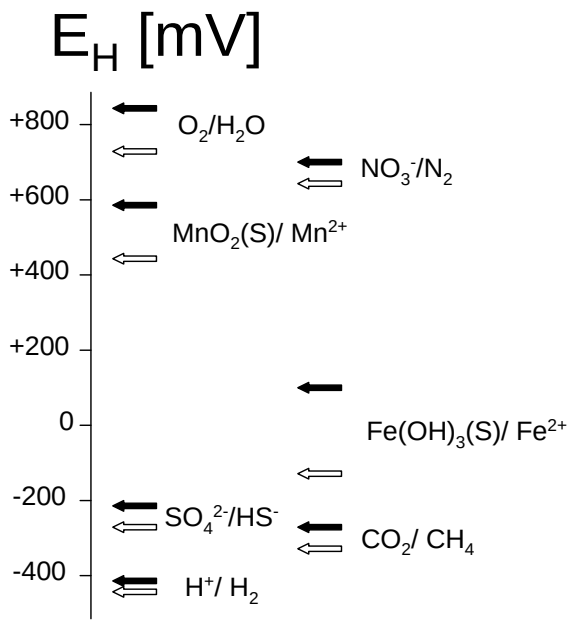


Figure 3 : Potentiel redox des principales réactions d'oxydo-réduction dans les eaux naturelles à pH 7 (flèches noires) et pH 8 (flèches blanches) d'après Sigg (2000). Calculs réalisés pour des activités des couples redox égales à 1 ; et des concentrations de {Mn^{2+}} et de {Fe^{2+}} de 1.10^{-6} M.

La disparition progressive des hydroxydes de fer de couleur brune, l'apparition de minéraux sulfurés plus ou moins bien cristallisés, souvent de couleur noire, ainsi que la présence de matières organiques également de couleur noire, expliquent les différences de teinte souvent observées dans les sédiments (Figure 4).

Le potentiel redox est donc un paramètre clef de la compréhension du fonctionnement des sédiments. Mais sa mesure est délicate car elle demande de préserver l'échantillon de tout contact avec l'air. Aussi, en première approche, la connaissance du contexte de dépôt et la simple mesure des paramètres « granulométrie » et « taux de carbone organique et inorganique », peuvent suffirent pour se faire une première idée des processus qui gouvernent le fonctionnement actuel du sédiment.

Figure 4 : Différences de couleur des sédiments entre la surface (brun clair) et la profondeur (gris foncé à noir) sur une plage de Charente-Maritime à marée basse (France). Les grains blancs sont des carbonates généralement constitués de débris de coquilles.

2.3.3. Des conditions favorables au piégeage des métaux et des polluants organiques hydrophobes

Le couple redox (SO_4^{2-}/HS^-) joue un rôle majeur dans la rétention de contaminants minéraux (Zn, Cd, Pb, Hg, …) dans les sédiments car de nombreux éléments traces forment des précipités sulfurés très peu solubles. De nombreuses études montrent que la sulfatoréduction (réduction des anions sulfates en sulfures) se produit communément dans les sédiments de cours d'eau et de zones portuaires et participe au piégeage des contaminants métalliques (Tack *et al*., 1997 ; Morse et Luther, 1999 ; Boyd *et al*., 1999).

En outre, la respiration anaérobie ne permet pas d'obtenir des rendements énergétiques aussi importants qu'en milieu oxygéné. La dégradation microbienne des composés organiques est souvent incomplète, ce qui conduit à leur accumulation dans le sédiment et au maintien des conditions réductrices en l'absence de perturbation des équilibres. De manière générale, il n'est pas rare d'observer des taux de matière organique de l'ordre de 5 à 10 % dans des sédiments de dragage provenant de cours et plans d'eau de faible débit. Or les molécules organiques naturelles présentent une grande surface spécifique et des groupements chimiques de nature variée qui en font un compartiment très réactif. Les polluants peuvent y être directement associés par complexation organo-minérale ou plus généralement parce qu'ils présentent une affinité particulière pour ce compartiment (cas des molécules organiques hydrophobes).

Ces phénomènes expliquent pourquoi les sédiments sont considérés comme des puits de polluants. Ces derniers sont généralement très liés à la matrice solide qui elle-même évolue peu si les conditions réductrices perdurent. C'est en partie pour cette raison qu'un pays comme le Portugal déconseille fortement le dragage des sédiments de classe 5 (les plus contaminés - Diário da República 1. Série n° 217 - 12 Novembre 2007) et que le stockage sous eau des sédiments non valorisables est privilégié aux Pays-Bas (Figure 5).

Ces réactions de piégeage sont réversibles : le dragage et le dépôt à terre des sédiments au contact de l'atmosphère, induisent la dissolution oxydative des sulfures et la minéralisation de la matière organique. De nombreuses études ont montré que ce retour aux conditions aérobies est susceptible d'induire une plus grande mobilité de certains métaux et une plus grande toxicité des lixiviats (Piou *et al.*, 2009 ; Lions *et al*., 2007 ; Panfili *et al*., 2005). Ce phénomène est à prendre en compte lors de projets de gestion à terre des sédiments, et notamment dans le cadre d'un stockage prolongé avant valorisation.

Figure 5 : Site de dépôt sub-aquatique de sédiments non valorisables aux Pays-Bas.

3. Valorisation des boues de dragage dans des ouvrages du génie civil : analyse des normes et guides en vigueur

Pour être valorisés dans des ouvrages de génie civil ou de travaux publics, les sédiments de dragage doivent avant tout répondre aux normes et guides techniques relatifs aux matériaux constitutifs de ces ouvrages.

Parmi les voies de valorisation potentielle de ces sédiments, les filières suivantes ont été retenues :

- terrassements routiers et plates-formes ;
- remblaiement de tranchées ;
- fillers pour bétons ;
- granulats expansés pour bétons ;
- production de clinker pour ciment ;
- brique de terre cuite.

3.1. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MINÉRALOGIQUES DES SÉDIMENTS

3.1.1. Caractéristiques géotechniques

Comme précisé au chapitre 2.1, les sédiments de dragage considérés ici, qu'ils soient marins ou fluviaux, se caractérisent par une granulométrie fine qui permet de les assimiler à des limons sableux, des limons voir des argiles. Le Tableau 2 synthétise des caractérisations granulométriques réalisées sur des sédiments marins et fluviaux par différents auteurs en France.

		Passant (%)						
Auteur(s)	**Origine**	1 mm	0,2 mm	80 µm	63 µm	50 µm	20 µm	2 µm
Agostini *et al.* (2007)	Dragage portuaire	-	-	-	64	-	-	5
Miraoui *et al* (2012)	Dragage portuaire	100	100	-	88,5	-	-	8,5
Piou S. (2005)	Canal	-	95,5	-	-	94,5	63,6	25,9
Piou S. (2005)	Canal	-	45	-		33	22,5	10,9
Wang *et al.* (2013)	Dragage portuaire	-	-	-	89,2	-	-	14,5
Zentar *et al.* (2008)	Dragage portuaire	100	-	90	65	-	-	8

Tableau 2 : Classes granumométriques de quelques sédiments dragués français.

Ces mêmes auteurs mentionnent, pour les matériaux étudiés, une teneur en eau massique naturelle ω pouvant atteindre 130 à 180 %.

Enfin, les sédiments de dragage considérés se caractérisent par une teneur importante en matière organique, de l'ordre de 7 %.

3.1.2. Minéralogie

Les minéraux majoritairement identifiés dans les sédiments de dragage sont le quartz, les feldspaths, la calcite ainsi que des alumino-silicates (illite, kaolinite, …) (Aouad *et al*., 2012 ; Brakni *et al*., 2007 ; Semcha, 2006 ; Kribi, 2005). D'autres minéraux sont également parfois identifiés mais en moindre proportion : dolomite, halite, muscovite, pyrite, ...

Les silicates et les carbonates rentrent notamment dans la composition des clinkers de ciments. Selon Miraoui (2010), la composition chimique en poids d'oxyde est similaire dans des sédiments provenant du même port : silice (SiO_2) 47 %, chaux (CaO) 15 % et alumine (Al_2O_3) 14 %. Des proportions similaires ont été mesurées par Ben Allal *et al*. (2011) sur des sédiments provenant de deux ports marocains. Selon ces auteurs, la composition de ces sédiments est comparable à celle des argiles utilisées notamment pour la production de briques en terre cuite.

3.2. VALORISATION DES SÉDIMENTS EN TERRASSEMENTS ROUTIERS

3.2.1. Classification selon la norme NF P 11-300

La norme NF P11-300 aborde la classification géotechnique des matériaux utilisables en couches de forme et en remblais routiers (AFNOR, 1992). Cette classification repose en premier lieu sur les paramètres de nature des matériaux : granularité, indice de plasticité et argilosité (valeur au bleu). Selon la norme NF P 11-300, compte tenu de leur teneur en matière organique (MO), les sédiments de dragage rentrent dans la classe F : matériaux ou « sols[5] » organiques et sous-produits industriels (Figure 6).

[5] En géotechnique, le terme sol désigne soit la surface support des ouvrages, soit un matériau naturel de type terreux.

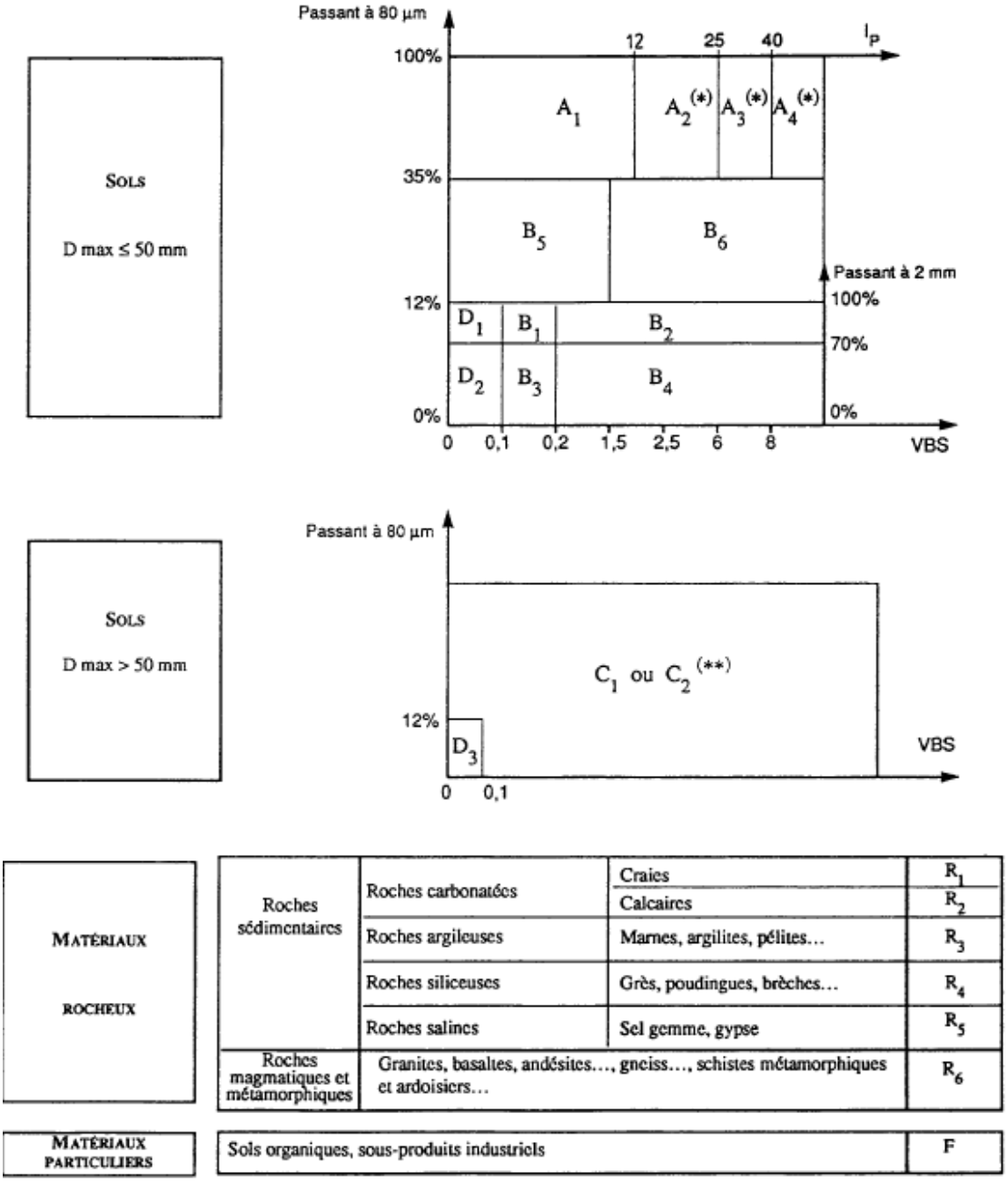


Figure 6 : Tableau synoptique de classification des matériaux (source AFNOR, 1992).

On retrouve notamment dans cette classe les mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (F6), les matériaux de démolition (F7) et les laitiers sidérurgiques (F8).

Les sédiments de dragage appartiennent à la classe F_1 des matériaux organiques. Elle se divise en deux sous-classes en fonction de la teneur en matière organique (% MO) :

- F_{11} : 3 < % MO < 10 % ;
- F_{12} : % MO > 10 %.

Les sédiments de dragage s'inscrivent généralement dans la sous-classe F_{11}, dont la teneur en matière organique est comprise en 3 et 10 % (en masse sèche), bien que des sédiments ayant des teneurs encore plus importantes en MO puissent se rencontrer (Piou *et al*., 2009 ; Bataillard *et al*., 2014).

La norme NF P 11-300 recommande, pour les matériaux de classe F, de réaliser une classification analogue aux matériaux non-organiques. Compte tenu de leur granularité, les sédiments de dragage s'inscrivent dans la classe A des sols fins caractérisés par :

- une taille maximale des Grains D_{max} < 50 mm ;
- un passant à 80 µm de 35 % minimum.

3.2.2. Conditions d'utilisation des matériaux en remblais et couches de forme

La Figure 7 illustre les différentes couches constitutives d'une structure de chaussée. La couche de sol support peut être constituée des terrains en place (déblais) ou de matériaux d'apport (remblais).

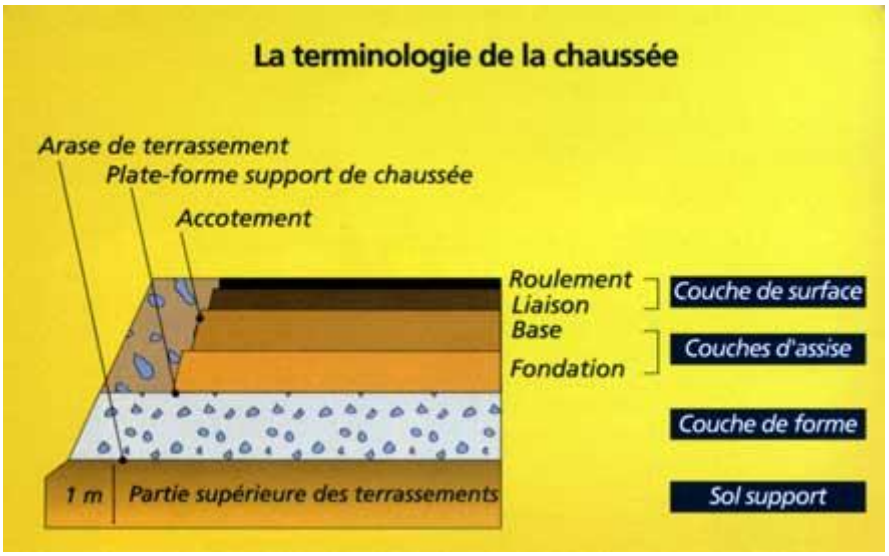


Figure 7 : Schéma de principe d'une structure routière (source : www.planete-tp.com).

Le « Guide technique - Réalisation des remblais et des couches de forme » (SETRA, 2012), dit GTR 92, précise les conditions d'utilisation et de mise en œuvre des matériaux, définis selon la norme NF P11-300, en couches de forme et remblais routiers.

Utilisation en remblai routier

Selon ce guide, les matériaux de classe $F_{11,}$ correspondant aux sédiments de dragage, ont une utilisation privilégiée en couverture de surfaces végétalisées (talus, accotements, giratoires, …). Toutefois, leur utilisation est possible en remblai routier (couche support), selon les conditions applicables aux sols naturels auxquels ils correspondent (classe A en l'occurrence). Le traitement à la chaux vive de ces matériaux est évoqué dans le GTR.

En fonction de leur état hydrique (teneur en eau, de th (très humide) à ts (très sec)) et des conditions météorologiques, la mise en œuvre des différents matériaux de classe A en remblai peut s'avérer impossible, ou nécessiter des dispositions particulières :

- les matériaux A_ith et $A_i$ts ne sont pas utilisables en l'état. Une réduction de la teneur en eau des matériaux A_1th est envisageable par mise en dépôt et/ou drainage ;
- les matériaux A_4 sont difficiles à travailler et présentent des risques de retrait/gonflement et de stabilité. Une étude géotechnique spécifique est nécessaire.

Utilisation en couche de forme

Selon le GTR, les matériaux de classe F_1 (sols organiques) ne sont pas utilisables en couche de forme.

3.2.3. Traitement des sédiments

Le guide technique « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme » (SETRA, 2000), dit GTS, définit les modalités de traitement des matériaux pour la réalisation de structures routières. Il s'appuie notamment sur la norme NF EN 14227 relative aux mélanges traités aux liants hydrauliques (AFNOR, 2006a, 2006b, 2006c).

Ce guide mentionne l'utilisation de deux types d'adjuvant pour le traitement des sols sensibles à l'eau ou trop humides pour être travaillés en l'état :

- chaux aérienne, qui se re-carbonate sous l'action du CO_2 atmosphérique ;
- liants hydrauliques (ciments, liants hydrauliques routiers) qui font prise en présence d'eau.

De manière synthétique, le traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques des sols fins présente les actions suivantes :

- à court terme, correction de l'état hydrique des matériaux, augmentation de la limite de plasticité et de la résistance au cisaillement du sol, modification des caractéristiques de compactage du sol ;
- à long terme, amélioration des caractéristiques mécaniques du sol (action pouzzolanique de la chaux ou cimentation des liants hydrauliques).

Pour la réalisation de remblais routiers, l'adjuvant généralement le mieux adapté est la chaux vive, pour le traitement de matériaux trop humides. Les matériaux concernés sont notamment ceux des classes A_1, A_2 et A_3. Par extension, les sédiments de dragage dont les caractéristiques géotechniques correspondent à ces matériaux peuvent faire l'objet d'un tel traitement afin d'être valorisés en remblais routiers.

D'un point de vue normatif, les volets 10, 11 et 13 de la norme NF EN 14227, relatifs respectivement aux sols traités au ciment, à la chaux et aux liants routiers mentionnent que les matériaux fins de classes A_1 et A_2 peuvent faire l'objet d'un traitement avec ces adjuvants. Elles définissent également les critères de qualité auxquels doivent répondre les matériaux et les adjuvants avant traitement, ainsi que le mélange traité.

3.2.4. Synthèse sur la valorisation des sédiments en terrassements routiers

Les sédiments de dragage, selon la norme NF P11-300, sont des matériaux organiques de classe F_{11}. Leurs caractéristiques géotechniques correspondent à des matériaux fins de classe A.

L'utilisation de sols de classe F_{11} est possible en remblais routiers (couche support), mais pas en couche de forme.

Le cas échéant, la mise en œuvre des sédiments respectera les recommandations formulées pour les sols de classe A_1 à A_3. Un traitement à la chaux vive ou aux liants hydrauliques est envisageable, et nécessite une étude de formulation spécifique.

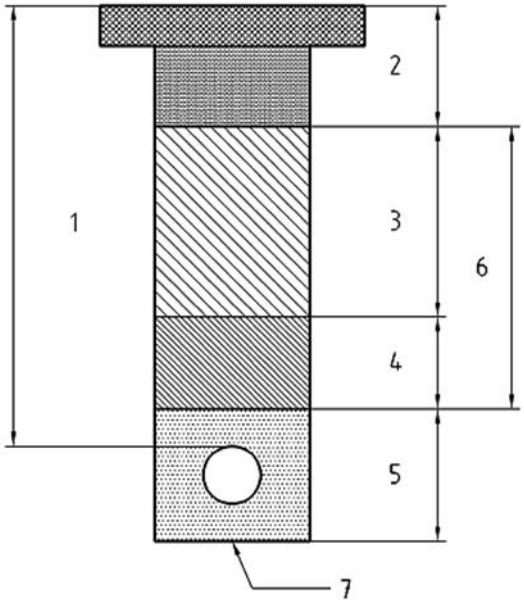
3.3. VALORISATION DES SÉDIMENTS EN REMBLAIEMENT DE TRANCHÉES

La norme NF P98-331 (AFNOR, 2005), relative à l'ouverture, au remblayage et à la réfection des tranchées distingue trois zones distinctes de remblaiement des tranchées, du bas vers le haut (Figure 8) :

- zone d'enrobage de la conduite ou du réseau ;
- partie supérieure de remblai ;
- partie inférieure de remblai.

Dans la zone d'enrobage, selon cette norme, la dimension maximale D des matériaux ne doit pas excéder 22 mm pour des réseaux de diamètre inférieur ou égal à 200 mm, et 40 mm pour des réseaux de diamètre supérieur à 200 mm.

Dans la zone de remblai proprement dit, cette dimension D ne doit pas excéder 10 % de la largeur de la tranchée et 20 % de l'épaisseur de la couche compactée.



Légende

1 Hauteur de recouvrement
2 Structure de chaussée (y compris revêtement)
3 Partie supérieure de remblai
4 Partie inférieure de remblai
5 Zone d'enrobage
6 Remblai proprement dit
7 Fond de tranchée

Figure 8 : Coupe type d'une tranchée (source AFNOR, 2005).

Pour les matériaux de classe F selon la norme NF P 11-300 (voir ci-dessus), ceux-ci doivent être non polluants et non agressifs pour les réseaux.

Les matériaux de classe F_1 ne sont pas cités par la norme NF P98-331 parmi les matériaux utilisables dans la zone d'enrobage ou dans la Partie Inférieure de remblai. Cette exclusion est due *a priori* à leur teneur en matière organique.

Les sols fins de classe A_1, A_2, et A_3 sous réserve de l'avis d'un géotechnicien, peuvent être utilisés dans la zone d'enrobage ou la Partie Inférieure de Remblai. Compte tenu de leurs

caractéristiques géotechniques, les sédiments de dragage correspondent à cette classe A selon la norme NF P11-300.

En Partie Supérieure de Remblai, la norme NF P98-331 exclu l'utilisation de sols de classe F_1 et A.

Il faut toutefois noter que la norme NF P98-331 cite l'utilisation, en zone d'enrobage et en remblais, de matériaux auto-compactant excavables. Ce sont des produits faiblement dosés en ciment, qui ne nécessitent pas d'action mécanique pour leur mise en œuvre. Leur mise en place se réalise grâce à leur fluidité importante, obtenue par une teneur en eau élevée (matériaux dits « essorables ») ou par l'utilisation d'adjuvants (matériaux « non-essorables »).

Il pourrait être envisagé d'élaborer des matériaux auto-compactant à partir de sédiments de dragage.

En synthèse, selon la norme NF P98-331, les sédiments de dragage, du fait notamment de leur teneur élevée en matière organique, ne sont pas valorisables en remblaiement de tranchées. Néanmoins, les matériaux de classe A_1 à A_3 auxquels ils correspondent d'un point de vue géotechnique sont utilisables dans la zone d'enrobage et dans la Partie Inférieure de Remblai des tranchées.

3.4. VALORISATION DES SÉDIMENTS EN GRANULATS POUR BÉTON

3.4.1. Classification des sédiments selon les normes « granulats »

Selon la classification de la norme NF P18-545 relative à la définition, la conformité et la codification des granulats (AFNOR, 2011a), et de la norme NF EN 12620 relative aux granulats pour béton (AFNOR, 2008b), les sédiments de dragage, compte tenu de leur granulométrie, sont des fillers : *« granulat dont la plupart des grains passe au tamis de 0,063 mm et qui peut être ajouté aux matériaux de construction pour leur conférer certaines propriétés »*.

Les fillers ont pour fonction de compléter la courbe granulométrique des bétons dans les éléments fins. Ils permettent d'améliorer certaines propriétés du béton, notamment : résistance à la ségrégation, résistance en compression, porosité réduite, état de surface.

La norme NF EN 12620 définit plus précisément les caractéristiques granulométriques d'un filler :

- passant à 2 mm : 100 % ;
- passant à 0,125 mm : 85 à 100 % ;
- passant à 0,063 mm : 70 à 100 %.

D'après Delcour et Lefebvre (2013), la norme EN 12 620 fait l'objet d'un projet de révision qui devrait clairement identifiés les matériaux de dragage comme matériaux sources des granulats (références H1 et H2). Les sédiments seraient découpés en deux références H1 pour les sables de dragage et H2 pour les argiles de dragage. Les sables pourront être utilisés pour la fabrication de béton mais les argiles, bien qu'identifiées, ne relèveraient pas du domaine d'application de la norme, car aucun antécédent d'utilisation n'a été recensé. À la parution de ce rapport, la norme 12 620 en vigueur est toujours dans sa version de 2008.

3.4.2. Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques physiques mentionnées par la norme NF EN 12620 pour les granulats de béton concerne essentiellement les graves et gravillons. Les points suivants sont applicables aux fillers.

Absorption d'eau, cycle gel-dégel

Selon la norme NF EN 12620+A1, un coefficient d'absorption d'eau inférieur à 1 % permet de considérer un granulat comme insensible à l'action gel-dégel. La résistance au gel-dégel d'un béton varie en fonction du degré de saturation en eau, du dosage et de la nature des éléments qui le constituent. La résistance au gel-dégel d'un béton peut être déterminée par essais sur éprouvettes, ainsi que des essais sur les granulats selon les normes EN 1367-1 ou EN 167-2 (essai au sulfate de magnésium). Ce dernier essai est recommandé lorsque le granulat doit être exposé à l'eau de mer (ouvrages portuaires par exemple) ou aux sels de déverglaçage (ouvrages routiers).

Stabilité volumique

Selon la norme NF EN 12620, si il existe un risque de dislocation du béton par fissures de retrait imputables aux granulats utilisés, le retrait au séchage des granulats doit être mesuré et être inférieur à 0,075 %. Le résultat doit être déclaré dans la fiche technique du produit.

Réaction alcali-silice

Cette réaction intervient entre les hydroxydes alcalins présents dans les fluides interstitiels du béton et certaines formes de silice ou de silicates des granulats. En présence d'humidité, elle peut conduire au gonflement, à la fissuration ou la rupture du béton.

La norme FD P 18-542 (AFNOR, 2004), relative à la qualification des granulats pour béton vis-à-vis de l'alcali-réaction, définit 3 classes de granulats selon ce critère : Non Réactifs (NR), Potentiellement Réactifs (PR) et Potentiellement Réactifs à effet de Pessimum (PRP). Selon cette norme, la démarche présentée en Figure 9 doit être appliquée pour qualifier les granulats vis-à-vis de l'alcali réaction. Elle doit être précédée d'analyses minéralogiques et pétrographiques visant à déterminer la réactivité des espèces minérales en présence. Parmi les espèces siliceuses, les silex et microquartz sont principalement recherchés. Des essais de qualification, basés sur l'expansion d'éprouvettes de mortier réalisées avec le granulat étudiés sont ensuite réalisés.

Il faut noter ici que cette norme ne cite pas les fillers parmi les granulats susceptibles d'être qualifiés vis-à-vis de l'alcali réaction.

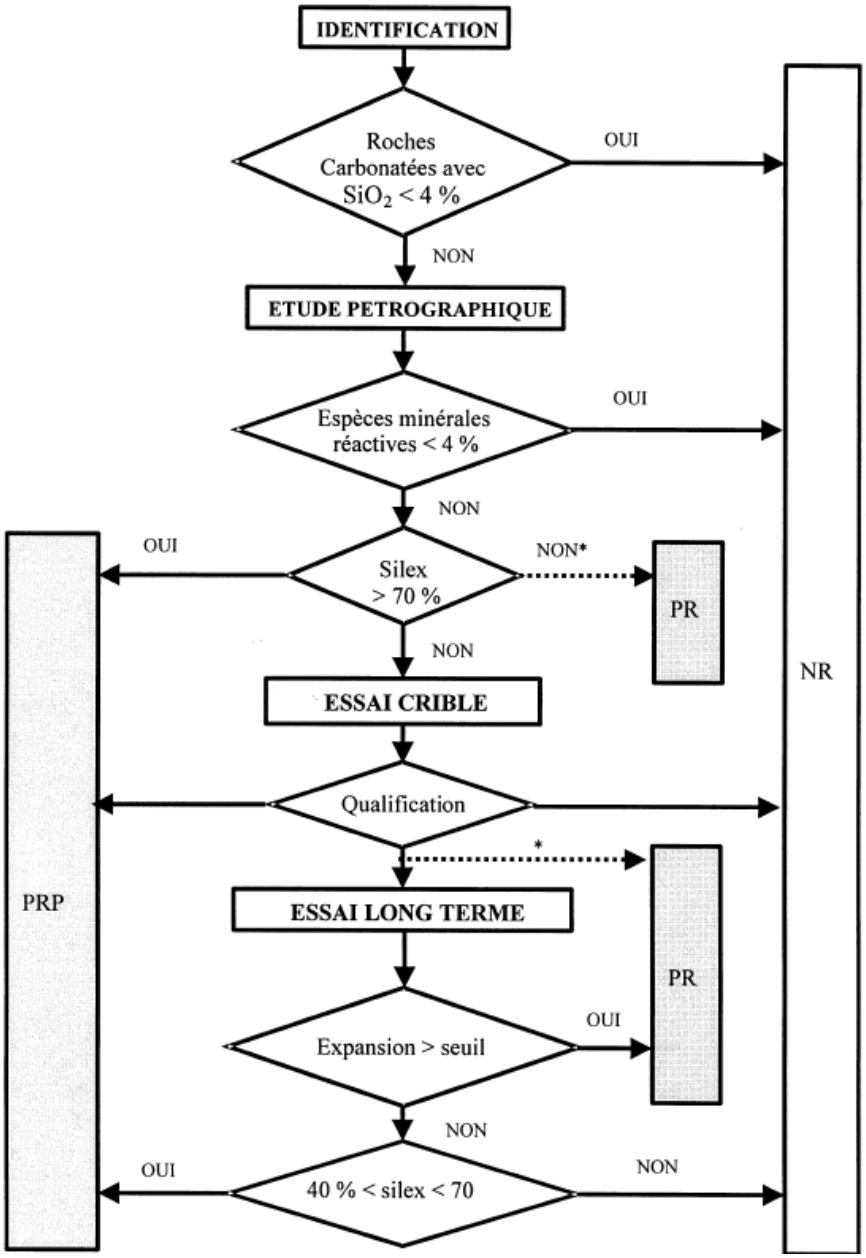


Figure 9 : Démarche de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction (source AFNOR).

3.4.3. Caractéristiques chimiques

Soufre et sulfates

Selon la norme NF EN 12620, la teneur en soufre total des granulats autres que les laitiers de hauts fourneaux refroidis par air ne doit pas excéder 1 % en masse. Si le souffre est présent sous forme de pyrrhotite (FeS), la teneur en soufre total ne doit pas excéder 0,1 % en masse.

Selon cette même norme, la teneur massique en sulfates solubles dans l'eau doit être déclarée.

Si la teneur en soufre total est supérieure à 0,08 % en masse, la norme NF EN 18-545 impose de déterminer la proportion de sulfates solubles dans l'acide (AS). Cette teneur doit être indiquée par un indice de classe sur la fiche technique du produit ($AS_{0,2}$, $AS_{0,8}$, $AS_{Déclarée}$).

Une teneur trop élevée en sulfates ou en composés soufrés susceptibles de s'oxyder en sulfates est susceptible de provoquer des désordres par gonflement du béton (formation d'éttringite).

Chlorures

La teneur des granulats en chlorures solubles dans l'eau doit être mesurée et déclarée si elle est supérieure à 0,01 % en masse. Elle est alors prise en compte pour un calcul de teneur totale des différents composants du béton en ion chlorures. Les chlorures, en proportion trop importante, peuvent notamment être à l'origine de la corrosion des armatures des bétons armés.

Selon la norme NF EN 206 (AFNOR, 2014), la teneur maximale en ion chlorures du béton peut atteindre 1 % pour des bétons non armés, mais est réduite 0,4 % pour des bétons armés et 0,2 % pour des bétons précontraints. Cette limitation est notamment à prendre en compte pour l'usage de sédiments marins, riches en chlorures, comme fillers pour bétons.

Matière organique

Selon la norme EN12620+A1, les « *granulats et fillers qui contiennent des matières organiques … dans des proportions telles qu'elles modifient le temps de prise et la résistance du béton doivent faire l'objet d'une évaluation visant à déterminer l'effet qu'ils produisent sur le temps et la résistance à la compression du béton* ». Cette évaluation est réalisée sur des éprouvettes de mortier réalisées avec ces matériaux.

Les granulats ou les fillers concernés ne doivent alors pas être utilisés dans des quantités telles que :

- le temps de prise des témoins de mortier est augmentée d'une durée supérieure à 120 mn ;
- la résistance à la compression à 28 jours des témoins de mortier n'est pas réduite de plus de 20 %.

3.4.4. Valorisation en granulats d'argile expansés

Compte tenu de leur composition minéralogique et de leur granulométrie (voir §3.1.2), les sédiments de dragage pourraient être valorisés en granulats d'argile expansés pour béton.

Selon la norme NF P 18-309 (AFNOR, 1982), ces granulats sont répartis en 3 classes (A, B, C) et correspondent à des granulats légers selon la norme NF EN 13055-1 (masse volumique inférieure à 2 t/m^3) (AFNOR, 2002).

Les classes A, B et C sont définies selon les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats et correspondent respectivement à des usages dans des bétons isolants porteurs, des bétons de structure de classe IV et V et des bétons de structure haute résistance de classe V.

Les caractéristiques géométriques, physiques, mécaniques et chimiques que doivent présenter les granulats d'argile expansés selon cette norme sont synthétisées dans le Tableau 3.

Catégories	Pourcentage maximal de grains cassés admissibles	
	En usine	Sur chantier
A-B	8 %	12 %
C	5 %	8 %
	Masse volumique en vrac, écart maximal avec la masse volumique nominale	
A	10 %	
B	8 %	
C	5 %	
	Coefficient d'absorption d'eau maximal	
	2 h	48 h
A-B	9 %	12 %
C	6 %	8 %
	Résistance mécanique	
A	n.c.	
B	5 Mpa	
C	7,5 MPa	
	Teneur en soufre total	
A-B-C	1%	
	Teneur en sulfure	
B-C	0,1 % si soufre total >0,3%	
	Impuretés	
A-B-C	Absence d'impuretés pouvant remettre en cause les propriétés du béton ou la conservation des armatures (chlorures, matière organique, …)	

Tableau 3 : Tableau de synthèse des propriétés des granulats d'argile expansés selon NF P 18-309 (AFNOR, 1982).

La présence de sulfure dans les sédiments de dragage sera à surveiller pour une telle voie de valorisation.

3.4.5. Synthèse sur la valorisation des sédiments en granulats pour béton

D'un point de vue normatif, les sédiments rentrent dans la catégorie des fillers. Leur utilisation dans les bétons n'est pas exclue par les normes relatives aux granulats. Ils doivent remplir, comme tout autre granulat, les conditions fixées par ces normes. Le cas échéant, une caractéristique qui ne serait pas satisfaite peut être compensée par la formulation du béton.

Les sédiments peuvent également être *a priori* utilisés comme matières premières pour la fabrication de granulats expansés mais en surveillant la possible présence de sulfures. Les caractéristiques que doivent présenter ces granulats selon la norme NF P 18-309 dépendent de la composition des matières premières, mais également du processus de fabrication et du contrôle qualité du produit fini.

3.5. VALORISATION DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE EN CLINKERS POUR CIMENT

3.5.1. Le clinker Portland

Selon la norme NF EN 197-1 (AFNOR, 2012a) relative à la composition, les spécifications et les critères de conformité des ciments courants, le clinker Portland est « *obtenu par calcination d'un mélange fixé avec précision de matières premières… contenant des éléments couramment exprimés en oxydes CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 … Le clinker Portland est un matériau hydraulique qui doit être constitué d'au-moins deux tiers en masse de silicates de calcium, la partie restante étant constituée de phases contenant de l'aluminium et du fer… Le rapport massique CaO/SiO_2 ne doit pas être inférieur à 2. La teneur en oxyde de magnésium (MgO) ne doit pas être supérieure à 5 % en masse ».*

3.5.2. Composition et notation des ciments courants

Selon la norme NF EN 197-1, les ciments à base de clinker Portland, dits ciments Portland, figurent dans les types normalisés suivants :

- CEM I : le ciment est composé de 95 à 100 % de clinker Portland, et de 0 à 5 % de constituants secondaires ;
- CEM II : ces ciments sont composés de 65 à 94 % de ciment Portland, de 0 à 5 % de constituants secondaires et d'une proportion variable de constituants principaux : laitier, fumée de silice, pouzzolane, cendres volantes, schiste calciné, calcaire, ou une composition de ces constituants principaux.

Les trois autres types de ciments courants ne sont pas des ciments Portland au sens normatif, mais contiennent néanmoins une part importante de clinker Portland :

- CEM III : ciment de haut fourneau, constitué de 5 à 89 % de clinker Portland, de laitier de haut fourneau (36 à 95 %) et de constituants secondaires (0 à 5 %) ;
- CEM IV : ciment pouzzolanique, constitué de 45 à 89 % de clinker Portland, de pouzzolane, cendres volantes et fumée de silice (11 à 55 %) et de constituants secondaires (0 à 5 %) ;
- CEM V : ciment composé, constitué de 20 à 64 % de clinker Portland, de pouzzolane et cendres volantes siliceuses (18 à 49 %) et de constituants secondaires (0 à 5 %).

Les ciments de type CEM I, III et IV peuvent présenter une résistance aux sulfates (type SR). La norme NF EN 197-1 définit alors des teneurs maximales en aluminium tricalcique (C_3A).

3.5.3. Exigences mécaniques, physiques, chimiques et de stabilité

En termes de résistance mécanique à court et long terme, de temps de prise et de stabilité dimensionnelle, les exigences définies par la norme pour les ciments de type CEM sont synthétisées dans le Tableau 4.

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa				Temps de début de prise	Stabilité (expansion)
	Résistance à court terme		Résistance courante			
	2 jours	7 jours	28 jours		min	mm
32,5 L [a)]	—	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 N	—	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	—				
42,5 L [a)]	—	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10,0	—				
42,5 R	≥ 20,0	—				
52,5 L [a)]	≥ 10,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45	
52,5 N	≥ 20,0	—				
52,5 R	≥ 30,0	—				
a) *Classe de résistance uniquement définie pour les ciments CEM III.*						

Tableau 4 : Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques (source AFNOR).

La matière organique présente dans les sédiments de dragage peut être à l'origine de retard de prise des ciments et de réduction de leurs performances mécaniques. Toutefois, il est peu probable que cette matière organique subsiste après la calcination des matières premières du clinker.

En termes de composition chimique, les exigences de la norme NF EN 197-1 pour les ciments courants sont définies dans le Tableau 5.

1	2	3	4	5
Propriété	**Référence de l'essai**	**Type de ciment**	**Classe de résistance**	**Exigences** [a]
Perte au feu	EN 196-2	CEM I CEM III	toutes classes	≤ 5,0 %
Résidu insoluble	EN 196-2 [b]	CEM I CEM III	toutes classes	≤ 5,0 %
Teneur en sulfate (SO_3)	EN 196-2	CEM I CEM II [c] CEM IV CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤ 3,5 %
			42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 4,0 %
		CEM III [d]	toutes classes	
Teneur en chlorure	EN 196-2	tous types [e]	toutes classes	≤ 0,10 % [f]
Pouzzolanicité	EN 196-5	CEM IV	toutes classes	satisfait à l'essai

a) Les exigences sont données en pourcentage en masse du ciment produit fini.

b) Détermination des résidus insolubles dans l'acide chlorhydrique et le carbonate de sodium.

c) Les ciments de type CEM II/B-T et CEM II/B-M avec T > 20% peuvent contenir jusqu'à 4,5 % de sulfate (SO_3) quelle que soit la classe de résistance.

d) Le ciment de type CEM III/C peut contenir jusqu'à 4,5 % de sulfate.

e) Le ciment de type CEM III peut contenir plus de 0,10 % de chlorure mais, dans ce cas, la teneur maximale en chlorure doit figurer sur l'emballage et/ou le bon de livraison.

f) Pour des applications en précontrainte, les ciments peuvent être produits selon une exigence plus basse. Dans ce cas, la valeur de 0,10 % doit être remplacée par cette valeur plus basse qui doit être mentionnée sur le bon de livraison.

Tableau 5 : Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques (source AFNOR).

Les ciments normalisés de type CEM sont notamment soumis à des exigences en termes de teneurs en sulfates et en chlorures. Pour rappel, les ions chlorures sont susceptibles de provoquer une corrosion des armatures des bétons armés, les ions sulfates peuvent être à l'origine de la dégradation des ouvrages en béton (formation d'éttringite gonflante).

Pour les ciments résistants aux sulfates, la norme NF EN 197-1 impose de plus une teneur maximale en aluminium tricalcique (C_3A) dans le clinker, dépendant de la classe du ciment : 0 à 9 %.

3.5.4. Synthèse sur la valorisation des sédiments de dragage en clinker Portland

D'un point de vue normatif, il n'y a pas de contre-indications à l'utilisation de sédiments de dragage pour la fabrication de clinker Portland. En fonction de leur minéralogie, ils pourront être utilisés seuls ou en mélange, notamment avec des carbonates. Ce mélange pourra de plus permettre d'ajuster aux seuils de la norme les teneurs en ions sulfates et chlorures, ainsi qu'en aluminium tricalcique, dans le produit fini.

3.6. VALORISATION DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE EN BRIQUES DE TERRE CUITE

Parmi les normes relatives aux briques de terre cuites utilisées dans le domaine de la construction, les documents suivants ont été analysés :

- NF EN 771-1 (AFNOR, 2011b). Spécification pour éléments de maçonnerie. Partie : briques de terre cuite ;
- NF EN 771-1/CN (AFNOR, 2012b). Spécification pour éléments de maçonnerie. Partie : briques de terre cuite. Complément national à la NF EN 771-1, 2011 ;
- NF P 13-304 (AFNOR, 1983). Briques en terre cuite destinées à être apparentes ;
- NF P 51-301 (AFNOR, 1974b). Briques de terre cuite pour la construction des conduits de fumée.

Aucune des normes consultées relatives aux briques en terre cuite ne précise la nature et la qualité attendue des matières premières utilisées pour la fabrication de ces matériaux.

Ces documents s'attachent à définir les caractéristiques et les tolérances géométriques, mécaniques et physiques, de ces matériaux en fonction de l'usage auxquels ils sont destinés, ainsi que les normes d'essais relatives à ces caractéristiques :

- caractéristiques géométriques : dimensions, planéité des faces de pose, parallélisme des faces, configuration (pleines, perforées, creuses, …) ;
- caractéristiques physiques : masse volumique sèche (apparente et absolue), résistance thermique, perméabilité à la vapeur d'eau, dilatation due à l'humidité, réaction au feu, teneur en sels solubles actifs ;
- caractéristiques mécaniques : résistance à la compression, adhérence.

Les caractéristiques initiales (granulométrie, minéralogie, composition chimique) de la matière première constitutive des briques, en l'occurrence des sédiments de dragage, ne permettent pas de préjuger des performances d'un matériau manufacturé, celles-ci dépendant intiment de la méthodologie de fabrication.

Toutefois, la teneur en sels solubles actifs, mentionnée par les normes NF EN 771-1 et NF P 13-304, peut être prise en compte à partir des caractéristiques de la matière première.

Les sels cités par ces normes sont les sulfates de magnésium, de potassium et de sodium, qui peuvent réagir avec l'aluminate tricalcique du mortier et provoquer des désordres (altération des briques, du mortier ou de l'enduit de surface).

Afin de s'affranchir de ces désordres, la norme NF EN 771-1 prévoit, en fonction des conditions d'exposition à l'eau et de protection des briques, trois classes (S0 à S2) correspondant à des concentrations massiques maximales pour les ions Na^+, K^+ et Mg^{2+} (Tableau 6).

Catégorie	Pourcentage total en masse inférieur ou égal à	
	$Na^+ + K^+$	Mg^{2+}
S0	Pas d'exigence	Pas d'exigence
S1	0,17	0,08
S2	0,06	0,03

Tableau 6 : Catégories des teneurs en sels solubles actifs (source AFNOR).

Dans le cas précis des briques destinées à être apparentes, une teneur trop importante de ces sels peut provoquer l'apparition d'efflorescences en surface, qui proviennent de la cristallisation de ces sels, lors d'une période de séchage consécutive à une période d'humidification (Figure 10).

Figure 10 : Exemple d'efflorescences sur des briques non protégées.

Les sels solubles mentionnés par les normes NF EN 771-1 et NF P13-304 sont potentiellement présents dans les sédiments de dragage, notamment dans les sédiments marins. Ceci n'exclut pas leur utilisation pour la fabrication de briques en terre cuite, ces concentrations pouvant être corrigée par mélange préalable des sédiments avec une matière première (argile) faiblement concentrée en ces mêmes sels.

En synthèse, compte tenu de leur composition minéralogique, les sédiments de dragage peuvent être envisagés en tant que matière première pour la fabrication de briques en terre cuite. Le produit fini devra répondre aux exigences des normes en vigueur, notamment pour ce qui concerne la teneur en sels solubles actifs.

4. Retour d'expérience concernant la valorisation des sédiments en génie civil

La recherche de procédés visant à utiliser les sédiments dragués de granulométrie fine pour la fabrication de produits pour le BTP et les aménagements urbains a permis de tester des formulations relativement nombreuses (projets SEDIBET, SEDIMARD, SEDIVALOR…). Elle se poursuit actuellement et plusieurs projets de recherche sont menés pour la fabrication de béton à base de sédiments fluviaux et marins (enrochements de berges, acropodes marins, etc.).

Des initiatives visant à faire émerger des filières de gestion et de valorisation à terre de sédiments ont également vu le jour comme SEDIMATERIAUX[6]. Elles peuvent également prendre la forme de journées techniques organisées localement, et généralement portées par un pôle de compétitivité.

4.1. VALORISATION DES SÉDIMENTS EN GRANULATS POUR BÉTON ET ASSIMILÉ

Cette valorisation concerne soit la fraction sableuse des sédiments obtenue après séparation granulométrique, soit le sédiment fin dans son ensemble qui est alors utilisé comme filler (voir paragraphe 3.4.1).

Le port de Dunkerque commercialise chaque année entre 200 et 500 000 m^3 de sable issu des travaux d'entretien qui peuvent être utilisés dans la fabrication de béton.

Des projets de routes utilisant des sédiments comme filler avec liant hydraulique font l'objet d'un suivi environnemental et géotechnique actuellement (« route Freycinet » projet Sédimatériaux du Grand Port Maritime de Dunkerque et projet SETARMS). Cette valorisation et ces expérimentations sont facilitées par le fait que les lieux de valorisation sont sur le domaine du port (Lalaut, 2014 ; Raison, 2010). Les données précises sur le comportement géotechniques à l'usage de cette route ne sont pas disponibles.

D'autres études montrent que la salinité élevée diminue la résistance mécanique des ciments réalisés à base de sédiments marins (Kaushik et Islam, 1995). Pour cette raison, Siham *et al.* (2008) utilisent de la chaux pour diminuer l'effet du sodium, augmenter la siccité des sédiments dragués et stabiliser la matière organique. D'autres ajouts de sable puis de ciment portland sont réalisés pour obtenir les qualités nécessaires pour un usage routier intense (couche de base sur laquelle repose le bitume et couche de fondation sur laquelle repose la couche de base). Au final, le produit fabriqué contient 27 % de sédiment fin dragué (grain < 63 µm à 90 % - chaulé à 4 %), 67 % de sable et 6 % de ciment (équivalent sec).

[6] Pour plus de détails voir : http://www.cd2e.com/recyclage-valorisation/projet-sedimateriaux

Toujours dans le cas des formulations pour matériaux routiers, des essais de mélange ont montré que des sédiments traités par le procédé Novosol®[7], diminuaient l'élasticité des matériaux de manière linéaire avec les teneurs incorporées (Han, 2010 ; Agostini, 2006). Toutefois la résistance à la compression et à la traction étaient d'abord améliorées (quelques pourcents) pour des apports compris entre 5 et 20 % de sédiments traités, puis chutaient au-delà (Han, 2010). Ces résultats s'expliqueraient par la mauvaise résistance des granulats que constituent les matériaux traités. Le gain apporté par des mélanges en proportions limitées serait dû à l'effet filler[8] dû aux fines apportées (augmentation de la compacité du squelette), à une hydratation du ciment optimisée (sites de nucléation plus nombreux grâce à la présence des fines) et à une meilleure compatibilité mécanique entre les granulats et la pâte réduisant les risques de fissuration lors de la prise et du séchage.

La matière organique présente dans les sédiments de dragage peut être à l'origine de retard de prise des ciments et de réduction de leurs performances mécaniques (voir paragraphe 3.4.3).

La fabrication de béton utilisant des sédiments comme granulat est donc envisageable mais pour des applications hors structure. Il s'agira essentiellement de sous-couche de forme pour les voies de circulation. À noter que le port de Dunkerque expérimente avec ses partenaires, l'incorporation de sédiments dans du béton pour la réalisation de bloc de protection des digues (Figure 11).

Figure 11 : Blocs de béton réalisés avec des sédiments non-immergeables traités (droite : port de Dunkerque, gauche : rade de Toulon).

Mais, progressivement, des sociétés privées comme la société Néo-Eco Recycling (implantée dans le nord de la France (http://neo-eco.fr/sediments/) proposent d'accompagner les producteurs de boues de dragage dans la valorisation des sédiments en technique routière et pour la fabrication de bétons innovants. La prestation proposée se veut complète en prenant en charge l'ensemble des étapes permettant la valorisation des boues. Elle est présentée en ces termes sur le site internet de la société :

[7] Le procédé NOVOSOL® a été développé par la société Solvay. Il consiste en une première étape de phosphatation des sédiments dragués suivi d'une calcination à 650 °C. La première étape permet la formation de minéraux phosphatés très peu solubles intégrant dans leur réseau la plupart des éléments traces disponibles tandis que la seconde minéralise la matière organique dont certains contaminants (hors persistants ce qui oblige le traitement des fumées) et stabilise les phosphates néoformés au cours de la première étape. Le procédé est relativement cher. Il est appliqué actuellement par la S.A. SEDISOL, résultant d'un partenariat entre la SPAQuE S.A. (entreprise de dépollution des sols), ECOTERRES S.A. et le Port Autonome de Charleroi, en vue de valoriser après traitement des sédiments de catégorie B en Wallonie, mais amputé de sa phase 2. Son application à des sédiments de canaux du nord de la France est actuellement à l'étude (programme SEDIVALOR).

- *« prélèvements, caractérisations de formulations de coproduits ;*
- *organisation et suivis de coproduits ou de planches expérimentales ;*
- *recherche de partenaires en filière avale : utilisateurs potentiels des matières produites ;*
- *suivi environnemental des sédiments valorisés : écotoxicité, effet de relargage sur le vivant, impact sur la faune et la flore, caractérisation physico-chimiques, caractéristiques mécaniques, lixiviation, minéralogie, analyses radio-écologiques ».*

On notera le choix des termes « coproduits » et « matières » préférés à celui de « déchets » dans un objectif de pédagogie auprès des futurs acteurs de ces filières naissantes. Née startup en 2008, la société Néo-Eco Recycling qui comptait 20 salariés en 2014, s'est rapprochée du groupe Beaudelet Environnement (250 salariés en 2014, qui détient 49 % des parts de Néo-Eco) qui dispose des outils industriels de traitement des matériaux en vue de leur valorisation. Cette dimension montre une bonne organisation des entreprises en région Hauts-de-France pour répondre à une éventuelle demande de valorisation des sédiments dragués si celle-ci s'avère par ailleurs économiquement et réglementairement stabilisée. Actuellement, ces 2 sociétés proposent une large gamme de solutions pour une large gamme de déchets (mâchefers, DEEE, pneumatiques, déconstruction des bâtiments, …). Le chiffre d'affaire généré par la valorisation des sédiments n'est pas connu mais semble encore relativement faible par rapport aux autres filières proposées.

4.2. VALORISATION DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE EN CLINKERS POUR CIMENT ET ASSIMILÉ

L'utilisation des sédiments non plus comme granulat mais comme matière première pour la fabrication du clinker a également fait l'objet de recherche (Aouad *et al*., 2012). Généralement élaborer à partir de marnes (roches meubles constituées de calcaire et d'argile), le clinker est le résultat d'une calcination à 1 450 °C de la roche. Cette dernière doit contenir environ 75 % de calcaire et 25 % d'argile. La montée en température induit la formation de quatre grandes phases cristallines caractéristiques de la chimie du ciment. Elles sont en moyenne les suivantes :

- C3S : silicate tricalcique (SiO_2 – 3 CaO) : 50 à 65 % ;
- C2S : silicate bicalcique (SiO_2 – 2 CaO) : 15 à 20 % ;
- C3A : aluminate tricalcique (Al_2O_3 – 3CaO) : 5 à 15 % ;
- C4AF : ferro-aluminate tétracalcique (Al_2O_3 Fe_2O_3 – 4 CaO) : 5 à 10 %.

Réduit en poudre puis mélangé à du gypse et divers autres adjuvants, le clinker constitue le ciment Portland. Les oxydes anhydres du clinker seront à l'origine de la prise en masse du ciment par hydratation et carbonatation.

Aouad *et al.* (2012) montrent au laboratoire qu'un sédiment issu des canaux du nord de la France, corrigé par divers ajouts, permet d'obtenir un ciment aux qualités comparables à celles des formulations commerciales. Le taux final de sédiment incorporé est de 39 % de la masse totale de matériaux, calculé sur la base des caractéristiques de ce dernier et des divers indices nécessaires à la formulation du clinker. Des ajouts très spécifiques comme de l'alumine pure (Al_2O_3), de l'hématite (Fe_2O_3) et du carbonate de calcium ont par exemple, été effectués.

Dalton *et al.* (2004) obtiennent également des résultats très satisfaisants en ce qui concerne la qualité des ciments Portland fabriqués à partir de clinker contenant entre 1 et 12 % en masse de sédiments marins issus du port de New-York (USA). Ces auteurs estiment toutefois qu'une température de calcination plus élevée est nécessaire pour transformer le quartz du sédiment en silice amorphe. Le chlore contenu dans les sédiments marins peut avoir une incidence forte

sur la qualité du clinker. Gadayev et Kodess (1999) montrent que la présence de cet élément (et de sulfite) au cours de la montée en température élimine des cations alcalins par volatilisation diminuant ainsi la quantité de chaux active (CaO) et corrélativement le rapport CaO/SiO_2. Cl et SO_3 sont de plus incorporés dans la structure des minéraux du clinker ce qui diminue leur réactivité (et donc leur capacité d'hydratation). Il en résulte un ciment de moindre résistance. Les chlorures alcalins volatilisés ($CaCl_2$, NaCl et KCl) précipitent dans les conduites d'évacuation des fumées des usines de fabrication ce qui augmente les coûts de maintenance. Enfin, les chlorures peuvent être à l'origine de la corrosion des aciers des armatures des bétons. Dalton *et al.* (2004) estiment que ces inconvénients peuvent être surmontés (effet Cl et plus forte T° de chauffe) si l'incorporation de sédiment ne dépassent pas quelques % du total (entre 3 et 6 %). Ils reconnaissent toutefois une augmentation des coûts de maintenance des installations et proposent de les compenser par une taxation des volumes de sédiments traités.

D'après Semcha (2006), les sédiments calcinés vers 700 °C peuvent constituer un pôle silico-alumineux en remplacement d'une part, du ciment à hauteur de 30 % et d'autre part, en substitution à des pouzzolanes naturelles dans la formulation de bétons. La montée en température transforme les structures argileuses stables en structures amorphes, assurant la réactivité pouzzolanique recherchée pour les substitutions envisagées. Scordia (2008) montre également que des sédiments traités par le procédé Novosol® acquièrent des qualités pouzzolaniques et, après mélange avec des liants hydrauliques comme la chaux vive, peuvent être utilisés en couche de forme dans les travaux routiers.

Techniquement, cette filière est donc également envisageable. Toutefois, les sédiments sont alors en concurrence avec des ressources naturelles largement disponibles pour le fabricant de ciment dont l'usine jouxte très généralement la carrière de marne. Entre le dragage, la déshydratation puis le transport des sédiments vers la cimenterie, on voit mal comment cette filière pourrait être économiquement viable.

4.3. VALORISATION DES SÉDIMENTS POUR LA FABRICATION DE BRIQUES ET DE GRANULAT EXPANSÉS

Dans la même idée que dans la fabrication du clinker, les sédiments peuvent constituer des substituts aux matériaux naturels pour la fabrication de briques ou de tuiles. Certains ont des compositions minéralogiques proches des matériaux généralement utilisés (argiles, fondant type feldspath et filler généralement constitué de quartz). La température de chauffe se situe aux alentours de 1 100 °C qui correspond à la température de frittage. Au cours du procédé, la périphérie de certains minéraux entre en fusion ce qui a pour effet de souder les grains entre eux par l'intermédiaire de la phase vitreuse produite.

L'utilisation des sédiments d'origine diverses pour la fabrication de briques a été expérimentée par plusieurs auteurs (Mezencevova *et al*., 2012 ; Chiang *et al*., 2008 ; Hamer et Karius, 2002). La plupart des travaux concluent à une qualité très satisfaisante des produits fabriqués. Des résultats satisfaisants ont été obtenus par Semcha (2006) à l'échelle du laboratoire sur des sédiments du barrage de Fergoug (Algérie). Ces auteurs soulignent par ailleurs l'économie de concassage, de tamisage et de lavage que procure l'utilisation des sédiments par rapport aux matériaux classiques (matériaux naturellement classés par la rivière). Hamer et Karius (2002) ont rencontré des problèmes d'efflorescence sur les briques et un dégagement de SO_2 lors de leur fabrication mais ces inconvénients peuvent être éliminés par un traitement des gaz pour le dernier et l'ajout de certains additifs pour le premier. En 2010, la société VBC3000 proposait en France, la fabrication de céramique à partir d'un mélange d'argiles, de sédiments de curage et de boues organiques issues du traitement des eaux usées. Une usine de production devait voir le jour à Port-Jérôme (76) en 2011, et 3 autres projets étaient à l'étude en 2010 (Sévèque, 2010). À notre connaissance, ces projets n'ont malheureusement pas pu voir le jour.

Les principaux freins à cette filière seraient d'une part les coûts de fabrication, *a priori* plus élevés que les briques « classiques » et d'autre part, le problème d'image du produit fabriqué à partir de sédiments de dragage. En Flandres, Cappuyns *et al.* (2015) montrent que les craintes des potentiels acheteurs sont liées à la fiabilité et la durabilité dans le temps des « sédibriques » ainsi qu'au risque de transfert des contaminants qu'elles peuvent contenir. Sur 434 personnes interrogées, environ 40 % ont un *a priori* négatif à très négatif. Les auteurs concluent à un besoin de communication intense pour rendre cette filière viable.

Dans le cadre du projet VAMORAS du port d'Anvers en Belgique (Dockx et Vandekeybus, 2012), la viabilité économique de la fabrication de briques et de granulats d'argile expansés contenant, respectivement 10 % et entre 10 % et 25 % de sédiment fin en substitution de l'argile crue, pourrait être atteinte mais, elle est encore très dépendantes des contraintes imposées par le contexte local (correction de la qualité des matériaux, transport, concurrence local en produit, maintenance renforcée pour gérer les chlorures,…) (CEAMAS, 2015).

D'une manière générale, les produits fabriqués expérimentalement ou à l'échelle pilote ont les qualités requises pour l'usage prévu, mais le passage à l'échelle industrielle se heurte très généralement au coût financier et/ou à la difficulté d'écouler sur le marché des produits fabriqués à partir de déchets contaminés. Dans ces conditions, la plupart des collectivités privilégient des solutions moins techniques, demandant des transformations des sédiments plus limitées comme l'utilisation en remblais.

4.4. VALORISATION DES SÉDIMENTS EN AMÉNAGEMENT, RÉHABILITATION DE SITE ET AGRICULTURE

Depuis les recommandations du Grenelle de la Mer et plus généralement, l'encouragement des services de l'État à valoriser les sédiments de dragage, les initiatives de la part des collectivités se multiplient. À titre d'exemple, le Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon (SIBA) étudie actuellement la création d'une installation de transit avant valorisation des sédiments de dragage sur la commune d'Arès. Les pistes explorées pour le réemploi des sédiments de dragage, sont :

- la création de support de culture ;
- l'épandage en forêt ;
- l'utilisation comme remblai lors de travaux d'assainissement.

Les aménagements paysagers en milieu industriel et urbain constituent déjà des débouchés potentiels pour les boues de dragage, comme l'épandage en milieu agricole d'ailleurs.

Le port de Dunkerque mène actuellement un projet de renaturalisation sur son territoire à l'aide de buttes paysagères végétalisées. Ces buttes ont vocation à constituer des « noyaux de biodiversité inscrits au Schéma Directeur du Patrimoine naturel du port » (Figure 12) (Lalaut, 2014 ; Raison, 2010). Elles ont été réalisées à partir de sédiments non dangereux, non immergeables, non inertes (environ 300 000 m^3 de sédiment ont été utilisés). Ce projet fait l'objet d'un suivi environnemental dans le cadre du programme Sédimatériaux.

Figure 12 : Réutilisation des sédiments non-immergeables traités du port de Dunkerque en aménagement paysagé (Lalaut, 2014).

Des sédiments fluviaux sont régulièrement utilisés pour la couverture d'installation de stockage de déchets et peuvent l'être également dans le cadre de réhabilitation de friches polluées. Ils ont notamment été utilisés comme matériaux de confinement et de remodelage du site PCUK de Wattrelos (59) en 2010 pour la requalification de la friche industrielle polluée en prairie de fauche (15 ha) et en zone humide (25 ha).

Les gestionnaires de voies d'eau les utilisent également fréquemment pour la réfection des berges. Pour des réhabilitations avec usage sensible, de type agriculture, habitation ou activités tertiaires, la valorisation de sédiments est parfaitement envisageable tant que les règlementations sont respectées : épandage agricole des boues pour les premiers, « compatibilité d'usage » pour les seconds (voir chapitre 6 concernant la réglementation en France). Par exemple, les matériaux excavés en vue de mettre en place une réserve d'eau utilisée pour chasser les sédiments de la baie du Mont-Saint-Michel en 2014 près de l'embouchure du Couesnon, ont été utilisés pour rehausser d'un mètre environ les parcelles des polders environnant (Figure 13). Dans de tels contextes, les questions de la contamination des sédiments et de leurs teneurs en sels sont évidemment centrales.

Figure 13 : Réhaussement de parcelles agricoles à l'embouchure du Couesnon (50, France) dans le cadre des travaux de désenvasement du Mont-Saint-Michel en 2014.

Jusqu'à présent ces voies de valorisation étaient étudiées au cas par cas avant chaque opération de dragage. Récemment, le besoin de rendre pérenne les filières de valorisation, encouragé par l'évolution de la réglementation sur les ICPE, implique la réalisation de plateformes fixes de regroupement et de traitement avant valorisation des sédiments à l'image du SIBA précédemment cité. Voies Navigables de France mène actuellement cette réflexion en région Hauts-de-France. HAROPA-Port de Rouen développe depuis 2010 sa stratégie de valorisation des sédiments qui se basera à termes sur 5 plateformes de transit réparties le long de la Seine entre Honfleur et Rouen, et sur le remblaiement des ballastières d'Yville-sur-Seine (Figure 14). Au total, HAROPA-Port de Rouen entend ainsi valoriser 3,5 Mm^3 en BTP (remblaiement et technique routière essentiellement) et pour la création de zones humides dans les anciennes ballastières, sur les 7 Mm^3 de sédiments dragués pour l'entretien et les prochains travaux d'agrandissement. Les 3,5 Mm^3 restant seront clappés en mer. On notera que cette stratégie à présent bien établie, concernent des sédiments en majorité composés de sables grossiers, de limons fins et sable fins. Ils respectent les critères d'admission des déchets inertes en ISDI (installation de stockage de déchets inertes) ce qui facilite, dans les faits, leur valorisation dans les filières du BTP (et bien que ces critères n'aient pas été définis dans un tel contexte). Il est généralement plus difficile de valoriser des boues de dragage au sens strict, défini au paragraphe 2.1 de ce document.

Figure 14 : Schéma d'implantation des installations d'HAROPA - Port de Rouen pour la gestion des sédiments de dragage (source : http://www.haropaports.com/).

4.5. COMPORTEMENT DES POLLUANTS AU COURS DE LA VALORISATION

Le devenir des contaminants au cours de la valorisation est une question centrale. Les procédés thermiques offrent l'avantage de minéraliser la plupart des composés organiques s'ils sont portés à des T° suffisantes (dans le cas contraire, un traitement des fumées s'impose) (Wijesekara *et al*., 2007). Ils sont également considérés efficaces pour piéger la plupart des éléments traces minéraux (Corrochano *et al* ., 2011 ; Zhang *et al*., 2009 ; Wijesekara *et al*., 2007). Ndiba *et al*. (2008) montrent par exemple que le traitement thermique à 700 °C, couplé à l'adjonction de 2,5 % d'acide phosphorique, transforme la spéciation du Zn d'un pôle carbonate + association avec des hydroxydes de fer, en un pôle constitué de gahnite ($ZnAl_2O_4$), de franklinite ($ZnFe_2O_4$) et d'hopeite ($Zn_3(PO_4)_2$), minéraux très peu solubles.

Hamer et Karius (2002), mais aussi, Cappuyns et Swennen (2009), mettent toutefois en évidence une part significative lixiviable de certains éléments comme As, V et Cr des briques fabriquées à partir des sédiments contaminés.

Lors d'essais au laboratoire, Zhang *et al*. (2009) soulignent la perte par volatilisation de la totalité du mercure contenu dans le sédiment initial dès 500 °C et constate la perte de plus de 10 % du Cd à 800 °C. Le traitement des fumées peut donc s'avérer nécessaire en fonction des matériaux traités.

Les essais de lixiviation sur des sédiments stabilisés avec des liants hydrauliques dans le cas de la fabrication de béton montrent généralement des niveaux bas, conformes aux seuils fixés par les diverses autorités (Mézazigh S. et Silitonga, 2011 ; Said *et al*., 2015). Ce piégeage peut être dû à la formation de minéraux qui incorporent les contaminants dans leur réseau ou à un piégeage « physique » dû à la précipitation de ces minéraux autour des contaminants (notamment organiques) (Hale *et al*., 2012). Dans le cas de la route Freycinet du port de Dunkerque, les essais du guide SETRA (2011) ont été réalisés et n'ont pas montré de dépassement pour les contaminants (Herman *et al*., 2014). Les problèmes sont plutôt liés à la conductivité trop élevée des lixiviats en lien avec l'origine marine des sédiments.

Dans le cas des buttes paysagères et l'utilisation des sédiments dragués non modifiés en construction de sols, l'oxydation progressive peut être à l'origine d'une plus grande mobilité des contaminants comme évoqué au paragraphe 2.3.3. Une étude sous l'égide du ministère en charge de l'Environnement est actuellement en cours, en France, pour préciser l'impact potentiel des sédiments utilisés pour ce type d'usage.

4.6. DES FILIÈRES À INTÉGRER DANS DES MARCHÉS

Cette revue de la littérature technique montre que les solutions pour la valorisation des sédiments fins, même contaminés, dans le domaine du génie civil et de l'aménagement, ne manquent pas. Pourtant, l'application industrielle de ces résultats de recherche reste très limitée soit parce qu'ils ne sont pas accompagnés d'une étude socio-économique suffisante, soit, au contraire, parce que cette dernière a montré la non viabilité de la filière, soit, encore, parce que l'un des acteurs nécessaires au succès de l'opération est absent (généralement un maître d'ouvrage ou un maître d'œuvre). À titre d'exemple, le devenir des sédiments dragués de Voies Navigables de France en 2009, au niveau national, est présenté Figure 15 (Prévost, 2010). Il montre que les trois voies de valorisation utilisées sont le renforcement de berges, le remblaiement de carrière et l'amendement des sols. Aucune filière à forte technicité (technique routière, fabrication de matériaux, …) n'est pour l'instant mise en place.

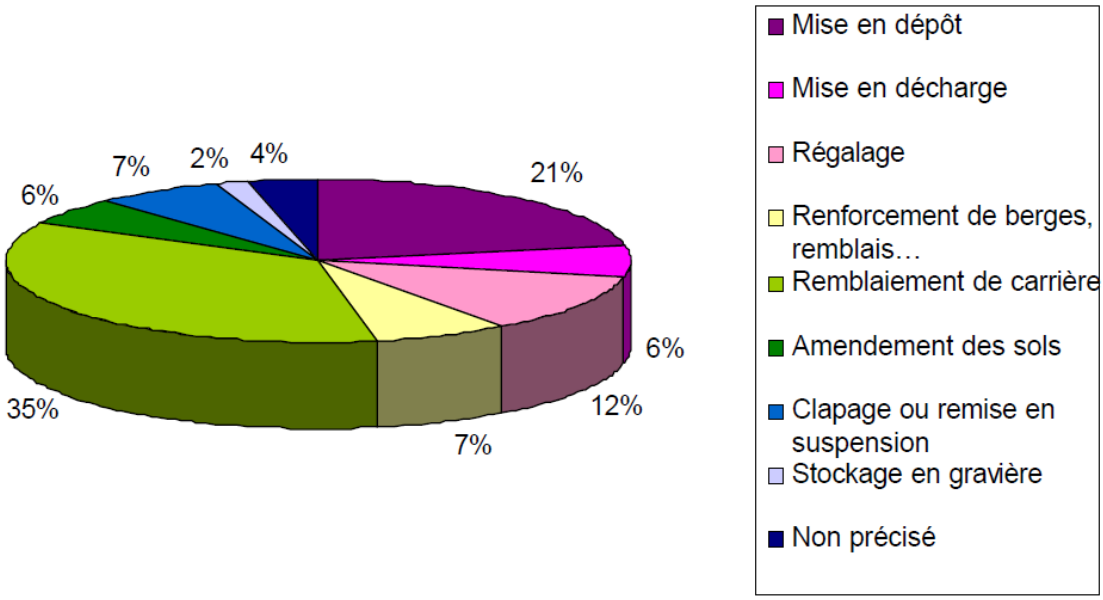


Figure 15 : Devenir des sédiments dragués de VNF en 2009 - % du volume (Prévost, 2010).

Dans le cas de substitutions aux matériaux naturels pour la fabrication de béton et de briques, il n'existe pas à l'heure actuelle, à notre connaissance, d'usine opérationnelle à travers le monde.

Il y a donc pour le moment peu de retour concernant le comportement à long terme des ouvrages fabriqués avec des sédiments de dragage.

Une fois les contraintes techniques maitrisées, il apparaît indispensable de satisfaire d'autres critères en vue de garantir le succès de la filière de valorisation :

- proposer des coûts de production proportionnés aux enjeux, et tenant compte de la compétition avec des matériaux primaires souvent peu onéreux ;
- s'assurer de l'existence d'un marché capable d'absorber la production en tenant compte des possibles lobbyings si le produit recyclé est en concurrence avec des matériaux primaires ;
- assurer la pérennité de la filière grâce à une bonne connaissance du « gisement » de sédiments dragués (quantité et qualité) ;
- maîtriser les aspects juridiques : responsabilité du producteur du déchet, autorisation légale d'exploitation et de modalité de réutilisation des matériaux ;

- s'assurer de l'acceptabilité sociale du matériau produit qui peut souffrir de son image de déchet potentiellement contaminé.

Ces points font l'objet d'une attention toute particulière dans le cadre des projets de mise en place de plateformes de regroupement et de traitement avant valorisation des sédiments, évoquées au paragraphe 4.4.

Actuellement, il semble que les atouts que présente la valorisation (préservation des ressources, moindre impact environnemental, source abondante de matériaux, …) pèsent assez peu face à ceux des filières classiques. Ces dernières sont bien implantées et parviennent encore à fournir un matériau naturel de qualité garantie à un coût souvent inférieur au prix de revient de celui des sédiments dragués à des fins d'entretiens du réseau navigable (ports et voies d'eau). Dans ces conditions, les industriels sont réticents à modifier leur procédé bien éprouvé tout en risquant la fabrication d'un produit de qualité perçue moindre.

Un espoir toutefois : le marché des granulats est un marché local, ce qui peut justifier le recyclage de matériaux produits localement à un coût plus élevé si une économie peut être faite sur le transport. De plus, des demandes de permis de recherche de gisement de granulats marins de grande ampleur au large des côtes françaises sont déposés laissant augurer une augmentation de la demande dans certains secteurs du littoral (Augris et Simplet, 2013). Dans le cadre de l'élaboration de la « Stratégie nationale pour la gestion durable des granulats terrestres et marins et des matériaux et substances de carrière » des Ministères de l'industrie et de l'Environnement, la place des sédiments dragués pour entretien dans cette stratégie, serait à étudier.

Même fournis gratuitement au maître d'œuvre, les sédiments dragués souffrent d'une image négative en raison de leur statut de déchet et, surtout, de leur réputation, relativement justifiée, de « concentrateur » de contaminants (voir paragraphe 2.3.3). L'impact du statut de déchet sur les voies de valorisation sera discuté plus en détail au paragraphe 6.4, à la lumière des approches réglementaires des pays voisins.

Concernant la qualité des sédiments, tous ne sont pas contaminés mais la forte médiatisation de certaines situations critiques comme les interdictions de pêche à partir de 2008 en France suite à la contamination diffuse des rivières par les PCB, ternit fortement l'image de ces matériaux auprès du grand public. Ce déficit d'image se répercute sur les produits fabriqués : la valorisation pour la fabrication de brique, expérience tentée en Allemagne avec l'usine METHA, a par exemple reçu un accueil très négatif sur le plan sociétal et a dû être abandonnée faute de débouchés des produits (voir aussi l'étude de Cappuyns *et al*., (2015) évoquée au paragraphe 4.3). De plus, les procédés thermiques sont rapidement assimilés par les riverains à de l'incinération de déchets contaminés et la possible émission de polluants (dont dioxines) qui s'y rattache.

En pratique donc, les alternatives au clapage ou au confinement à terre des sédiments de dragage sont pénalisées par un prix de revient élevé rapporté à la tonne de sédiment, et à un déficit d'image. Sans politique incitative et approche communicationnelle adaptée, ces filières ne peuvent être compétitives face à la filière d'élimination classique. L'incitation pourrait prendre la forme d'une obligation de recyclage, imposée par un maître d'ouvrage via son cahier des charges, ou d'une subvention des Agences de l'Eau, par exemple, à partir d'un fond alimenté par des redevances sur les volumes d'eau prélevés dans le milieu naturel. S'agissant d'un bien commun pour lequel l'application du principe pollueur/payeur est délicat compte tenu de la difficulté d'identifier le premier, cette redevance ne paraît pas injuste en soit d'autant que dans une certaine mesure, c'est l'ensemble de l'activité humaine qui est responsable de cette contamination. Elle donnerait un peu de ressource à une activité non viable économiquement et à fort enjeu de développement durable. Cette option figure parmi les recommandations du grenelle (recommandations n° 36 à 39). Le déficit d'image a

également été souligné par le Grenelle qui préconise la création de labels et la mise en place d'actions de communication (recommandation n° 24). Nous verrons ci-dessous que le problème est profond et qu'il pourrait demander une révision de l'approche française pour que le sédiment de dragage soit considéré comme une ressource et non comme un déchet à éliminer.

5. État des lieux de la valorisation à terre des sédiments en Europe : approche réglementaire

La question de la valorisation à terre des sédiments dragués concerne la plupart des pays industrialisés et notamment européens (Brils *et al*., 2014 ; Netzband *et al*., 2007) mais à des niveaux d'urgence différents. Certains pays comme les Pays-Bas et la Belgique ont pris des mesures en vue de la favoriser afin de faire face à des contraintes géographiques et environnementales majeures.

Les paragraphes ci-dessous exposent les différentes approches adoptées par les pays européens particulièrement concernés par la problématique de gestion des sédiments de dragage. Seuls les réglementations des Pays-Bas et de la France sont exposées en détails, nourris par des rencontres au sein du réseau SedNet[9] et par une étude approfondie de documents écrits. Les approches de ces deux pays, sans être qualifiées d'opposées, présentent des différences majeures qui constituent les deux « courants » rencontrés en Europe. Leur étude détaillée est donc pertinente pour juger des approches des différents pays européens en matière de gestion des boues de dragage. Les approches allemande, Belges (Wallonne et Flamande), et britannique sont abordées plus succinctement, faisant l'objet d'une synthèse réalisée à partir de l'étude de Delcour et Lefebvre, intitulé « Benchmark européen de la valorisation des sédiments - Étude 1 : Réglementation européenne et des principaux États Membres actifs dans la valorisation des sédiments fluviaux » du CETE Nord-Pas-de-Calais, de décembre 2013 (Delcour et Lefebvre, 2013), ainsi que du rapport du projet SETARMS « Bilan de la réglementation française et anglaise pour le dragage des ports, Rapport de synthèse, projet SETARMS » de 2011 (Le Gac *et al*., 2011). Le lecteur est invité à se reporter à ces études pour de plus amples informations.

5.1. UNE RÉUTILISATION À TERRE CROISSANTE AUX PAYS-BAS

5.1.1. Genèse du principe de gestion intégrée des sédiments

La gestion des sédiments au Pays-Bas a évolué significativement au milieu des années 2000 impliquant une augmentation très significative des volumes de sédiments réutilisés à terre ou dans les zones littorales (Molenaar, 2014 ; De Boer, 2012). Avant les années 1980, comme dans tous les pays concernés, les sédiments étaient majoritairement clapés en mer, avec toutefois, l'utilisation fréquente de la ressource pour augmenter le niveau des terres compte tenu du contexte géographique particulier du pays.

À partir des années 1980, suite à la prise de conscience de la contamination de certains sédiments, l'État hollandais se concentre sur leur traitement et met en place l'arsenal législatif conséquent. Mais ce traitement est onéreux et qu'exceptionnellement efficace à 100 %, si bien que tout ne peut pas être traité et une partie des sédiments doit être confinée. Certains matériaux sont laissés en place faute de voie de destination adaptée. Co Molenaar (2014) du Ministeries van verkeer en waterstaat, l'équivalent néerlandais du ministère en charge de l'environnement en France, dresse le constat suivant dans les années 90 :

- un manque de débouchés pour les sédiments dragués et un arriéré dans les opérations de dragage ;

[9] SedNet, abréviation de « European Sediment Network », est un réseau d'organismes publics et privés européens concernés par la gestion et la valorisation des sédiments de dragage, créé en 2002. Le BRGM est membre du bureau exécutif du réseau depuis 2010, et en assure la vice-présidence depuis 2013.

- une approche de gestion par le risque incohérente et des objectifs de remédiation imprécis ;
- une image particulièrement négative des sédiments de dragage et une forte suspicion de la société civile pour les travaux entrepris.

À la fin des années 90, l'approche de gestion des sédiments dragués évolue dans un contexte socio-politique de gestion de l'eau également en transition (van der Brugge *et al*., 2005). L'opposition est effectivement grandissante concernant les grands travaux d'aménagement du delta qui sont réalisés sans concertation depuis les années 70. Ces travaux sont des réponses à de fortes inondations mais ils se sont avérés très destructeurs pour la biodiversité et ont rendu le pays particulièrement vulnérable aux éléments climatiques encore plus extrêmes attendus dans les prochaines décennies (van der Brugge *et al*., 2005). La réponse est **l'élaboration d'une gestion intégrée et participative du milieu, dont les sédiments ne sont qu'une composante**. Le concept est le « working with Nature », défendu par les collègues hollandais au sein des réseaux scientifiques (SedNet, 2014 ; STOWA, 2010) et dont le principe est de gérer les sédiments au sein du système (localement et avec le moins d'intervention possible) ou de les utiliser en vue de conserver les ressources naturelles. Les risques associés et les bénéfices d'un projet sont évalués au regard du milieu, de l'économie et de la société en général.

Dans ce contexte, en 2014, la gestion des sédiments aux Pays-Bas bénéficie des avancées suivantes (Molenaar, 2014) :

- trois centres de confinement subaquatiques (Slufter, IJsseloog, Hollandsch Diep) ont été construits de 1988 à 2010, ce qui règle le problème du devenir des sédiments non valorisables (3 millions de m^3/an), (Figure 5) ;
- de nombreux pilotes pour le traitement et l'utilisation de sédiments contaminés ont été réalisés à grande échelle et fournissent un retour d'expérience utile ;
- un changement politique majeur a été opéré en 2005 : à présent, la volonté politique est résolument tournée vers la réutilisation des sédiments à terre avec le moins de transformation et de transport possible, en lien étroit avec la réglementation sur les sols (Soil Quality Decree, 2008) ;
- une législation spécifique pour l'utilisation de sédiments dragués pour la réhabilitation des carrières a été élaborée ;
- les analyses de risque des sédiments contaminés en place, se font actuellement sous couvert de la réglementation sur l'eau et non sur celle des sols, ce qui a conduit à une modification des critères de remédiation, à présent basés sur la Directive Cadre Eau ;
- les niveaux d'actions pour la relocalisation en milieu marin ont été modifiés : à présent, ils sont uniquement basés sur des critères chimiques ;
- un changement d'image des sédiments s'est opéré : ils sont maintenant considérés comme un capital naturel et une ressource à exploiter dans le cadre d'une économie circulaire.

Les sédiments sont donc considérés comme une composante nécessaire au bon fonctionnement du milieu. Ce dernier comprend l'ensemble du bassin versant, c'est-à-dire, le milieu aquatique et le milieu terrestre adjacent. En conséquence, et en pratique, **les sédiments dragués ne sont considérés comme des déchets que si ils ne peuvent pas être valorisés au sein du bassin versant** (Rijkswaterstaat, 2007). L'objectif à atteindre, en lien avec la Directive Cadre Eau, est le bon état des masses d'eau qui, pour le Rijkswaterstaat, n'implique pas la remédiation des sédiments tant que ces derniers ne sont pas source de contaminants. La définition de Valeur de Référence de la Qualité des sédiments est utile pour le contrôle des sources mais n'est pas un bon point de départ pour l'étude de risque et le choix

de la remédiation. Ces dernières doivent se baser sur les concentrations en polluants des sédiments effectivement transférables (solubles et/ou biodisponibles) soit vers la colonne d'eau, soit vers le biote (Molenaar, 2014). Les méthodes de routine pour caractériser ces fractions ainsi que les indices de risques correspondants pour l'Homme et l'écosystème (indicateur msPAF) sont disponibles dans un guide élaboré par le Ministeries van verkeer en waterstaat (Rijkswaterstaat, 2010).

5.1.2. La gestion à terre des sédiments de dragage en pratique aux Pays-Bas

Généralités

Au Pays-Bas, les deux tiers des sédiments (marins et fluviaux) sont clapés en mer, soit 19 millions de m^3/an, environ. 3 millions de m^3/an, jugés pollués, sont confinés dans des zones de stockages subaquatiques. Environ 5,5 millions de m^3/an sont utilisés dans les projets d'infrastructures ou en comblement de zone d'extraction de matériaux (éventuellement après traitement) et 2,5 millions de m^3/an sont régalés le long des berges des petites voies d'eau (Delcour et Lefebvre, 2013).

Les textes réglementaires pour la gestion à terre des sédiments dragués aux Pays-Bas sont les suivants :

- réemploi (dont relocalisation en milieu aquatique) : Soil Quality Decree, Water Act et Building Materials Decree ;
- stockage temporaire : Environmental Management Act (qui comprend la réglementation « déchet ») ou Soil Quality Decree (si la valorisation est prévue) ;
- rejets des eaux des stockages temporaires : Water Act ou Soil Quality Decree ;
- mise en dépôt confiné ou remédiation : Environmental Management Act.

Le réemploi à terre des sédiments est guidé par des valeurs seuils et un principe général qui est la non dégradation du milieu receveur. **Il est commun aux terres excavées et aux matériaux issus de la déconstruction (Soil Quality Decree et Building Materials Decree) et déconnectée de la réglementation sur les déchets (Environnemental Management Act).** Les valeurs seuils ont soit, été établies à partir de mesures (bruit de fonds, notamment), soit, à partir d'études de risque. Les valeurs supérieures peuvent être amendées en fonction de spécificités locales (plus basses ou plus hautes). Elles tiennent compte également de la qualité générale des matériaux, afin que les seuils définis par les approches précédentes ne bloquent pas l'activité de valorisation en raison de valeurs trop basses (Rijkswaterstaat, 2007). La démarche se veut donc pragmatique.

Pour les sédiments dragués, la notion de dangerosité est conservée mais le Soil Quality Decree mentionne une « substance » dangereuse et non un déchet. Les sédiments dangereux ne sont pas valorisables. Sont considérés dangereux des sédiments dragués dont les teneurs totales en contaminants (252 composés minéraux et organiques (Rijkswaterstaat, 2007 ; Molenaar, 2009)) dépassent les valeurs d'intervention. Leur devenir est le confinement à terre ou dans l'un des 3 sites subaquatiques.

Les classes de réutilisation à terre des sédiments sont résumées dans la Figure 16.

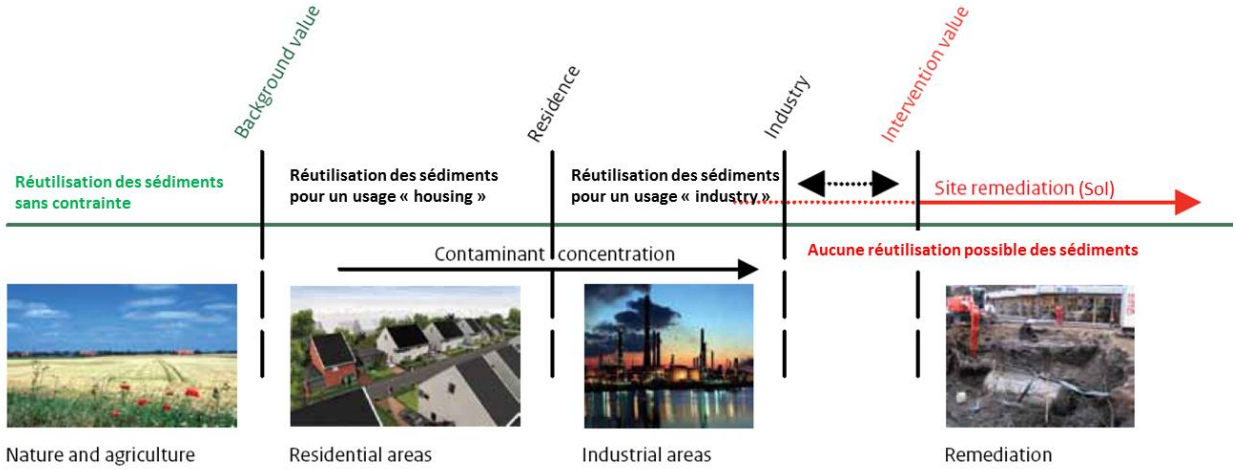


Figure 16 : Aperçu des classes de réutilisation à terre des sédiments dragués (modifié de Rijkswaterstaat [2014]).

Bruit de fond, cartographie des fonctions et de la qualité du sol, et principes de réutilisation

Les valeurs de bruit de fond sont basées sur des mesures (100 points de mesures sur l'ensemble du territoire néerlandais - 252 substances analysées [Molenaar, 2009]). Si le sédiment dragué a des teneurs inférieures à ce bruit de fond, il peut être réutilisé sans aucune contrainte et pour tout usage (y compris agricole et potager). Les autres seuils sont le résultat d'études de risque. Les cartes de fonction des sols, usage « housing » (résidentiel avec fonction logement avec jardin (non potager), espace de jeux pour enfants ou parc paysager pour promenade), ou « industry » (industriel avec fonction espace vert, urbanisation, infrastructure et industrie) sont à la charge des municipalités, et devaient être disponibles au plus tard 6 mois après la mise en œuvre du Soil Quality Decree.

L'exemple de la carte des fonctions de la ville de Rotterdam, élaborée en 2013, est présenté Figure 17.

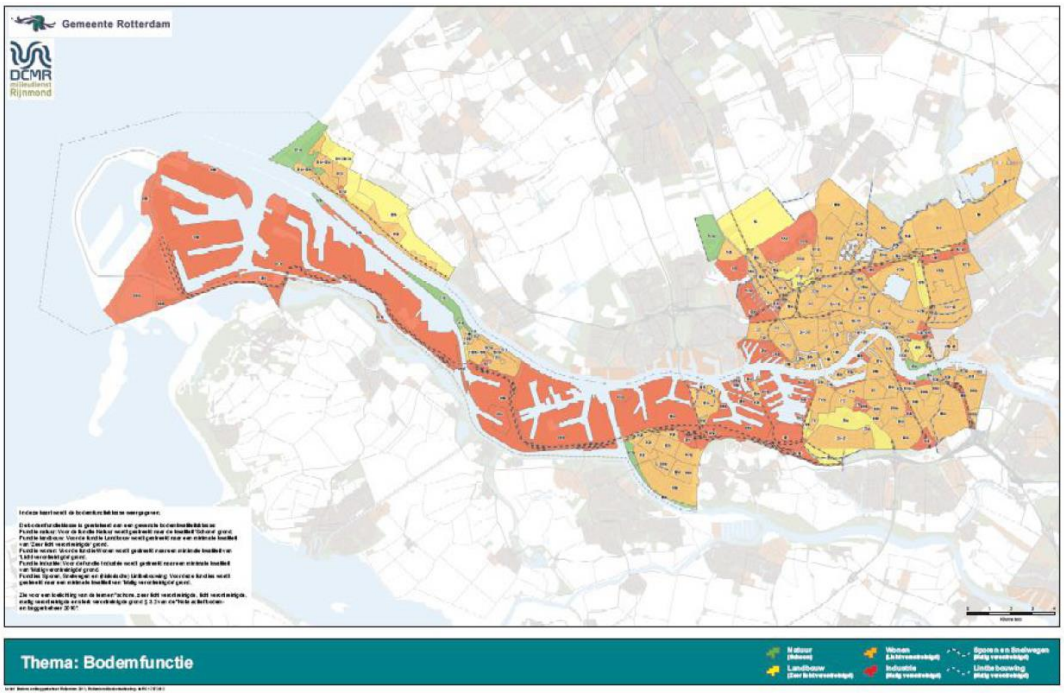


Figure 17 : Carte des fonctions d'usage des sols de la ville de Rotterdam (vert : usage « nature », jaune : usage agriculture, orange : usage habitation, rouge : usage industrie) (extrait de Roeloffzen, 2013).

En parallèle, des cartes de qualité des sols (le milieu récepteur) sont également élaborées par les municipalités (Figure 18).

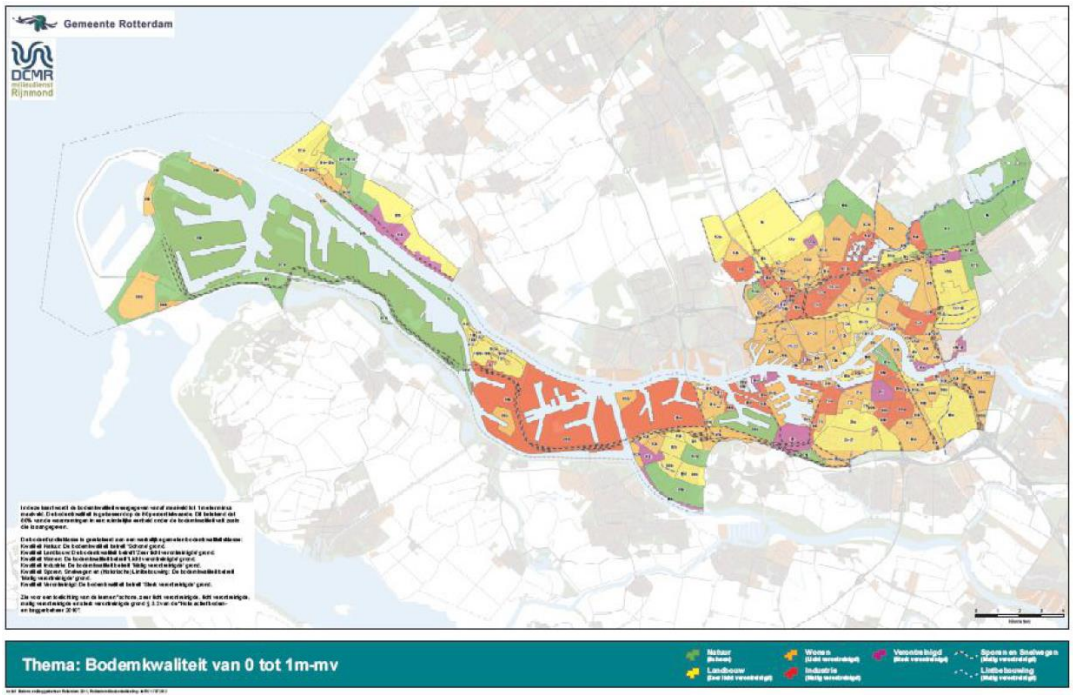


Figure 18 : Carte de la qualité des sols sur 0 - 1 m de la ville de Rotterdam (vert : qualité « nature », jaune : qualité agriculture, orange : qualité habitation, rouge : qualité industrie, violet : hors gamme - teneurs supérieures aux valeurs d'intervention) (extrait de Roeloffzen, 2013).

Les seuils « housing » et « industry » sont présentés dans le Tableau 7 uniquement pour les métaux et assimilés (extrait de Delcour et Lefebvre (2013)). Ces valeurs garantissent l'absence de risque compte tenu de l'usage envisagé qui peut aller jusqu'à inclure la création de jardin (non potager) en milieu résidentiel.

Il n'y a pas de seuil en fonction de l'usage disponibles actuellement en France. Toutefois, une rapide comparaison avec les seuils S1 de l'Arrêté du 9 Août 2006, en France (Tableau 8), montre que les sédiments dépassant raisonnablement ce seuil pourraient facilement être valorisés pour un usage « industry ». L'analyse des données recueillies par l'INERIS en 2010 (Mancioppi *et al*., 2010), afin d'établir un état des lieux de la qualité des sédiments des cours d'eau en France, montrent globalement que plus de 50 % des sédiments caractérisés pourraient être valorisés dans un contexte résidentiel sur la base des critères néerlandais sur les métaux, et presque 90 % pourraient l'être en contexte industriel (exception de quelques dépassements sur Cd et Zn) (Tableau 8).

Seuils fixés en mg/kg MS	Bruit de fond dans les sédiments	Seuils de qualité A / Seuils de remise en suspension	Seuils de qualité B / Valeurs d'intervention	Seuils usage « Housing »	Seuils usage « Industrie »
		Valorisation en milieu aquatique		Valorisation à terre	
Métaux					
Antimoine	4*	-	15	15	22
Arsenic	20	29	85	27	76
Cadmium	0,6	4	14	1,2	4,3
Chrome	55	120	380	62	180
Cobalt	15	25	240	35	190
Cuivre	40	96	190	54	190
Mercure	0,15	1,2	10	0,83	4,8
Plomb	50	138	580	210	530
Molybdène	1,5*	5	200	88	190
Nickel	35	50	210	39	100
Etain	6,5	-	-	180	900
Vanadium	80	-	-	97	250
Zinc	140	563	2000	200	720

Tableau 7 : Seuils pour les espèces minérales définis dans la réglementation néerlandaise pour la réutilisation des sédiments (extrait de Delcour et Lefebvre [2013]).

	Métaux							
Statistiques sur sédiment sec	**Arsenic** mg/kg	**Cadmium** mg/kg	**Chrome** mg/kg	**Cuivre** mg/kg	**Mercure** mg/kg	**Nickel** mg/kg	**Plomb** mg/kg	**Zinc** mg/kg
Nombre de données	10 956	11 943	8 740	11 072	11 791	11 498	11 966	11 053
Données « manquantes »	1 893	906	4 109	1 777	1 058	1 351	883	1 796
Moyenne	12.4	10.2	52.1	48.5	1.22	26.8	122	446
Ecart-type (n)	21.0	107	93.1	112	5.70	54.2	768	2 598
Coefficient variation (%)	1.70	10.5	1.79	2.31	4.69	2.02	6.28	5.82
Minimum	0.01	0.002	0.05	0.01	0.002	0.02	0.02	0.01
1%	0.02	0.002	2.50	1.40	0.005	1.75	0.30	12.2
10%	2.40	0.18	10.7	6.60	0.03	7.00	9.60	40.0
1er Quartile	4.20	0.30	20.0	12.0	0.05	11.6	17.7	69.0
Médiane	7.27	0.65	36.0	21.7	0.13	19.0	32.6	130
3ème Quartile	13.7	**2.00**	58.6	45.0	0.40	30.0	78.4	**305**
90%	25.0	**5.50**	96.5	99.9	**1.30**	45.3	**215**	**882**
99%	**83.5**	**187**	**321**	**426**	**31.0**	**153**	**1 232**	**4 519**
Maximum	**1 005**	**7 285**	**5 300**	**4 330**	**200**	**2 380**	**50 420**	**142 500**
Seuil S1	30	2	150	100	1	50	100	300
Distribution normale	Non	non	non	non	non	non	non	non
Distribution log-normale	Non	non	non	non	non	non	non	non
Quantile 90%/10%	10	31	9	15	43	6	22	22

En gras, les concentrations ≥ aux valeurs seuil S1

Tableau 8 : Statistiques descriptives des concentrations totales en métaux et assimilés dans les sédiments des cours d'eau en France (Mancioppi et al.*, 2010).*

En résumé, aux Pays-Bas, la gestion à terre des sédiments se base sur la compatibilité de la qualité du futur sol avec son usage.

Cas particulier des grands projets à terre

Des règles différentes s'appliquent lorsque la réutilisation des matériaux se fait dans le cadre de grands travaux induisant la réalisation de dépôts de plus de 2 m de haut et qu'au moins 5 000 m^3 de sédiments de dragage sont valorisés. Dans ce cas, la qualité du milieu « receveur » n'est pas prise en compte. Seuls les 50 premiers centimètres doivent respecter les seuils vus ci-dessus en fonction de l'usage futur du site et les matériaux plus profonds doivent quant à eux respecter uniquement des valeurs d'émission (lixiviation) en lien avec l'impact possible vers les nappes souterraines (Delcour et Lefebvre, 2013).

Les valeurs d'émission font l'objet d'importants travaux aux Pays-Bas et résultent d'approche de modélisation qui prennent en compte la réactivité du milieu (Verschoor *et al*., 2008 ; Dijkstra *et al*., 2013). Elles concernent tous les matériaux contaminés déposés à terre mais ne sont pas utilisées pour les dépôts sous eau (Wezenbeek, 2007)[10]. Leurs valeurs dépendent (Verschoor *et al*., 2008) :

- du compartiment environnemental considéré (sols, eaux de surface, eaux souterraines) et ses dimensions ;
- du niveau de protection environnementale souhaité ;
- du scénario appliqué selon la construction souhaitée.

La méthodologie se base classiquement sur un scénario préétabli « source-transfert-point de conformité » mais les calculs n'ont pas à être réalisés pour chaque cas d'étude par le mandataire comme c'est généralement le cas en France.

Pour les sédiments dragués, lorsque les concentrations totales des sédiments (teneurs sur bruts) dépassent les seuils sur bruts des valeurs d'émissions (Tableau 9), alors le sédiment doit vérifier les valeurs d'émissions sur éluats (seuls les métaux sont réglementés pour ce type de valorisation, les substances organiques n'étant pas prises en compte faute de test de lixiviation adapté à ces polluants).

[10] Les dépôts sous eau de grande ampleur sont autorisés sous réserve que la valeur seuil « industry » ne soit pas dépassée et toujours dans le respect du principe de non détérioration de la qualité globale du milieu. Les valeurs d'émission ne sont pas prises en compte car la lixiviation des sédiments sous eau est considérée négligeable (voir aussi chapitre 2.3.3 de ce document).

Substances	Seuils sur éluats (L/S : 10) (en mg/kg)	Seuils sur bruts (en mg/kg MS)
Antimoine	0,07	9
Arsenic	0,61	42
Cadmium	0,051	4,3
Chrome	0,17	180
Cobalt	0,24	130
Cuivre	1,0	113
Mercure	0,49	4,8
Plomb	15	308
Molybdène	0,48	105
Nickel	0,21	100
Étain	0,093	450
Vanadium	1,9	146
Zinc	2,1	430

Tableau 9 : Valeurs d'émission fixées pour les grands projets à terre aux Pays-Bas (extrait de Delcour et Lefebvre, 2013).

Delcour et Lefebvre (2013) remarquent que « les teneurs sur éluats sont équivalentes à celles du guide « SETRA » en France et des seuils d'acceptation ISDI pour l'antimoine, l'arsenic, le cadmium, le molybdène. En revanche, les seuils néerlandais sont environ divisés par 2 pour le zinc, le nickel, le chrome et le cuivre. Ils sont très différents pour le plomb (x 30), le mercure (x 50). L'étain, le vanadium et le cobalt ne font pas l'objet de seuils en France. À l'inverse, le sélénium n'est pas réglementé aux Pays-Bas ».

Cas particulier des dépôts à terre et sur des parcelles adjacentes au cours d'eau - appréhension du risque écosystémique

Pour les petites voies d'eau, l'État néerlandais encourage tout particulièrement le régalage sur berge et le rehaussement de parcelles adjacentes en vue de lutter contre les inondations et de favoriser l'entretien des polders.

Une méthode spécifique à ce cas de figure a été élaborée, se basant sur une évaluation des risques écosystémiques sur des organismes terrestres, ou à défaut aquatique (avec coefficient de partage solide-solution). La démarche est explicitée dans un guide général dédié à l'appréhension du risque, qui est disponible sur le site du ministère de l'environnement hollandais (Wezenbeek, 2007). La méthode repose sur un grand nombre de déterminations de NOEC (No Observed Effect Concentration) grâce à des essais écotoxicologiques au laboratoire pour des substances données. La compilation de tous ces résultats permet de déterminer des courbes de distribution de la sensibilité des espèces (SSD - Species Sensitivity Distribution) en fonction de la concentration rencontrée (une espèce est sensible quand sa NOEC est dépassée). De cette manière, l'indicateur PAF (Potential Affected Fraction) est défini comme la fraction (%) des espèces potentiellement affectée par la quantité d'une substance chimique présente dans le milieu. Cette valeur de PAF est donc une mesure du risque écologique causé par un toxique à une concentration donnée, sur l'écosystème aquatique (exemple : un PAF50 correspond un effet probable sur 50 % des espèces présentes dans le milieu). **Les concentrations des substances induisant des PAF50 ou PAF20, sont considérées comme les seuils de dangerosité des sédiments.**

Les mélanges de substances sont appréhendés par le ms-PAF (multi-substances PAF) qui est, simplement, la somme des PAF pour les différentes substances concernées de ces fractions. Dans les milieux fortement impactés, c'est-à-dire quand une diminution d'au moins 50 % de l'abondance d'espèce est observée sur le site, Posthuma *et al*. (2012) ont effectivement confirmé l'existence d'une corrélation 1 :1 entre cette diminution d'abondance et l'indicateur msPAF-EC50 calculé sur la base des SSD pour chaque « couple SSD/substance » du milieu.

Pour la gestion des sédiments, la décision de fixer un seuil ms-PAF est un choix politique. Le principe est que plus le milieu est d'intérêt - et doit, donc, être préservé-, plus l'objectif d'un ms-PAF faible sera à atteindre (ex : ms-PAF de 5 %). En pratique, le ministère hollandais a fixé ces seuils à 50 % pour les métaux et 20% pour les organiques, guidé en cela par le souhait de garder au moins les mêmes niveaux de valorisation (en termes de m^3 de sédiments dragués) qu'avant 2007, date d'entrée en vigueur de ces nouveaux seuils (Wezenbeek, 2007). En théorie, donc, si les prévisions du modèle venaient à se vérifier, cela signifierait que l'État néerlandais pourrait assumer une perte allant jusqu'à 50 % de l'abondance des espèces du milieu où seraient épandus les sédiments. Pour autant, le ministère hollandais note qu'aucune dégradation des milieux n'a été constatée par le passé du fait de ces pratiques.

Enfin, le ms-PAF est couplé avec deux seuils spécifiques :

- seuil fixé à 7,5 mg/kg (MS) pour le Cd résultat d'une analyse de risque selon un scénario sensible (maison avec potager - non détaillé) et dont les résultats ont montré que l'approche écosystémique était trop « permissive » ;
- seuil fixé à 3 000 mg/kg (origine de cette valeur non précisée) pour les huiles minérales, pour lesquels la méthode ms-PAF n'était pas adaptée.

Au final, un sédiment peut être déposé sur les berges si :

- l'indicateur ms-PAF pour les métaux est inférieur à 50 % (concentrations susceptibles d'affecter 50 % des espèces présentes) ;
- l'indicateur ms-PAF pour les substances organiques est inférieur à 20 % (concentrations susceptibles d'affecter 20 % des espèces présentes) ;
- il contient moins de 7,5 mg/kg de Cd et moins de 3 000 mg/kg d'huiles minérales.

À titre de comparaison, rappelons qu'en France, il est interdit d'épandre des boues sur des sols contenant plus de 2 mg/kg de Cd.

5.1.3. Bilan de l'approche néerlandaise

D'après des contacts pris par Delcour et Lefebvre (2013) avec des représentants hollandais, 80 à 85 % des 5 millions de m^3 de sédiments fluviaux dragués sont valorisés dans les différentes filières, soit entre 4 et 4,25 millions de m^3 de sédiments fluviaux valorisés chaque année. Dans la plupart des cas, la valorisation des sédiments dragués est réalisée par les entrepreneurs qui ont besoin de matériaux. Les filières utilisées seraient le plus souvent :

- le dépôt le long des berges ;
- la création de digues ;
- les aménagements paysagers.

Les filières les plus utilisées sont donc celles qui sont les plus faciles techniquement.

Pour Molenaar (2014), le changement de politique du milieu des années 2000, marquée par la parution du Soil Quality Decree en 2007, a permis d'accroître la réutilisation des sédiments

en milieu aquatique et terrestre. Le retour d'expérience montre un équilibre satisfaisant entre la protection de l'environnement et les possibilités de réemploi. La réglementation est complexe mais relativement « transparente » pour les gestionnaires qui au final, utilisent des seuils mis à disposition par l'administration et quasiment valables sur l'ensemble du territoire. Ces derniers sont élaborés sur la base d'études scientifiques nombreuses qui parviennent à argumenter le choix de valeurs qui peuvent paraître élevées pour certaines voies de valorisation en comparaison avec le fond géochimique du pays et les seuils actuellement disponibles dans les réglementations européennes.

Pour Delcour et Lefebvre (2013), deux autres facteurs œuvrent en faveur de la valorisation des sédiments :

- le manque de ressources naturelles du pays et le besoin de lutter contre les inondations ;
- la réactivité administrative (cartographie des fonctions et de la qualité du sol, réponse rapide aux demandeurs, etc.).

Il apparaît que le succès de la méthode doit également beaucoup à l'image de ressource dont dispose à présent le sédiment dragué dans la société civile. L'existence de centres de dépôt subaquatique qui permettent de confiner à un cout raisonnable les sédiments non valorisables (donc « pollués ») constitue également une pièce importante du puzzle.

5.2. GESTION DES SÉDIMENTS EN ALLEMAGNE

5.2.1. Une gestion largement dominée par la remise en suspension en Allemagne

En Allemagne, environ 46 millions de m^3 sont dragués chaque année dont 35 millions dans les routes et chenaux maritimes, 6 dans les ports maritimes, 1 dans les ports intérieurs, 3 dans les voies navigables intérieures et 1 dans les barrages (Netzband, 2010).

Pour le milieu marin, un guide a été élaboré en 2009, validé par les landers côtiers (Mecklenburg-Western Pomerania, Lower Saxonia et Schleswig-Holstein), afin d'harmoniser les bonnes pratiques de dragage des sédiments dans le respect des directives cadres européennes (GUSTAK-WSV, 2009). Ce guide liste les alternatives à la relocalisation des sédiments dans le milieu aquatique :

- utilisation comme matériau de construction sans traitement particulier (défense côtière, matériau de comblement et de rechargement de plage, construction de quai et de plateforme portuaire, reconstitution de site et de biotope, protection des berges et des structures des chenaux) ;
- utilisation comme sol en zone agricole ;
- utilisation à terre après traitement (par exemple : défense côtière ou construction de route, aménagement paysagers, couche de surface pour la fermeture des décharges, réhabilitation des anciens dépôts de déchets et des sites industriels, ou additif dans les matériaux de construction) ;
- dépôt confiné subaquatique ;
- dépôt confiné à terre après traitement.

Toutefois, la très grande majorité des sédiments dragués en Allemagne (entre 90 et 95 % selon les années) sont clapés en mer, remis en suspension ou relocalisés au sein des estuaires (Delcour et Lefebvre, 2013).

Comme en France, les grands ports maritimes sont pilotes en matière de traitement des sédiments et de valorisation. Hambourg est équipé d'une usine de séparation mécanique

METHA (Mechanical Treatment of Harbour Sediments) depuis 1993. Elle traite 1 million de m^3 de sédiments marins fins chaque année. Sa construction a couté près de 70 millions d'euros et son fonctionnement annuel est d'environ 17 millions d'euros (Detzner *et al*., 1998). Les sables sont valorisés en construction et les fines sont utilisées en couches d'étanchéité du site de dépôts des matériaux contaminés. Hambourg a participé au programme Sustainable Management Of Contaminated Sediments (SMOCS 2007-2013) visant l'élaboration de guides pour la gestion des sédiments (SMOCS, 2013). Ce programme a été en partie financé par la Communauté Européenne et a vu la participation de grands ports de la mer Baltique. Les partenaires de SMOCS ont créé un réseau (www.smocs.eu) en vue de continuer les échanges sur le thème. Par ailleurs, les représentants du Port de Hambourg sont très présents au sein du réseau SedNet qu'ils ont contribué à mettre en place (voir page 51 de ce document).

Le port de Rostock traite, annuellement, sur le site de Radelsee, 200 000 m^3 de sédiments portuaires essentiellement rendus à un usage agricole (amendement et restructuration de sols) et utilisés pour la construction de digues (Figure 19). Ce procédé mobilise 110 ha de foncier et dure deux ans en vue d'assurer le ressuyage et la maturation des matériaux avant valorisation.

Figure 19 : Vue satellitaire d'une partie des installations de traitement des sédiments de dragage du port de Rostock (Allemagne). Se distinguent aisément de gauche à droite : la rampe de déchargement des boues, les lagunes de déshydratation et les andains de sédiments pelletables. Ce site a une superficie d'environ 65 ha (source : GoogleEarth).

Les gestionnaires du linéaire fluvial sont quant à eux, concernés par des volumes plus petits et plus dispersés, hors de cette problématique industrielle ou extensive de traitement. Les voies de prédilection restent la remise en suspension des sédiments au fil de l'eau et la création d'ouvrages de stockage sur les berges ou sous eau. Par exemple, l'île artificielle réalisée sur l'Elster Blanche à Dobeneck en Saxe a permis d'immobiliser 400 000 m^3 de sédiments, pour un coût final estimé à 2,2 millions d'euros. Cette île a été acceptée comme mesure de compensation pour des travaux routiers consommant des espaces naturels à proximité (Delcour et Lefebvre, 2013).

5.2.2. Une réglementation également variée

Les textes réglementaires sur la gestion des sédiments sont en grande partie harmonisés au niveau fédéral mais certaines particularités peuvent exister en fonction des landers. C'est notamment à leur niveau que sont données les autorisations environnementales.

La valorisation des sédiments est régie par les textes suivants (Delcour et Lefebvre, 2013 ; Neumann et Henneberg, 2014) :

- l'HABAB-WSV est dédié à la gestion des sédiments dragués sur le domaine intérieur au niveau fédéral. Son équivalent pour le milieu maritime est le GUSTAK-WSV évoqué ci-dessus. La remise en suspension reste soumise à autorisation environnementale et doit respecter la loi sur l'eau ;
- la loi sur l'économie circulaire et les déchets (Kreislaufwirtschaft- Abfallgesetz (KrW-/AbfG)) qui confirme le statut de déchet du sédiment de dragage et invite à sa valorisation pour l'amélioration des sols, la remise en culture et les travaux de construction, en référence à la norme DIN 19 731 ;
- l'ordonnance « sols » et les réglementations techniques spécifiques qui précisent les modalités d'introduction dans la partie du sol « traversées par les racines » de matériaux allochtones (article 12 al. 1 de l'ordonnance fédérale sur la protection des sols). La construction de buttes paysagères relève de cette réglementation. Cette législation offre la possibilité de prendre en compte des contextes locaux notamment le « bruit de fond » environnemental.

L'utilisation de sédiments dragués dans les travaux de construction (bétons, briques, …) est également soumise à autorisation publique mais elle ne relève alors que des réglementations et des normes relatives aux matériaux et non à la législation sur les déchets ou les sols. Des guides, comme celui établi par le LAGA (Groupe de Travail Déchet des Länders) pour la valorisation des déchets sont également disponibles.

5.2.3. Déclenchement de la gestion à terre

Comme vu précédemment, la remise en suspension des sédiments est encouragée par la réglementation allemande, tout en étant bien encadrée sur le plan réglementaire.

Il n'existe pas en Allemagne de seuils et de méthodes homogènes permettant de juger de la qualité des sédiments en place. Comme en France, l'administration opère un cadrage pour chaque dossier. L'HABAB liste toutefois les mesures à réalisées qui comprennent des caractéristiques globales (COT, couleur, odeur, granulométrie, nutriments, DBO, ...) et des polluants (métaux et assimilés, HAP, PCB et autres molécules chlorées, huiles minérales, composés organostaniques, …). Ces caractérisations sont complétées par des tests de toxicité (algue, bioluminescence bactérienne ou des tests sur daphnies).

L'HABAB définit finalement 7 classes de toxicité, 4 seuils de prise en charge et 3 cas administratifs :

- dans les cas 1, le sédiment peut être déplacé sans restriction ;
- dans les cas 2, la décision se fait « au cas par cas » ;
- dans les cas 3, le déplacement n'est pas possible.

Ces classifications tiennent également compte du milieu récepteur qui est régulièrement suivi. Une moyenne de la qualité des matières en suspension est réalisée sur les 3 dernières années et est utilisée pour définir des seuils de qualité. Si sur aucune des valeurs chimiques prises en compte, il n'y a de dépassement supérieur à 50 % par rapport à la moyenne du milieu ambiant

récepteur, le sédiment peut être déplacé. Si la concentration moyenne dépasse de 50 % la moyenne du milieu ambiant pour une valeur et ne dépasse cependant pas 3 fois cette valeur, une décision au cas par cas est prise en fonction notamment des mesures d'accompagnement qui sont proposées. Dans les autres cas, le sédiment ne peut pas être valorisé dans le milieu aquatique (Delcour et Lefebvre, 2013).

Enfin, des recherches faunistiques et floristiques sont également effectuées pour déterminer la sensibilité de l'endroit.

5.2.4. Valorisation des sédiments gérés à terre

Sols et aménagements paysagers

Lorsque les sédiments sont valorisés dans le sol, le processus de valorisation doit observer des règles de traçabilité et de conservation de la mémoire (Delcour et Lefebvre, 2013). Ces dispositions sont issues, d'une part, de **l'ordonnance fédérale sur la protection des sols** lorsque les sédiments sont disposés dans une couche de terre accessible aux racines, et d'autre part, des guides sur **la valorisation des déchets établis par le groupe de réflexion du LAGA**.

À l'image des Pays-Bas, l'ordonnance fédérale pour la protection des sols fixe des seuils et des règles de prudence adaptées aux différents usages des matériaux déposés en surface et utilisés comme sols (utilisation dans la couche racinaire). Les seuils pour les sédiments destinés au milieu urbain sont présentés Tableau 10. Ils sont complétés par des seuils dits de prudence pour une valorisation agricole dont la valeur varie légèrement en fonction de la nature des matériaux (prise en compte de la disponibilité potentielle des polluants) : taille des grains pour les métaux et assimilés (Tableau 11) et teneur en humus pour les PCB et HAP (Tableau 12).

	Aires de jeux d'enfants	Zones d'habitation	Parcs et installations de loisirs	Zones industrielles et commerciales
Arsenic	25	50	125	140
Plomb	200	400	1 000	2 000
Cadmium	10	20	50	60
Cyanide	50	50	50	100
Chrome	200	400	1 000	1 000
Nickel	70	140	350	900
Mercure	10	20	50	80
Aldrine	2	4	10	6
Benzopyrène	2	4	10	12
DDT	40	80	200	0
Hexachlorobenzol	4	8	20	200
Hexacyclohexane	5	10	25	400
Pentachlorphénol	50	100	250	250
PCB 6	0	1	2	40
Dioxine / Furane (en ng I-Teq/ kg de MS)	100	1 000	1 000	10 000

Tableau 10 : Seuils dans les sédiments établis en fonction de l'usage social des terrains récepteurs (mg/kg de MS) (extrait de Delcour et Lefebvre, 2013).

Sols	Cadmium	Plomb	Chrome	Cuivre	Mercure	Nickel	Zinc
Argileux	1,5	100	100	60	1	70	200
Loam/limon	1	70	60	40	0,5	50	150
Sableux	0,4	40	30	20	0,1	15	60

Tableau 11 : Seuils de prudence dans les sédiments pour les métaux pour une valorisation agricole (en mg/kg MS) (extrait de Delcour et Lefebvre, 2013).

Sols	PCB (6)	benzo(a)pyrène	HAP (16)
Teneur en humus > 8 %	0,1	1	10
Teneur en humus ≤ 8 %	0,05	0,3	3

Tableau 12 : Seuils de prudence dans les sédiments en fonction de la teneur en humus pour une valorisation agricole (en mg/kg MS) (extrait de Delcour et Lefebvre, 2013).

Comme en France, la valorisation agricole doit être justifiée par l'amélioration des sols destinataires des boues.

Pour les couches plus profondes, non accessibles aux racines[11], le guide LAGA définit le sédiment valorisable dans ce contexte comme le matériel extrait de l'eau contenant moins de 10 % de matériaux ayant une granulométrie inférieure à < 63 µm, donc qui s'éloignent des boues de dragage au sens stricte. Les possibilités de réutilisation des sédiments dépendent de leurs teneurs en polluants, de la faculté de remobilisation de ces derniers et des conditions de réemploi.

Les matériaux réutilisés doivent respecter des seuils qui varient suivant la composition du matériau à valoriser. La réglementation Allemande présente cette particularité de tenir compte de la mobilité potentielle des polluants qui sera généralement plus élevée dans les sables que dans les argiles, par exemple. Des nuances sont également possibles en fonction du contexte de valorisation (remplissage de gravières sous la couche racinaire notamment). Les seuils portent sur les teneurs totales et sur éluats.

Le guide LAGA compte également d'autres seuils permettant de valoriser les déchets comme matériaux de construction, ainsi que des seuils gérant leur stockage définitif. Les conditions sont fixées dans la norme technique ZTVE-StB 94 qui, d'après Delcour et Lefebvre (2013), sont comparables aux normes fixées par le SETRA en France.

5.2.5. Bilan de l'approche allemande

L'Allemagne peut compter sur une filière d'immersion particulièrement bien développée aussi bien pour les sédiments marins que continentaux. Elle bénéficie également d'initiatives majeures de la part des grands ports maritimes pour la mise en place de filières de gestion à terre des sédiments de dragage à grande échelle, dont l'usine METHA d' Hambourg qui a déjà plus de 20 ans d'existence.

Pour la gestion à terre, les textes réglementaires portant sur les sols et ceux portant sur les déchets ont été mis en cohérence et utilisent les mêmes catégories de matériaux lorsqu'il s'agit de valorisation. Comme au Pays-Bas, l'utilisation de seuils est quasi-systématique et simplifie les choix de valorisation. Certaines de ces valeurs varient en fonction des qualités intrinsèques des matériaux (granulométrie et taux de matière organique). Les acteurs de la valorisation des sédiments peuvent également compter sur des guides élaborés par des instances gouvernementales.

5.3. UNE GESTION EXCLUSIVEMENT À TERRE EN RÉGION WALLONNE

5.3.1. Classification des sédiments dragués

La région Wallonne n'a pas de façade maritime. Sa géographie et son histoire industrielle ressemblent à celles de la région Hauts-de-France en France, dans sa partie la plus au nord : ses rivières n'ont généralement pas suffisamment de débit pour permettre la remise en suspension des sédiments dont la qualité chimique est souvent médiocre suite aux multiples rejets anthropiques concentrés sur de petits territoires. Il en résulte l'obligation d'amener les sédiments dragués à terre dont l'image est fortement négative en raison de leur contamination fréquente (60 % des volumes à draguer sont classés B (IRGT, 2005) - voir ci-dessous).

Par ailleurs, dans les années 90, la parution de textes de loi en lien avec la transposition de la Directive Cadre sur les Déchets, et les difficultés pour obtenir des autorisations d'installer des

[11] Les épaisseurs concernées sont définies par le LAGA. Elles dépendent du mode d'occupation des sols.

centres de traitement, ont conduit à une situation de blocage total durant une dizaine d'années (Libert, 2015). Au cours de cette période aucun dragage n'a été réalisé. Il en résulte un passif important qu'il est nécessaire de résorber. La région Wallonne a, toutefois, une forte volonté de remise à grand gabarit des voies navigables ce qui entraîne une réflexion sur d'importants volumes de sédiments à valoriser ou à stocker (DGRNE, 2007). En 2007, l'entretien annuel récurrent était estimé à environ 550 000 m^3 par an, mais seulement 300 000 m^3 de sédiments peuvent être traités chaque année (pour un montant d'environ 25 M€), en raison de contraintes techniques et financières. Ces matériaux sont exclusivement gérés à terre.

Comme en France, les sédiments dragués sont considérés comme des déchets (décret relatif au déchet du 27 juin 1996 - https://wallex.wallonie.be/PdfLoader.php?type=doc&linkpdf=4762-4059-87). L'Arrêté du Gouvernement wallon du 30 novembre 1995 (et ses arrêtés modificatifs - AGW, 1995 et 1999) relatif à la gestion des sédiments dragués en milieu continental (cours et plans d'eau intérieurs) classe ces matières en deux catégories qui vont permettre d'orienter les matériaux vers la valorisation ou l'élimination :

- catégorie A : sédiments peu ou pas contaminés ;
- catégorie B : sédiments pollués.

Ces deux catégories sont définies grâce à trois types de seuils (Tableau 13) :

- les teneurs admissibles : il s'agit des teneurs basses. Si les sédiments présentent une teneur inférieure, ils sont classés en catégorie A ;
- les teneurs de sécurité : il s'agit des teneurs hautes. Si les sédiments présentent une teneur supérieure, ils sont classés en catégorie B ;
- les teneurs limites d'élution : elles sont déterminées grâce à un essai de lixiviation des sédiments dont les teneurs sont comprises entre les seuils admissibles et les seuils de sécurité. Si les essais montrent des teneurs supérieures aux seuils les sédiments sont classés B, sinon A. Ces essais se composent de trois lixiviations successives de 16 h contre une fois 24 h en France.

Elément ou composé	Teneurs admissibles	Teneurs de sécurité	Teneurs limites d'élution
As	50	100	0,5
Cd	6	30	0,1
Co	25	100	0,5
Cr	200	460	0,5
Cu	150	420	2
Ni	75	300	0,5
Pb	250	1500	0,5
Zn	1200	2400	2
Hg	1,5	15	0,02
F	250	500	20
Cyanure	5	25	0,1
Hydrocarbures Apolaires	1500	4500	10
hydr. Aliphatiques	50	100	-
hydr. Aromatiques monocycliq	10	75	0,0002
Solvants Halogénés	1	5	0,0005
HAP	9	45	0,002
PCB	0,25	0,75	0,002
Pesticides Organochlorés totau	0,25	0,5	0,002

Tableau 13 : Seuils de la réglementation wallonne pour le classement des sédiments dragués (en mg/kg MS).

Les sédiments, une fois dragués sont amenés dans des Centres de Regroupement autorisés où ils sont déshydratés par ressuyage et retournement à l'air libre, de manière à les rendre pelletables, avant valorisation ou élimination en centre de stockage. Les spécificités de ces plateformes de regroupement varient en fonction de la catégorie, A ou B, des sédiments (Figure 20).

Figure 20 : Illustrations d'un centre de regroupement de boues de curage de catégorie B en région wallonne (Saint-Ghislain - juillet 2009). En haut, vue d'ensemble du site et des andains (végétalisation spontanée). En bas, vues des dispositifs de surveillance (piézomètres) et de gestion des eaux du site.

La notion de centre de regroupement implique également que les produits de dragage n'y séjournent qu'un temps (maximum 3 ans d'après la réglementation européenne). L'exploitation de ces installations est subordonnée à l'obtention d'un permis d'environnement.

Les données disponibles montrent que les sédiments de curage de la région wallonne sont de mauvaise qualité puisqu'environ 60 % des volumes curés sont classés en catégorie B (Maes, 2007).

5.3.2. Devenir possible des sédiments dragués de catégorie A

Concernant les sédiments de catégorie A, les voies de valorisation reprises par l'arrêté de AGW de 1995 (AGW, 1995) sont celles de la Directive Européenne 2006/12/CE :

- *« le recyclage ou la récupération des substances organiques qui ne sont pas utilisées comme solvants (y compris les opérations de compostage et autres transformations biologiques) ;*
- *le recyclage ou la récupération d'autres matières inorganiques ;*
- *l'épandage sur sol au profit de l'agriculture ou de l'écologie ».*

Ces voies de réutilisation étant trop imprécises, le Gouvernement wallon a adopté le 14 juin 2001 un arrêté favorisant la valorisation de certains déchets, dont les sédiments de dragage de catégorie A (AGW, 2001), en application de l'article 3 du décret relatif au déchet du 27 juin 1996.

Plusieurs filières de valorisation ont été mises en exergue par le Ministère de l'Équipement et des Transports (MET) mais toutes n'ont pas fait l'objet d'une étude de faisabilité permettant de vérifier la conformité de l'opération (DGRNE, 2007). Parmi celles-ci, figurent :

- l'amendement de sols forestiers ou la création de néosols sur des sites industriels (le Ministère fédéral de l'agriculture ayant manifesté son opposition à un recyclage de ces produits en agriculture lors de la parution du décret. Cette situation est toutefois en train d'évoluer suite à la parution prochaine du décret « sol » - voir ci-dessous) ;
- l'utilisation de certains produits de dragage en tant que matériaux d'étanchéité, en substitution d'une argile au sens strict ;
- l'utilisation de matériaux meubles de reprofilage dans la création d'écrans anti-bruit, de comblement d'excavations, de recouvrement de décharges et aménagements paysagers ;
- la réalisation de couches de sous-fondation et fondation ;
- l'aménagement des cours et plans d'eau hors zones protégées ;
- la valorisation « matière » en cimenterie après passage en unité de prétraitement où les boues sont asséchées, les fractions présentant un potentiel énergétique suffisant sont injectées comme combustibles à la flamme dans un four à clinker ;
- l'utilisation des sédiments en tant que matière première de substitution dans la fabrication du clinker ;
- l'incorporation de produits de dragage dans des blocs de construction (briques pleines ou creuses, granulats...).

Valorisation au contact du sol

Toutefois depuis 2008, parmi les voies de valorisation présentées ci-dessus, celles induisant le dépôt sur le sol sont actuellement à l'arrêt. La raison en est l'incompatibilité des valeurs guides mises en place par le décret relatif à la gestion des sols (décret du 5 décembre 2008 - http://environnement.wallonie.be/legis/solsoussol/sol003.htm) et de son arrêté d'exécution du 27 mai 2009 (AGW, 2009), avec les règles de classement en qualité des sédiments (catégorie A). Dans le cas de dépôt sur le sol, l'utilisation de matériaux de dragage doit effectivement être effectuée en respectant les dispositions du Décret. Ce décret instaure notamment les 3 types de valeurs dénommées ci-dessous) :

- ***« valeur de référence » (VR)*** *:* ***valeur indicative des concentrations de fond*** *en polluants attendues dans le sol en l'absence de variations géologiques naturelles et en l'absence d'influence d'une activité agricole, industrielle ou urbaine généralisée ; cette valeur correspond en principe à l'objectif à atteindre par l'assainissement ;*
- ***« valeur seuil » (VS)*** *: concentration en polluants dans le sol correspondant à un niveau au-delà duquel* ***une étude de caractérisation doit être entreprise****, ainsi qu'en cas de menace grave ou de pollution nouvelle, un assainissement et, le cas échéant, des mesures de sécurité ou des mesures de suivi ;*
- ***« valeur d'intervention » (VI)*** *: concentration en polluants dans le sol correspondant à un niveau au-delà duquel une* ***intervention est systématiquement entreprise****, laquelle peut prendre la forme, le cas échéant simultanément : a) d'un assainissement ; b) de mesures de sécurité ; c) de mesures de suivi.*

Cinq types d'usage des sols sont également définis pour lesquels correspondent des valeurs de concentration en polluants cibles. L'ensemble est présenté dans le Tableau 14, uniquement pour les métaux (des valeurs sont également disponibles pour certains composés organiques). Comparées aux seuils A et B utilisés pour la gestion des boues de dragage présentés dans le Tableau 13, il apparaît que les sédiments A pourraient à peine être valorisés pour un usage industriel (seuil A proche de la VS du type V).

Type d'usage		Sol (mg/kg$_{matière\ sèche}$)					Eaux souterraines (µg/L)
		I	II	III	IV	V	
		naturel	agricole	résidentiel	récréatif ou commercial	industriel	
Métaux/métalloïdes							
arsenic	VR	12	12	12	12	12	1
	VS	30	30	40	40	50	10
	VI	220	265	300	300	300	40
cadmium	VR	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25
	VS	1	1	3	10	15	5
	VI	10	10	30	40	50	20
chrome total (1)	VR	34	34	34	34	34	2,5
	VS	60	85	125	125	165	50
	VI	95	175	520	520	700	100
chrome VI (2)	VR (3)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	VS	4	4	4	13	13	9
	VI	40	40	40	130	130	90
cuivre	VR	14	14	14	14	14	15
	VS	40	50	110	110	120	100
	VI	80	145	290	290	500	200
mercure	VR	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1
	VS	1	1	1	5	5	1
	VI	6	6	6	50	50	4
nickel	VR	24	24	24	24	24	10
	VS	60	65	150	150	210	20
	VI	100	200	300	300	500	80
plomb	VR	25	25	25	25	25	2,5
	VS	120	200	200	280	385	10
	VI	170	400	700	700	1360	40
zinc	VR	67	67	67	67	67	90
	VS	120	155	230	230	320	200
	VI	215	300	710	710	1300	400

Tableau 14 : Concentration en métaux et assimilés définies en fonction des usages du sol en région wallonne (Décret sols 05/12/08).
VR = valeur de référence, VS = valeur seuil, VI = valeur d'intervention
(1) valeurs proposées pour le chrome total basées sur le chrome trivalent.
(2) valeurs proposées pour le chrome hexavalent basées exclusivement sur les risques pour la santé humaine.
(3) VR fixée à la limite de détection (25 % de la valeur paramétrique) imposée par l'arrêté du Gouvernement wallon du 15 janvier 2004 relatif aux valeurs paramétriques applicables aux eaux destinées à la consommation humaine.

Les sédiments wallons apparaissent donc de trop mauvaise qualité pour une valorisation en milieu agricole ou résidentiel, qui ne sont jamais permises en pratique. La contamination des sédiments en région wallonnes est certes, élevée, comme vu précédemment (60 % de sédiments classés B). Toutefois, l'exemple wallon montre les limites des plateformes de regroupement dans un contexte de seuil élevé qui associe une seule qualité à un volume important de matériau. Il conviendrait peut-être de créer des qualités A+ ou A++ avec des niveaux de concentration plus compatibles avec des usages agricoles, tels que définis dans le décret sol. Même si cela risque de ne concerner qu'un faible volume des boues produites tant que la qualité chimique des voies d'eau wallonnes ne s'améliore pas, au moins, une possibilité de valorisation serait offerte à ces matériaux très faiblement contaminés. Par ailleurs, le regroupement systématique des matériaux déconnecte le producteur des sédiments de la filière de valorisation. Cette dernière est de la responsabilité du gérant de la plateforme dont les intérêts peuvent diverger de ceux des pouvoirs publics et/ou du producteur des boues.

Malgré toutes ces considérations, on notera que, dans le cas des cours d'eau non navigables, « les matières appartenant à la catégorie A enlevées d'un plan d'eau ou d'un cours d'eau non-navigable peuvent (…) être gérées conformément au chapitre IV de la loi du 28 décembre 1967 » (DGRNE, 2007) qui autorise la mise en remblai le long des cours d'eau ou dans le lit de ceux-ci.

D'une manière générale, le décret sol ne règle rien concernant la possible valorisation des matériaux. Il apparaît au final, que les gestionnaires wallons disposent de peu de guide technique pour les aider à valoriser les sédiments.

Valorisation comme matériaux de construction

Pour les voies de valorisation en construction, Les modes d'utilisation listés précédemment ne sont autorisés que s'ils respectent les dispositions du Code Wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme et du Patrimoine et de l'Énergie (CWATUPE).

Le CWATUPE codifie l'ensemble des dispositions applicables en Région wallonne en matière d'aménagement du territoire (plan de secteur, plans communaux d'aménagement, etc.), d'urbanisme (demandes de permis, composition, délais, procédures applicables, etc.), du patrimoine (patrimoine protégé, biens classés, certificats de patrimoine, etc.) et d'énergie (performances énergétiques des bâtiments).

Pour la fabrication de produits finis, le mode d'utilisation autorisé par l'arrêté du 14 juin 2001 (AGW, 2001) pour les matériaux pierreux et granulats de dragage est la fabrication de béton. L'arrêté précise que les critères d'acceptation pour ces déchets sont définis par la PTV 4008. La fraction fine des sédiments n'est pas concernée.

D'après l'enquête de Delcour et Lefebvre (2013) auprès de la Direction de la Politique des Déchets du gouvernement Wallon, les sédiments, une fois valorisés, sortent du statut de déchet et le producteur se défait des responsabilités une fois le sédiment valorisé.

Élimination en centre de stockage

L'élimination en centre de stockage des sédiments de catégorie A est souhaitée exceptionnelle. L'évacuation des boues des centres de regroupement n'a lieu que lorsque ces derniers ont atteint leur limite de capacité. La Wallonie dispose actuellement de 6 centres de regroupement de catégorie A. Les sédiments de classe A qui ont été sortis de ces centres ont été utilisés en réhabilitation de site et pour aménager un Centre d'Enfouissement Technique (CET). À notre connaissance, la plupart des centres de regroupement sont pleins et sont en attente de déboucher pour l'évacuation des matériaux.

Le stockage définitif des sédiments passe par l'intermédiaire de Centres d'Enfouissement Technique spécifiques (CET de classe 4 destinés aux matières enlevées du lit et des berges des cours d'eau et plans d'eau du fait de travaux de dragage ou curage et les déchets assimilés par le Gouvernement).

Devenir des sédiments dragués de catégorie B

Les sédiments de classe B doivent être traités avant valorisation ou élimination. L'arrêté de 2001 ouvre effectivement la porte à leur valorisation si le détenteur des déchets apporte la preuve que ces déchets ne sont pas classés comme « dangereux » (article 13). Pour les centres recevant les boues de catégorie B, l'objectif de déshydratation décrit précédemment est donc complété par des aspects de traitement et prétraitement visant à rendre les boues conformes à la catégorie A. La déshydratation est ici mécanique (filtre-presse). Les opérations de traitement concernent les polluants inorganiques (stabilisation) et organiques (dégradation).

En avril 2006, un certificat d'utilisation a été octroyé à la S.A. SEDISOL, résultant d'un partenariat entre la SPAQuE S.A. (entreprise de dépollution des sols), ECOTERRES S.A. et le Port Autonome de Charleroi, en vue de valoriser après traitement des sédiments de catégorie B. SEDISOL exploite une plateforme de traitement basée notamment sur le procédé NOVOSOL mis au point par la S.A. SOLVAY. Deux techniques de traitement sont en fait retenues, à savoir :

- procédé Novosol® : ce procédé permet de stabiliser les éléments traces minéraux par piégeage dans les mailles d'une structure cristalline stable (formation de phosphates de calcium par ajout d'acide phosphorique). A noter que le procédé complet comporte normalement une deuxième phase de calcination qui a pour but de détruire les contaminants organiques et de stabiliser les minéraux phosphatés créés au cours de la première phase. Malheureusement, cette phase n'est pas réalisée en raison de son coût élevé ;
- procédé Bioremédiation : ce procédé consiste à activer les micro-organismes naturellement présents dans les sédiments pour dégrader certains des composés organiques. Cette opération, classiquement appliquée tant dans le domaine du traitement des sols que des sédiments de dragage se déroule dans une cellule prévue à cet effet. La création d'andains et les opérations de retournement des produits préalablement déshydratés favorisent le processus.

En 2010, 140 000 m^3 de sédiments de catégories B, ont été traités par l'usine SEDISOL mais beaucoup de ces matériaux finissent dans des installations de stockage (seul 5 % environ sont valorisés chaque année pour la réhabilitation de sites pollués). Le coût de traitement est compris entre 30 et 80 €/m^3.

5.3.3. Actualisation prochaine des textes réglementaires et bilan de l'approche wallonne

L'arrêté du 30 novembre 1995 sera prochainement abrogé du fait de son incompatibilité avec d'autres textes réglementaires, notamment le décret Sols du 5 décembre 2008 et l'arrêté du 14 juin 2001 relatif à la valorisation des déchets. Concrètement, les matériaux qui répondent aux critères de la catégorie A, valorisables suivant l'arrêté du 14 juin 2001, ne répondent pas obligatoirement aux critères du décret sols qui doivent pourtant être pris en considération dans le cadre de valorisation sur des sols. Ces valorisations sur sols concernent toutes les filières identifiées par l'arrêté du 14 juin 2001 à l'exception de l'aménagement et réhabilitation de CET.

Le nouvel arrêté sur la gestion des « matières enlevées des cours d'eau » devrait se baser sur les législations existantes et non plus uniquement sur la classification A et B qui porte

confusion actuellement lorsqu'elle est comparée à d'autres réglementations, notamment le décret « sol ». À la parution de ce rapport, ce texte n'est pas encore disponible. Il semble que ce flou réglementaire soit une des raisons au manque de déboucher des sédiments de catégorie A actuellement en attente dans les CRT. Il faut noter toutefois que la région est très handicapée par la médiocre qualité chimique des boues draguées. Enfin, d'une manière générale, peu de guides d'aide à la gestion sont disponibles ce qui ne facilite pas la valorisation.

5.4. GESTION DES SÉDIMENTS DRAGUÉS EN RÉGION FLAMANDE

5.4.1. Contexte et enjeux

La région Flamande souffre également d'un passif important en matière de dragage des sédiments des voies navigables. En 2002, ce passif était estimé à 11 millions de tonnes (équivalent sec) dans les cours d'eau navigables et 12 millions de tonnes dans les cours d'eau non navigables (IRGT, 2005). Ce passif s'explique par l'augmentation des coûts suite aux évolutions réglementaires (dont la réglementation déchet) qui ont mis fin au régalage sur berge largement pratiqué jusque-là et au manque de voie de gestion alternative.

Sur la façade maritime, le port d'Anvers doit gérer tous les ans environ 600 000 tonnes de sédiments contaminés du fait de l'entretien de ses installations portuaires. Ces matériaux ne peuvent plus être remis en suspension au sein de l'estuaire de la Scheldt et le port s'est lancé en 2012 dans la construction d'une usine de traitement des sédiments dont le cout global devrait atteindre 480 millions d'euros (projet AMORAS - Dockx et Vandekeybus, 2012).

Face à de tels enjeux, le gouvernement flamand a établi en 2005 le « Plan d'exécution sectoriel pour les produits de dragage et de curage (PES) », prévoyant un scénario d'une durée de dix ans, pour prendre en compte l'ensemble des produits de dragage et de curage[12] pollués. Afin de stimuler le traitement (déshydratation, dessablage, nettoyage) et en vue de décourager le déversement en mer, les actions suivantes étaient prévues dans ce PES :

- interdiction à partir de 2005 du stockage de boues riches en sable et/ou réutilisables (suivant les normes Vlarema - voir ci-dessous) ;
- extension de la capacité des décharges ;
- introduction de taxes sur le déversement de produits de dragage et de curage pouvant être traités et apurés.

En 2012, le gouvernement flamand a adopté un arrêté relatif à la gestion durable de cycles de matériaux et de déchets (VLAREMA). Le texte englobe les sédiments de dragage mais également les terres excavées et les déchets de la déconstruction du bâtiment. La philosophie de ce texte est de considérer ces déchets comme une ressource. Le point de basculement du statut de déchets se situe à la sortie du processus de réutilisation, régi par des exigences en termes de composition, d'origine et de type d'utilisation.

Comme en France, la non dangerosité des sédiments doit être établie avant réutilisation. Un déchet est dangereux s'il présente au moins une des 15 propriétés de dangers HP1 à HP15 de la Directive Cadre sur les Déchets.

[12] La distinction entre « dragage » et « curage » est ici administrative : le premier terme est utilisé pour le domaine public, le second pour le privé.

5.4.2. Une valorisation résolument tournée vers les matériaux du génie civil

Les filières ciblées pour les matériaux à valoriser sont les secteurs de la construction, le sol ou le recouvrement d'installation de stockage. Elles sont encadrées par des seuils fixés selon les différents usages possibles pour la valorisation des déchets.

Pour une utilisation dans d'autres domaines comme l'épandage, ils doivent faire l'objet au préalable d'une déclaration de matières premières auprès de l'OVAM (Agence Publique Flamande de Déchets). Cette déclaration est relativement simple. D'après Delcour et Lefebvre (2013), l'OVAM valide le contenu du dossier au plus tard 20 jours civils après le dépôt de la demande et rend sa décision (autorisation ou non) au plus tard 45 jours après avoir validé le contenu du dossier. La valorisation des matériaux est fortement encouragée par ce délai très réduit pour obtenir une déclaration de matières premières.

Pour les usages disposant de seuils, ces derniers se composent d'une valeur maximale permissible de contaminants sur brut et sur éluat (uniquement pour les métaux et assimilés pour ces derniers) (voir Tableau 15 pour la réutilisation comme matériaux de construction).

Plus précisément, 3 catégories sont définies auxquelles correspondent le devenir des sédiments :

- catégorie 1 : réutilisation libre dont remblai le long des cours d'eau (largeur de 5 mètres) ;
- catégorie 2 : utilisation en matériaux de construction et en produit solide ;
- catégorie 3 : mise en décharge non dangereux ou dangereux (existence de décharges spécifiques), traitement en vue d'une réutilisation ou mise en décharge.

Les seuils sur bruts (métaux et assimilés) pour ces réutilisations sont présentés Tableau 16. Si les seuils fixés ne sont pas respectés, une dérogation peut être obtenue auprès de l'OVAM pour des applications spécifiques.

Heavy metals and metalloids Total content (mg/kg dry matter)	
Arsenic (As)	250
Cadmium (Cd)	10
Chromium (Cr)	1250
Copper (Cu)	375
Mercury (Hg)	5
Lead (Pb)	1250
Nickel (Ni)	250
Zinc (Zn)	1250

Heavy metals and metalloids Maximal immission (mg/m²)	
Arsenic (As)	285
Cadmium (Cd)	12
Chromium (Cr)	555
Copper (Cu)	255
Mercury (Hg)	8,2
Lead (Pb)	609
Nickel (Ni)	136
Zinc (Zn)	924

Organic contaminants Total content (mg/kg dry matter)	
Benzo(a)antracene	35
Benzo(a)pyrene	8,5
Benzo(ghi)perylene	35
Benzo(b)fluorantene	55
Benzo(k)fluorantene	55
Chrysene	400
Fenantrene	30
Fluorantene	40
Indeno(1,2,3cd)pyrene	35
Naftalene	20
Hexane	1
Heptane	25
Mineral oil	1000
Octane	90
Polychlorobifenyls (PCB)	0,5
Benzene	0,5
Ethylbenzene	5
Styrene	1,5
Toluene	15
Xylene	15

Tableau 15 : Valeurs maximales permissibles des matériaux pour une réutilisation dans la construction (Cappuyns et al.*, 2015).*

Substances	Seuils engrais	Seuils constructions	Valeurs pour une réutilisation libre	Couche d'étanchéité
	Teneurs en mg/kg MS (flux maximal en g/ha/an)	Teneurs en mg/kg MS	Teneurs en mg/kg MS	Teneurs en mg/kg MS (teneurs sur éluats en mg/kg MS)
Métaux				
Arsenic	150 (300)	250	35	
Cadmium	6 (12)	10	1,2	
Chrome	250 (500)	1250	91	
Cuivre	375 (750)	375	72	
Mercure	5 (10)	5	1,7	
Plomb	300 (600)	1250	120	
Nickel	50 (100)	250	56	
Zinc	900 (1800)	1250	200	

Tableau 16 : Seuils fixés pour les métaux et assimilés par la réglementation flamande pour la réutilisation des sédiments (extrait de Delcour et Lefebvre (2013)). Des seuils sont également disponibles pour certains polluants organiques.

Cas particulier pour une utilisation comme sol

Pour une réutilisation en surface, à l'image des Pays-Bas et de l'Allemagne, 5 types d'usages des sols ont été définis en cohérence avec le décret sur la gestion des sols de 2008 de la région Wallonne. Pour chacun des types d'usage, des seuils différents pour chaque polluant autorise ou élimine la valorisation (Tableau 17).

Les sédiments de dragage dont les teneurs sont inférieures aux valeurs pour une réutilisation libre (Tableau 17) peuvent être utilisés en tant que terre s'ils satisfont les normes sur les pesticides chlorés (Aldrine, Dieldrine, Chlorodane, DDT, DDE, DDD, Endosulfansulfate α-endosulfan, α-HCH, β-HCH, γ-HCH). Les critères à respecter sont les suivants :

- somme inférieure à 0,1 mg/kg MS pour un usage de type I ;
- somme inférieure à 0,2 mg/kg MS pour les autres types d'usage.

Les sédiments présentant des concentrations de substances supérieures aux valeurs de réutilisation libre, ou dont on suspecte qu'ils contiennent des substances polluantes qui ne sont pas limitées par un seuil, peuvent être utilisés comme sol lorsque les conditions suivantes sont remplies (Delcour et Lefebvre, 2013) :

- aucune pollution supplémentaire des eaux souterraines n'est causée ;
- l'exposition potentielle aux polluants n'engendre pas de risque supplémentaire ;
- les concentrations de substances dans les sédiments sont inférieures ou égales à 80 % des normes d'assainissement du sol correspondantes (selon l'usage) ;
- les concentrations moyennes des substances dans les sédiments (ou les terres excavées) sont inférieures ou égales aux concentrations dans le terrain receveur. Pour le remblayage d'une carrière ou d'une mine, il peut être dérogé de cette condition, au plus jusqu'aux valeurs pour le type d'affectation III.

Les usages des sols sont les suivants :

- Type I : zone forestière, naturelle, de vallée, zone agricole de valeur particulière ou d'intérêt écologique ;
- Type II : zone agricole, de parc à fonction semi-agricole, zone rurale à valeur touristique, ou d'habitat à faible densité ;
- Type III : zone d'habitat, parc résidentiel, zone mixte (habitat, industrie) ;
- Type IV : zone de parc, terrain de sport ;
- Type V : zone industrielle.

Substances	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V
Métaux (en mg/kg MS)					
Arsenic	58	58	103	267	267
Cadmium	2	2	69,5	30	
Chrome (III)	130	130	240	560	880
Cuivre	120	120	197	500	500
Mercure	2,9	2,9	4,8	4,8	11
Plomb	200	200	560	735	1250
Nickel	93	93	95	530	530
Zinc	333	333	333	1000	1250

Note : des seuils sont également disponibles pour certains polluants organiques.

Tableau 17 : Seuils fixés sur le sol pour les métaux et assimilés pour la réutilisation des sédiments comme des terres excavées (extrait de Delcour et Lefebvre (2013)).

5.4.3. Bilan de l'approche flamande

La gestion des sédiments de dragage connaît une grande évolution actuellement en région flamande. Comme pour l'Allemagne et les Pays-Bas, la région dispose d'une réglementation « sol » qui permet de guider la réutilisation de matériaux à terre (sédiments et autres déchets) assez facilement. La réactivité de l'OVAM est un point clé dans la procédure de valorisation en Flandres. En effet, pour une valorisation des sédiments dans un usage non prévu par la réglementation, une déclaration de matières premières peut être obtenue en 45 jours. Cette déclaration de matière première permet *a priori* de s'affranchir du statut de déchets des sédiments (Delcour et Lefebvre, 2013).

Les filières les plus utilisées sont les moins techniques (aménagement paysager, remblai, digues). Toutefois, l'épandage en milieu agricole ou assimilés étant déjà fortement pratiqué par l'activité de l'élevage porcin qui doit gérer de grands volumes de lisiers ; il est peu envisagé pour les sédiments.

L'un des problèmes les plus importants demeure toutefois la recherche de débouchés appropriés, techniquement et financièrement. Il n'est pas évident de trouver un marché, même pour les sédiments non pollués (Delcour et Lefebvre, 2013).

On notera enfin, comme dans le cas des Pays-Bas et de l'Allemagne, les approches quasi-similaires de la gestion des sédiments de dragage avec celle des terres excavées.

5.5. GESTION DES SÉDIMENTS DRAGUÉS AU ROYAUME-UNI

5.5.1. Contexte et enjeux

Au Royaume-Uni, des voix se lèvent également pour que l'image du sédiment dragué évolue vers celle d'une ressource à utiliser plutôt que d'un déchet à éliminer (Broad-Authority, 2015). Pourtant dans un rapport récent, la Marine Management Organisation (MMO) tout en reconnaissant que les dépôts de sédiments dragués dans les estuaires peuvent avoir des bénéfices environnementaux indirects, estime qu'ils restent des dépôts de déchets sur le plan réglementaire dont le Marine and Coastal Access Act de 2009 (MMO, 2014). Cette position est inédite en Europe puisque qu'elle va plus loin que l'article 2.3 de la Directive Cadre sur les Déchets qui stipule que « Sans préjudice des obligations prévues par d'autres dispositions communautaires pertinentes, les sédiments déplacés au sein des eaux de surface aux fins de gestion des eaux et des voies d'eau (…) sont exclus du champ d'application de la présente directive, s'il est prouvé que ces sédiments ne sont pas dangereux ».

D'après Le Gac *et al.* (2011), actuellement, la majorité des sédiments issus des activités de dragage maritimes sont immergées puisque les solutions alternatives ne sont généralement pas techniquement et économiquement viables. Les orientations actuelles du gouvernement visent pourtant à favoriser ces filières par rapport à l'immersion. Des groupes techniques réfléchissent sur les valorisations possibles des sédiments de dragage et des consultations sont également en cours pour conseiller le gouvernement sur des solutions économiques et techniques satisfaisantes, à développer dans le futur, en fonction des régions (MMO, 2017). Par exemple, la MMO (Marine Management Organisation) a identifié les 5 voies de valorisation des sédiments marins suivantes (MMO, 2014) :

- le rechargement de plage ;
- le rechargement intertidal (partie du littoral située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées) ;
- le rechargement subtidal (partie du littoral proche des côtes toujours immergée) ;
- le dépôt en mer temporaire avant valorisation ;
- le réemploi dans les aménagements portuaires et la surélévation des parcelles du littoral.

Actuellement, le pays compte 180 sites d'immersion dont 50 % sont situés dans les eaux intérieures (Le Gac *et al*., 2011). Seul 1 % des sédiments dragués sur la façade Manche suivrait une filière de traitement ou de valorisation à terre. Entre 2005 et 2007, une quantité moyenne de 19,4 millions de m^3 de sédiments de dragage a été immergée chaque année en Angleterre sous le régime de licence en place.

Comme en France, les sédiments dragués sont des déchets. La partition dangereux / non-dangereux est effectuée à l'aide des 15 propriétés de dangers (HP1 à HP15). L'ensemble des propriétés doit être évalué. Un guide récemment paru aide les producteurs de déchets à réaliser cette évaluation mais comporte, comme en France, des lacunes concernant la disponibilité des protocoles de caractérisation (Waste classification, 2015).

5.5.2. Des voies navigables intérieures sans vocation à développer le transport de marchandises

Concernant les voies d'eau intérieures britanniques, précisons qu'elles ne sont utilisées pour le transport de marchandise que de façon très marginale de nos jours. Dès le milieu du XIX^e, ce mode de transport a connu la concurrence du chemin de fer, puis, celle de la route après-guerre. La grande majorité des canaux britanniques présentent un gabarit réduit et sont fréquentés par des bateaux ne dépassant pas 21 m de long et 2,10 m de large (Figure 20). C'est globalement moitié moins que le gabarit Freycinet (38,5 m de long et 5,05 m de large)

qui fût la règle en France et en Europe après la modernisation du réseau fluvial à partir de la fin du XIX^{e} siècle. Cette faible capacité de chargement a participé au manque de compétitivité de ce mode de transport. Dès les années 50, le réseau fluvial britannique est principalement utilisé pour le tourisme.

Figure 21 : Un « narrow boat », bateau typique de faible capacité fréquentant les voies navigables britanniques - Source : https://www.waterways.org.uk/blog/historic_narrow_boat_features.
La plupart ont été reconvertis en bateau de tourisme.

Depuis 2012, British Waterways n'existe plus en Angleterre et aux Pays de Galle et a été remplacée par l'association « Canal & River Trust » (https://canalrivertrust.org.uk/). Une partie du budget de cette association vient de dons de la société civile (environ 15 % des revenus globaux). La mission de ce nouvel organisme est de gérer un patrimoine historique et non de développer un mode de transport. En 2016, Canal & River Trust a dépensé 4 % de son budget pour le dragage (soit environ 6 M£). Les volumes traités ne sont pas connus. La voie de gestion privilégiée des matériaux est le renforcement de berge et le régalage.

5.5.3. Une valorisation à terre soumise au « permis environnemental »

Au Royaume-Uni, la plupart des activités liées aux déchets nécessitent un permis environnemental. Ce régime de permis impose d'obtenir une autorisation pour certaines activités et prévoit la surveillance continue de ces activités. Les procédures induites sont payantes.

Le formulaire comprend les informations administratives et techniques requises, ainsi qu'une évaluation proportionnée de l'impact sur l'environnement et la santé.

Deux types de permis environnementaux sont distingués. Pour chaque filière de valorisation, il existe un permis standard suffisant tant que les critères requis sont respectés (Environment Agency, 2010), et un permis « sur mesure », plus long à obtenir, si l'on ne respecte pas au moins un des critères du permis standard (Delcour et Lefebvre, 2013). Dans tous les cas, dans le cadre d'une opération de valorisation de déchets, une évaluation du risque environnemental doit être réalisée par l'intermédiaire d'outils fournis par l'Agence de l'Environnement (AE) (voir par « What's in your backyards ? », http://apps.environment-agency.gov.uk/wiyby/default.aspx).

Ce type de procédure est sensiblement équivalent aux procédures d'Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) en France. Par ailleurs, comme en France, le permis environnemental n'est pas suffisant pour mettre en œuvre l'opération de valorisation : l'ensemble des (nombreuses) autres procédures réglementaires reste applicable. En fonction du contexte, il peut s'agir (MMO, 2014) :

- d'études d'impact environmental (Environmental Impact Assessment (EIA)) :
- du respect de la réglementation sur les habitats naturels (Habitats Regulations Appraisal (HRA) - Écosse) et autres lois de protection de la nature (Countryside and Rights of Way Act, …);
- du respect des dispositions de la Directive cadre sur l'eau (Angleterre et Pays-de-galles) ;
- d'autorisations diverses en lien avec les autres usagers des milieu à draguer (autorités portuaires, Crown Estate, Natural England, Town and Country Planning Act, …),
- d'autorisations de l'Environment Agency en lien avec le respect des dispositions pour la lutte contre les inondations et la préservation de la qualité des eaux (dont Land Drainage Act) ;
- …

À titre d'exemple, le permis standard « Standard rules SR2010No18 - Storage and treatment of dredgings for recovery » (Agence de l'Environnement, 2010) précise que l'installation doit respecter les dispositions suivantes :

- ne pas être dans une zone de protection de la ressource en eau ;
- être à plus de 50 m d'une source ou d'un puit utilisé pour la production d'eau non destinée à un usage domestique ou pour la production de nourriture ;
- être à plus de 250 m d'une source ou d'un puit utilisé pour la production d'eau destinée à un usage domestique ou pour la production de nourriture ;
- être à plus de 50 m d'une source ou d'un puit utilisé pour la consommation humaine ;
- être à plus de 500 m d'un site européen RAMSAR ou d'un site d'intérêt scientifique particulier ;
- se trouver à plus de 10 m d'un cours d'eau.

D'autres prescriptions sont mentionnées comme la liste des déchets acceptés (selon la nomenclature européenne), les quantités maximales à ne pas dépasser (en volume ou en tonne) ou la gestion des odeurs. Si l'une des conditions n'est pas respectée, il est nécessaire de demander un permis « sur mesure ».

Il est également précisé dans le permis standard que « Emissions of substances not controlled by emission limits (excluding odour) shall not cause pollution » mais, la méthode permettant de juger de l'intensité de cette pollution n'est pas renseignée.

D'une manière général le maitre d'ouvrage, ou son mandataire, peut trouver sur le site internet du gouvernement (https://www.gov.uk/guidance/) une liste des informations à fournir pour, par exemple, réaliser un dossier de demande de valorisation de déchets. Mais, au final, à notre connaissance, les protocoles précis permettant la réalisation de ces études, ainsi que les valeurs seuils permettant de classer les matériaux en fonction de leur contamination, manquent.

5.5.4. Bilan de l'approche britannique et les recommandations de la Marine Management Organisation

Au Royaume-Uni, les sédiments issus du dragage sont très majoritairement immergés. L'immersion des sédiments est gérée et autorisée par des agences gouvernementales. Il n'y a pas d'équivalent d'enquête publique pour l'instruction des dossiers, procédure à l'origine d'un délai conséquent pour l'instruction des dossiers en France (voir paragraphe 6.3.5). Les filières de traitement à terre ou de valorisation (rechargement de plage, protection contre les inondations, etc.) sont considérées dans certains cas mais sont loin d'être une pratique courante. Pour de telles options de gestion, la réglementation est beaucoup plus complexe (du type ICPE), voire jugée décourageante par les maîtres d'ouvrage (Le Gac *et al*., 2011 ; MMO, 2014).

Une réflexion est en cours concernant des critères pour la sortie du statut de déchets. Cette réflexion est menée en partenariat entre l'Environment Agency et le Waste and Ressources Action Programme (http://www.environment-agency.gov.uk/).

En 2014, le groupe d'experts de la Marine Management Organisation (MMO) identifiait les défis suivants à relever pour accroitre les volumes de sédiments valorisés au Royaume-Uni :

- la difficulté de maintenir des lignes claires de communication entre le régulateur, les gestionnaires du littoral, des installations portuaires et des opérateurs du dragage ;
- les freins induits par la crainte de porter atteinte à l'environnement ;
- la difficulté de faire coïncider dans le temps disponibilité des matériaux dragués et demande ;
- la question du financement de tels projets de valorisation, en lien avec l'incertitude concernant le succès technique de l'opération ;
- le manque de vision stratégique à l'échelle du territoire qui se traduit par une identification limitée des bénéficiaires et des bénéfices induits par la valorisation ;
- plus largement, une reconnaissance insuffisamment répandue que ces matériaux constituent une ressource pour le territoire et non un déchet à éliminer.

Ce groupe formulait également en conséquence, les recommandations suivantes en terme d'évolution politique :

- exprimer clairement les avantages et les impératifs de la valorisation des sédiments dragués par l'ensemble des parties prenantes en vue de changer la perception des matériaux dragués (notion de ressource pour le territoire) ;
- reconnaître que la valorisation est bénéfique pour de nombreux acteurs dans un objectif de mutualisation des moyens financiers, voire en développant la notion de « Paiement pour services écosystémiques rendus » ;
- mettre en place des sites démonstrateurs et communiquer sur les succès rencontrés dans un but de pédagogie auprès des différents acteurs.

En pratique, les actions à entreprendre comprendraient :

- l'élaboration des plans de gestion des sédiments à l'échelle du bassin versant ;
- l'élaboration de procédures simplifiées applicables sur un territoire donné, pour faciliter la valorisation de matériaux respectant toutefois certains critères incontournables (contamination, granulométrie, …) ;

- l'identification des mécanismes permettant aux aménageurs de considérer systématiquement les sédiments de dragage comme un gisement susceptible de répondre à leur besoin en matériaux ;
- la création d'une plateforme internet permettant de mettre en contact l'offre et la demande en matériaux ;
- la mise à disposition aux acteurs de la filière de guides clairs et pratiques pour les accompagner dans leur projet de valorisation ;
- un retour d'expérience des projets terminés à diffuser et partager avec les acteurs du secteur ;
- l'identification de l'ensemble des organisations susceptibles de financer les travaux de valorisation, y compris, celles bénéficiant des services écosystémiques rendus par le fonctionnement actuel du milieu.

Le rapport de 2014 de la MMO visait également à cartographier les zones sources de sédiment de dragage et les sites susceptibles de les valoriser pour la zone sud du Royaume-Uni. D'une manière générale, la réflexion continue comme le montre la dernière publication en date de la MMO « Evidence requirement R057: Alternative use of dredged material » de septembre 2017 (MMO, 2017).

6. État des lieux de la valorisation à terre des sédiments en France

En France, les opérations de dragage et filières de gestion s'inscrivent dans la logique générale des projets ayant un impact sur l'environnement, et doivent être traités conformément aux réglementations en vigueur, qu'elles soient internationales, européennes ou nationales. Un guide, particulièrement complet, sur la réglementation s'appliquant aux opérations de dragage et de gestion des sédiments dragués, a été établi en 2013 par la DREAL Bretagne et la DDTM du Finistère (DREAL/DDTM, 2013) dont sont issues une partie des informations présentées ci-dessous. Le lecteur est invité à le consulter pour de plus amples informations sur ce sujet.

6.1. DOCUMENTS RÉGLEMENTAIRES MAJEURS ORIENTANT LA GESTION DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE

6.1.1. Rappel du contexte réglementaire communautaire

Les opérations de dragage et de valorisation des matériaux dragués doivent respecter les objectifs visés en particulier par :

- la directive cadre sur l'eau (directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000) : les opérations doivent être compatibles avec l'objectif général de non-dégradation des masses d'eau ;
- la directive cadre stratégie pour le milieu marin (directive 2008/56/CE du 17 juin 2008) : les opérations doivent être compatibles avec les objectifs environnementaux fixés par sous-région marine en vue d'atteindre le Bon État Écologique des eaux marines, en particulier les objectifs liés aux descripteurs « contaminants », « intégrité des fonds marins », « conditions hydrodynamiques » et « biodiversité », sur l'ensemble de la Zone Économique Exclusive ;
- la directive habitat-faune-flore (directive 92/43/CE du 21 mai 1992) dont l'objectif est de maintenir ou de rétablir la biodiversité de l'Union européenne, en recensant, protégeant et gérant les sites d'intérêt communautaire ;
- la directive étude d'impact (directive 2011/92/UE, révisée par la directive 2014/52/UE), qui vise à évaluer les projets ayant une incidence sur l'environnement. Dans le cadre des opérations de dragage, toutes les opérations soumises à autorisation sont soumises à étude d'impact au titre de la loi sur l'eau ;
- la directive cadre sur les déchets (directive 2008/98/CE du 19 novembre 2008), et ses textes affiliés, dont la décision n° 2014/955/UE du 18 décembre 2014 dans laquelle les boues de dragage sont expressément mentionnées comme faisant partie de la liste des déchets (nomenclature 17 05 05* et 17 05 06) ;
- la directive cadre relative aux émissions industrielles (directive IED 2010/75/UE du 24 novembre 2010) dont certaines dispositions s'appliquent aux installations de stockage et de traitement des sédiments (cas des sédiments dangereux).

Ces textes de cadrage sont transcrits en droit national via des circulaires ou arrêtés et repris dans le Code de l'environnement. Les principaux textes se rapportant à la gestion des sédiments sont présentés ci-dessous.

6.1.2. Canaux et cours d'eau

Pour les canaux et cours d'eau, l'Arrêté du 30 mai 2008 fixe « 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 ». Ces opérations relèvent de la rubrique 3.2.1.0 de la nomenclature IOTA annexée au tableau de l'article R. 214-1 du Code de l'environnement. Cet Arrêté est central pour cette gestion mais il ne donne pas à lui tout seul toutes les clefs pour la gestion des sédiments de dragage. Il est, de plus, antérieur à la Directive Cadre sur les Déchets si bien qu'en cas de proposition contradictoire, c'est cette dernière qui s'appliquera.

Ce texte mentionne les éléments à présenter dans les dossiers d'autorisation ou de déclaration : il fait référence aux seuils de l'arrêté du 9 aout 2006 (et à ses mises à jour[13]) et aux seuils d'oxygène dissous des catégories piscicoles. Pour l'ensemble des autres paramètres prescrits, aucun seuil n'est donné alors que le programme demandé est très étendu (ex. sur l'eau : pH, conductivité, température, oxygène dissous, saturation en oxygène, matières en suspension, azote kjeldahl, azote ammoniacal, nitrites, nitrates, orthophosphates, phosphore total).

Il mentionne également la nécessité d'établir un plan de chantier et demande que la destination précise des matériaux extraits et les éventuelles filières de traitement envisagées soient détaillées.

Les sédiments non remis dans le 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 granulats.

Les autres sédiments non remis dans le cours d'eau peuvent faire l'objet notamment :

- d'un régalage sur les terrains riverains dans le respect de l'article L. 215-15 du Code de l'environnement et, le cas échéant, des seuils d'autres rubriques de la nomenclature annexée au tableau de l'article R. 214-1 du Code de l'environnement ;
- d'un épandage agricole, sous réserve de l'accord des propriétaires des parcelles et du respect des prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998 ;
- d'une utilisation directe en travaux publics et remblais sous réserve de test de percolation ou de stabilité, par exemple, permettant d'en mesurer la compatibilité avec une telle utilisation ;
- d'un dépôt sur des parcelles ou d'un stockage, y compris par comblement d'anciennes gravières ou carrières, dans le respect du code de l'urbanisme, des dispositions de l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et des autres rubriques de la nomenclature de l'article R. 214-1 du Code de l'environnement.

Pour chaque voie de gestion envisagée, les textes réglementaires s'y afférant doivent donc être respectés.

[13] 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 au décret n° 93-743 du 29 mars 1993, et ces mises à jour pour les TBT (23 décembre 2009), les HAP (8 février 2013) et les PCB (17 juillet 2014).

6.1.3. Milieu marin

Les textes permettant d'orienter la gestion des sédiments dragués en milieu marin sont plus anciens. Historiquement, ils ont été établis en vue de respecter les conventions internationales sur les rejets en mer :

- la Convention OSPAR pour la protection de l'environnement marin dans l'Atlantique Nord-Est a été mise en place en 1992. Elle définit des objectifs de qualité pour l'Atlantique Nord-Est et délimite des espaces protégés ; cette convention interdit le rejet de tous les déchets ou autres matières en mer, à l'exception, notamment des matériaux de dragage ;
- la Convention de Londres 1972 et le protocole de 1996 pour la prévention des pollutions marines par les déchets rejetés en mer, qui reconnaissent par anticipation, la nécessité pour les États de privilégier une approche préventive globale de la pollution des mers.

Ces deux conventions internationales donnent un cadre réglementaire commun aux pays signataires pour le dragage.

Un document, adopté à la réunion de la convention OSPAR en 2009, détaille les lignes directrices de la convention sur la gestion des matériaux de dragage (OSPAR, 2009). Chaque partie contractante prend en considération ces données comme base de l'élaboration de leur réglementation en matière de dragage. Ce document précise que même si une élimination en mer est possible, il est jugé important par la convention d'étudier les possibilités de valorisation de ces matériaux en tant que ressource potentielle.

Sur cette base, en France, plusieurs guides coordonnés par le Groupe Géode, ont été établis pour aider les maîtres d'ouvrage dans leur opération de dragage et de gestion des sédiments marins (Geode 2012, 2014 et 2016). Des seuils réglementaires ont été élaborés (Arrêté du 9 août 2006) et sont régulièrement mis à jour.

En pratique, toutefois, ces guides encadrent surtout l'immersion des sédiments dragués qui est le devenir de la majorité des matériaux : en 2010, 94 % des sédiments marins dragués ont été immergés en France métropolitaine (CETMEF, 2013). Le CEREMA (ex-CETMEF) ne recense aucune voie de valorisation d'importance à l'exception du rechargement de plage qui peut représenter plusieurs dizaines de pourcent certaines années sur la façade méditerranéenne (Le Gac *et al.*, 2011). Les sédiments marins gérés à terre sont donc essentiellement confinés en site de stockage définitif.

La relocalisation des sédiments en milieu subaquatique en vue de recréer des habitats pour la faune et la flore n'est pas mentionnée comme une option de valorisation des sédiments dragués en France.

6.1.4. Partage du caractère dangereux/non dangereux des sédiments dragués

La parution en septembre 2002 de la « Note juridique sur la gestion des sédiments extraits des cours d'eau et canaux » du Ministère en charge de l'Environnement, a éliminé toute ambiguïté concernant le statut des sédiments extraits des cours d'eau dans le cadre des opérations d'entretien : ces matériaux, s'ils sont gérés à terre, sont des déchets. Comme évoqué au paragraphe 6.1.1, les boues de dragage sont expressément mentionnées dans la liste des déchets sous la nomenclature 17 05 05* et 17 05 06, dans la décision n° 2014/955/UE du 18 décembre 2014, liée la Directive cadre sur les déchets (directive 2008/98/CE). Mais, dès 1991, elles étaient mentionnées dans la Directive cadre 91/689/CE relative aux déchets dangereux (à présent abrogée).

Les « boues de dragage » sont susceptibles de contenir des substances dangereuses et à ce titre, elles constituent une entrée miroir au sens de la Directive cadre « Déchet ». Il appartient au maître d'ouvrage de faire la part entre ce caractère dangereux et non dangereux.

En France, un déchet est dangereux s'il présente au moins une des quinze propriétés de danger de l'annexe III de la Directive cadre « Déchet ».

Jusqu'à récemment, le critère HP14 avait été retenu par le Ministère en charge de l'Environnement comme étant le plus susceptible d'aboutir à un classement en « déchets dangereux » pour les sédiments destinés à une gestion à terre. Un protocole basé sur des essais écotoxicologiques a été élaboré et est préconisé pour cette détermination (Mouvet *et al*., 2012). Toutefois, les nouvelles avancées méthodologiques pour le calcul de la dangerosité des déchets présentées dans le Règlement n° 1357/2014 de la Commission Européenne, puis la parution du Règlement n° 2017/997 en juin 2017, ont relancé la discussion.

Un guide présentant les principes et la méthode pour caractériser la dangerosité des sédiments dragués et gérés à terre, en l'état actuel des connaissances, est finalement attendu pour la fin de l'année 2017 (Bataillard *et al*., 2017).

Les voies de valorisation à terre s'entendent pour des sédiments non dangereux[14].

6.2. VOIES DE GESTIONS MENTIONNÉES DANS L'ARRÊTÉ DU 30 MAI 2008

6.2.1. Épandage

Pour l'épandage, c'est l'Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les « prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées », qui doit être respecté.

La valorisation agricole est envisageable si les sédiments permettent des améliorations significatives de la qualité du sol receveur. La quantité qui peut être apportée est calculée sur une période appropriée par rapport au niveau de fertilité des sols et aux besoins nutritionnels des plantes en éléments fertilisants. Cette quantité doit être compatible avec le décret du 4 mars 1996 relatif aux programmes d'action à mettre en œuvre en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole. Enfin, elle ne doit pas dépasser 30 tonnes de matière sèche par hectare sur une période de 10 ans (Delcour et Lefebvre, 2013).

L'arrêté du 8 janvier 1998 relatif à l'épandage des boues de STEP fixe également des seuils concernant les teneurs en métaux (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn et somme Cr+Cu+Ni+Zn), les teneurs en PCB, en fluoranthène, en benzo(b)fluoranthène et en benzo(a)pyrène (Tableau 18).

Des flux cumulés sur 10 ans sont également fixés ainsi que des teneurs maximales dans les sols recevant les apports.

Un plan d'épandage doit être validé afin de mettre en œuvre cette valorisation.

[14] Précisons sur ce point qu'un déchet dangereux reste théoriquement valorisable mais, en pratique, on considère que le maître d'ouvrage aura du mal à apporter toutes les garanties de l'innocuité de la voie de valorisation choisie dans le cas des boues de dragage. Si la valorisation reste envisagée, il est nécessaire de supprimer au préalable le caractère dangereux des déchets.

Substances	Valeur limite dans les sols support (mg/kg MS)	Valeur limite dans les sédiments (mg/kg MS)	Flux maximal apporté par les sédiments en 10 ans (mg/m²)
Cadmium	2	10	0,015
Chrome	150	1000	1,5 (1,2)
Cuivre	100	1000	1,5 (1,2)
Mercure	1	10	0,015 (0,012)
Nickel	50	200	0,3
Plomb	100	800	1,5 (0,9)
Zinc	300	3000	4,5 (3)
Chrome+Cuivre+Nickel +Zinc	-	4000	6 (4)
Sélénium	-	-	0,12 pour les pâturages uniquement
PCB (somme de 7)	-	0,8	1,2
Fluoranthène	-	5 (4)	7,5 (6)
Benzo(b)fluoranthène	-	2,5 (2)	4
Benzo(a)pyrène	-	2 (1,5)	3 (2)

( ) : valeurs pour les pâturages ou les sols de pH<6

Tableau 18 : Seuils fixés pour l'épandage agricole d'après l'arrêté de 1998 (extrait de Delcour et Lefebvre, 2013).

6.2.2. Régalage sur berge, aménagement paysager, remblaiement et réhabilitation de site

Le régalage sur berge est autorisé dans le respect de l'article L. 215-15 du code de l'environnement et, le cas échéant, des seuils d'autres rubriques de la nomenclature annexée au tableau de l'article R. 214-1 du code de l'environnement. L'article L.215-15 du Code de l'environnement précise que le dépôt ou l'épandage des produits de curage est subordonné à l'évaluation de leur innocuité vis-à-vis de la protection des sols et des eaux (Delcour et Lefebvre, 2013).

La circulaire du 24 décembre 2010 relative aux modalités d'application des décrets n° 2009-1341, n° 2010-369 et n° 2010-875 modifiant la nomenclature des installations classées exerçant une activité de traitement de déchets précise à l'annexe 2 que les opérations d'aménagement de berges ou de remblais à l'aide de sédiments non dangereux ne sont pas soumises à la réglementation ICPE. Les opérations d'aménagements paysagers réalisés à l'aide de sédiments non dangereux ne sont également pas soumises à la réglementation ICPE pour autant que ces aménagements répondent à un besoin (c'est-à-dire que les sédiments viennent en substitution de terres qui auraient de toute façon été utilisées pour le projet) (Delcour et Lefebvre, 2013).

Sont également autorisés le remblaiement de carrière lorsque les sédiments peuvent être considérés comme inertes (selon les critères d'acceptation décrits) ou la valorisation pour la réalisation de travaux d'aménagement sous réserve de démontrer que l'impact environnemental des sédiments valorisés est acceptable eu égard à l'usage envisagé. On notera que l'arrêté « carrière » du 22 septembre 1994 a été modifié le 30 septembre 2016 : l'article 6 permet à présent de tenir compte du fond géochimique local pour adapter les critères d'acceptation des déchets.

Dans le cas d'une utilisation en réaménagement de carrière, l'arrêté d'autorisation d'exploitation de la carrière doit prévoir explicitement la possibilité d'accueillir des sédiments issus des dragages et les contrôles afférents. À défaut, ce dernier doit être révisé. Cette même circulaire du 24 décembre 2010 précise que les opérations de réhabilitation de sites pollués

ne sont pas considérées comme des opérations de stockage de déchets. Ces réhabilitations relèvent de la gestion des sites et sols pollués. L'utilisation de sédiments doit être validée dans le cadre du plan de gestion, validé par l'Autorité Environnementale (Delcour et Lefebvre, 2013).

Tous ces travaux restent cependant soumis à la loi sur l'eau (Circulaire du 4 juillet 2008). Dans la plupart des cas, ces prescriptions portent la mention « sous réserve de démontrer que l'impact environnemental des sédiments valorisés est acceptable eu égard à l'usage envisagé ». **Il appartient donc au maitre d'ouvrage de prouver l'innocuité de l'opération par une étude appropriée. Aucun seuil de qualité des sédiments n'est fixé (à l'exception des déchets inertes pour les carrières[15]), une évaluation des risques sanitaires et environnementaux doit donc être réalisée au cas par cas.**

6.2.3. Valorisation en travaux publics

La valorisation en travaux publics est mentionnée dans l'Arrêté de mai 2008, mais de nouveau, figure la mention « sous réserve de test de percolation ou de stabilité, par exemple, permettant d'en mesurer la compatibilité avec une telle utilisation ».

Actuellement, outre la norme méthodologique NF EN 12920+A1 (AFNOR, 2008c) qui reste très générale, seul le guide SETRA « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière » de mars 2011 (SETRA, 2011) précise le cadre de la valorisation des déchets pour deux usages :

- les sous-couches de chaussée ou d'accotement, revêtus d'une couche de surface ;
- les remblais techniques connexes à l'infrastructure ou en accotement dès lors qu'il s'agit d'usages recouverts.

Depuis mars 2016, une note de la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère en charge de l'Environnement, autorise la fabrication de merlons de protection visuelle, acoustique ou thermique à partir de sédiments, en mentionnant le guide SETRA comme document de référence pour établir la compatibilité des matériaux avec cet usage.

Ce guide n'est pas réglementaire mais il établit un cadre pour les opérations de valorisation.

Le principe d'application du guide repose sur trois niveaux de caractérisation environnementale. Le premier niveau fixe des seuils en polluants sur matériaux bruts et en lixiviation. Si le premier niveau n'est pas vérifié, le second niveau fixe des seuils sur percolation. Lorsque le second niveau n'est pas vérifié, il est possible de réaliser une étude spécifique (plot expérimental, etc.) afin de justifier de l'innocuité environnementale de la valorisation.

Toutefois, ces essais ont été réfléchis dans le cadre de déchets grossiers si bien qu'un groupe de travail sous l'égide du Ministère en charge de l'Environnement, étudie actuellement son adaptation aux sédiments de dragage de granulométrie fine (fraction limoneuse majoritaire).

Par extension, il est possible de considérer que toute utilisation dans le domaine du BTP, notamment dans la formulation des bétons ou la fabrication de briques, est autorisée « sous réserve de démontrer que l'impact environnemental des sédiments valorisés est acceptable eu égard à l'usage envisagé ».

[15] Pour les opérations d'aménagement, les sédiments sont notamment exclus du domaine d'application du guide « Terres excavées » du BRGM (Blanc, 2012).

6.3. CONSÉQUENCES DU RÉGIME AUTORISATION/DÉCLARATION SUR LES ÉTUDES PRÉALABLES DES PROJETS DE DRAGAGE ET DE GESTION À TERRE DES SÉDIMENTS

Les paragraphes ci-dessous passent en revue les demandes de l'administration en vue d'instruire un dossier de dragage et de gestion à terre des sédiments.

6.3.1. Le régime Autorisation / Déclaration

Les opérations de dragage et de gestion à terre des sédiments peuvent être soumises à déclaration (D) ou autorisation (A) au titre de l'article R. 214-1 du Code de l'environnement relatif à la nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-3 du code de l'environnement. **Le basculement d'un régime vers un autre dépend de critères techniques quantitatifs propres à l'opération envisagée**.

Par exemple, pour le dossier loi sur l'eau, les sites d'essorage peuvent faire l'objet d'une procédure au titre des rubriques :

- 2.1.5.0. : rejet d'eaux pluviales dans les eaux douces superficielles ou sur le sol ou dans le sous-sol, la surface totale du projet, augmentée de la surface correspondant à la partie du bassin naturel dont les écoulements sont interceptés par le projet, étant : 1° Supérieure ou égale à 20 ha (A) ; 2° Supérieure à 1 ha mais inférieure à 20 ha (D) ;
- 2.2.1.0. : rejet dans les eaux douces superficielles susceptible de modifier le régime des eaux, à l'exclusion des rejets visés à la rubrique 2.1.5.0 ainsi que des rejets des ouvrages visés aux rubriques 2.1.1.0 et 2.1.2.0, la capacité totale de rejet de l'ouvrage étant : 1° Supérieure ou égale à 10 000 m3 / j ou à 25 % du débit moyen interannuel du cours d'eau (A) ; 2° Supérieure à 2 000 m3 / j ou à 5 % du débit moyen interannuel du cours d'eau mais inférieure à 10 000 m3 / j et à 25 % du débit moyen interannuel du cours d'eau (D).

Les filières de valorisation peuvent faire l'objet d'une procédure au titre des rubriques :

- 1.4.0. Épandage d'effluents ou de boues, à l'exception de celles visées à la rubrique 2. 1.3.0 ;
- 2.2.3.0. Rejet dans les eaux de surface, à l'exclusion des rejets visés aux rubriques 4.1.3.0, 2.1.1.0, 2.1.2.0 et 2.1.5.0 ;
- 2.4.0. Installations ou activités à l'origine d'un effluent correspondant à un apport au milieu aquatique de plus de 1 t / jour de sels dissous (D) ;
- 2.3.1.0. Rejets d'effluents sur le sol ou dans le sous-sol, à l'exclusion des rejets visés à la rubrique 2.1.5.0, des rejets des ouvrages visés aux rubriques 2.1.1.0, 2.1.2.0, des épandages visés aux rubriques 2.1.3.0 et 2.1.4.0, ainsi que des réinjections visées à la rubrique 5.1.1.0. (A).

6.3.2. Dossier d'Autorisation « Loi sur l'eau »

Le contenu du dossier d'autorisation « Loi sur l'eau » est mentionné à l'article R214-6 du Code de l'environnement. Ce dossier doit comprendre :

- la description du projet ;
- un document d'incidences ou une étude d'impact si le projet est soumis à étude d'impact.

Le document d'incidence doit indiquer « les incidences directes et indirectes, temporaires et permanentes, du projet sur la ressource en eau, le milieu aquatique, l'écoulement, le niveau

et la qualité des eaux, y compris de ruissellement, en fonction des procédés mis en œuvre, des modalités d'exécution des travaux ou de l'activité, du fonctionnement des ouvrages ou installations, de la nature, de l'origine et du volume des eaux utilisées ou affectées et compte tenu des variations saisonnières et climatiques, (…), la compatibilité du projet avec le schéma directeur ou le schéma d'aménagement et de gestion des eaux et avec les dispositions du plan de gestion des risques d'inondation. (…) les mesures correctives ou compensatoires envisagées. (…) Les moyens de surveillance prévus et, si l'opération présente un danger, les moyens d'intervention en cas d'incident ou d'accident ».

Dans le cas où le projet se situe sur un site natura 2000 ou à proximité, le document d'incidence doit également comporter « l'évaluation des incidences du projet sur un ou plusieurs sites Natura 2000, au regard des objectifs de conservation de ces sites. Le contenu de l'évaluation d'incidence Natura 2000 est défini à l'article R. 414-23 et peut se limiter à la présentation et à l'exposé définis au I de l'article R. 414-23, dès lors que cette première analyse conclut à l'absence d'incidence significative sur tout site Natura 2000 ».

Le dossier loi sur l'eau doit porter sur la totalité du projet ce qui intègre la gestion à terre des sédiments pour un projet de dragage.

Tout projet soumis à autorisation au titre de la loi sur l'eau est soumis à enquête publique ce qui renforce l'importance d'une bonne acceptation sociale.

Le dossier de déclaration, quant à lui, comprend à peu près les mêmes éléments que le dossier d'autorisation, à quelques nuances près (notamment, pour le degré d'étude des incidences). Mais ce dossier n'est pas soumis à enquête publique ce qui allège son instruction.

6.3.3. Dossier ICPE

Les activités de gestion des sédiments de dragage, dès lors que les sédiments ont un statut de déchets, c'est-à-dire lorsqu'ils sont gérés à terre, sont susceptibles d'entrer dans le champ de la législation des ICPE.

La circulaire du 25 avril 2017 de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) relative aux modalités d'application de la nomenclature des ICPE du secteur de la gestion des déchets (DGPR, 2017) stipule que **l'entreposage temporaire des sédiments** en amont d'un processus de valorisation ou d'élimination peut être encadré par la (seule) loi sur l'eau, au travers de la rubrique 2.2.3.0 « rejets dans les eaux de surfaces ».

Pour cela, toutefois :

- aucune activité de traitement ne doit être mise en œuvre, au cours de cette gestion (seuls le ressuyage, la déshydratation des matériaux afin d'en limiter le volume pour en faciliter le transport, et la séparation granulométrique du sédiment peuvent être pratiqués) ;
- les sédiments ne doivent pas avoir été caractérisés comme dangereux ;
- les sédiments doivent être entreposés dans un lieu approprié permettant de récupérer les eaux de ressuyage afin d'en contrôler le rejet ;
- le site d'entreposage doit se situer dans le site portuaire le plus proche du lieu de dragage pour les sédiments marins et à proximité du lieu de dragage dans les autres cas ;
- la durée d'entreposage de ces sédiments doit être mentionnée dans l'autorisation délivrée au titre de la loi sur l'eau pour chaque chantier ou chaque phase de chantier (concernant les autorisations de plusieurs années pour les dragages d'entretien). Elle doit rester limitée à 1 an quand les sédiments ont vocation à être éliminés et à 3 ans s'ils ont vocation à être valorisés.

Dans tous les autres cas (plateforme pérenne de tri, transit, regroupement, site de stockage définitif ou supérieur à 3 ans), l'entreposage des sédiments de dragage est encadré par la réglementation des ICPE. Concernant le stockage définitif, les Arrêtés Ministériels du 15 février 2016 (ISDND et sédiments) proposent une adaptation possible des dispositifs de confinement des casiers de stockage de sédiments (stockage mono-déchets). L'objectif est d'alléger les dispositifs d'étanchéité sous réserve de produire une étude d'évaluation des risques pour l'environnement dus aux modalités de confinement alternatif envisagé. Un guide de recommandations pour la réalisation de ces études est attendue pour le premier semestre 2018.

On notera enfin que les ouvrages et aménagements attachés à une opération de valorisation des sédiments de dragage, eux, ne relèvent pas d'un classement ICPE.

Un dossier de demande d'autorisation ICPE doit notamment contenir :

- l'état initial du projet ;
- différents plans de l'installation et de ses abords ;
- une étude d'impact ;
- une étude de dangers.

Comme pour le dossier d'autorisation, l'instruction du dossier ICPE nécessite une enquête publique.

Le délai entre le dépôt du dossier et l'obtention de l'arrêté d'autorisation est au minimum de 9 mois mais peut dépasser 12 mois.

La fourniture d'un tel dossier nécessite des compétences spécifiques, du temps et de l'investissement.

Étude de dangers

L'étude de dangers a pour objectifs de :

- identifier et analyser les risques, que leurs causes soient d'origine interne ou externe à l'installation concernée ;
- évaluer l'étendue et la gravité des conséquences des accidents majeurs identifiés ;
- justifier les paramètres techniques et les équipements installés ou à mettre en place pour la sécurité des installations permettant de réduire le niveau des risques pour les populations et pour l'environnement ;
- exposer les éventuelles perspectives d'amélioration en matière de prévention des accidents majeurs ;
- contribuer à l'information du public et du personnel ;
- permettre une concertation ultérieure entre acteurs locaux en vue d'une définition des zones dans lesquelles une maîtrise de l'urbanisation autour de l'établissement est nécessaire.

L'étude de dangers doit préciser l'ensemble des mesures de maîtrise des risques mises en œuvre à l'intérieur de l'établissement, qui réduisent le risque à l'intérieur et à l'extérieur de l'établissement à un niveau jugé acceptable par l'exploitant.

Son contenu doit permettre d'autoriser et réglementer la ou les installations dont elle est l'objet après examen du caractère suffisant ou non du niveau de maîtrise des risques, en référence

à la circulaire du 10 mai 2010 relative aux critères d'appréciation de la démarche de maîtrise des risques d'accidents susceptibles de survenir dans les établissements dits *« Seveso »* visés par l'arrêté du 10 mai 2000 modifié.

La méthodologie mise en œuvre dans une étude de dangers s'appuie sur les étapes suivantes :

- **description et caractérisation de l'environnement** en distinguant l'environnement comme source potentielle d'agression et l'environnement comme cible ;
- **identification et caractérisation des potentiels de dangers** qui visent à désigner les potentiels de dangers liés aux produits, aux équipements et installations, et à analyser les accidents survenus sur le site et sur d'autres sites proposant des installations, des produits et des procédés comparables ;
- **analyse des potentiels de dangers** et des principales dispositions de réduction des potentiels de dangers. Cette partie vise à présenter les dispositions prises pour d'une part, supprimer ou substituer aux procédés dangereux, à l'origine des dangers potentiels, des procédés ou produits présentant des risques moindres et/ou d'autre part, réduire autant que possible les quantités de matières en cause ;
- méthodes et moyens de calcul utilisés pour la modélisation des phénomènes dangereux ;
- modélisation des conséquences des phénomènes dangereux maximum retenus. L'objectif est de **modéliser les conséquences des phénomènes dangereux**, représentatifs des potentiels de dangers et totalement découplés du niveau de maîtrise des risques et des barrières de sécurité actives existantes ;
- évaluation des effets **dominos** ;
- **évaluation des risques** des installations présentant des potentiels de dangers notables afin d'identifier les barrières de sécurité (actives et passives) existantes ainsi que les phénomènes dangereux résiduels ;
- évaluation des **Accidents Majeurs** et hiérarchisation ;
- organisation des **secours** ;
- synthèse des **mesures compensatoires** éventuelles.

Le délai nécessaire pour réaliser une étude de dangers varie entre 1 et 3 mois selon la nature de l'installation à étudier.

Pour un projet de gestion à terre de sédiments, l'étude de dangers sera relativement simple et pourra être menée entre 10 jours et 1 mois selon l'ampleur du projet et son état d'avancement. Le budget nécessaire devrait être compris entre 5 et 8 000 € HT.

Étude d'impact

Le contenu de l'étude d'impact est mentionné à l'article R122-5 du code de l'environnement. Cette étude comprend notamment :

- une description du projet ;
- une analyse de l'état initial ;
- une analyse des effets négatifs et positifs, directs et indirects, temporaires (y compris pendant la phase des travaux) et permanents, à court, moyen et long terme ;
- une analyse des effets cumulés du projet avec d'autres projets connus ;
- les raisons pour lesquelles, eu égard aux effets sur l'environnement ou la santé humaine, le projet présenté a été retenu ;

- la compatibilité du projet avec l'affectation des sols définie par le document d'urbanisme opposable, ainsi que, si nécessaire, son articulation avec les plans, schémas et programmes mentionnés à l'article R. 122-17, et la prise en compte du schéma régional de cohérence écologique dans les cas mentionnés à l'article L. 371-3 ;
- les mesures prévues par le pétitionnaire ou le maître de l'ouvrage pour : i) éviter les effets négatifs notables du projet sur l'environnement ou la santé humaine et réduire les effets n'ayant pu être évités, ii) compenser, lorsque cela est possible, les effets négatifs notables du projet sur l'environnement ou la santé humaine qui n'ont pu être ni évités ni suffisamment réduits. S'il n'est pas possible de compenser ces effets, le pétitionnaire ou le maître d'ouvrage justifie cette impossibilité. La description de ces mesures doit être accompagnée de l'estimation des dépenses correspondantes, de l'exposé des effets attendus de ces mesures à l'égard des impacts du projet sur les éléments visés au 3° ainsi que d'une présentation des principales modalités de suivi de ces mesures et du suivi de leurs effets sur les éléments visés au point 3 ;
- une présentation des méthodes utilisées pour établir l'état initial et évaluer les effets du projet sur l'environnement ;
- une description des difficultés éventuelles, de nature technique ou scientifique, rencontrées par le maître d'ouvrage pour réaliser cette étude ;
- lorsque le projet concourt à la réalisation d'un programme de travaux dont la réalisation est échelonnée dans le temps, l'étude d'impact comprend une appréciation des impacts de l'ensemble du programme.

Selon l'annexe à l'article R122-2, les projets de dragage peuvent être soumis à étude d'impact :

- au titre du dragage ;
- au titre de l'essorage ou dépôt nécessaire ;
- au titre de l'affouillement et exhaussements du sol ;
- au titre de la valorisation ;
- au titre du projet dans sa globalité.

Tout projet soumis à étude d'impact est soumis à enquête publique conformément à l'article L 123-2 du code de l'environnement.

La réalisation d'une étude d'impact comprend généralement, la réalisation d'autres études spécifiques :

- **étude faune flore** : ce genre d'étude doit être réalisée en 1 ou plusieurs étapes selon la sensibilité des milieux concernés ; selon les espèces et les habitats, les prospections de terrain seront à planifier et pourront couvrir une durée totale de 3 mois à 1 an. Ces études doivent être lancée une fois les terrains de dépôt choisis ; et le résultat de ces études peuvent exclure un terrain de dépôt, nécessiter un dossier supplémentaire (autorisation de destruction ou de déplacement d'espèces ou d'habitat protégé) ou des mesures compensatoires spécifiques (période de travaux, etc.). L'étude faune flore doit généralement intégrer l'étude des espèces et habitats aquatiques (problématique des frayères notamment) mais également terrestres (au droit des futures zones de dépôt) ; les compétences ne sont pas toujours assurées par le même BE ce qui demande un travail de coordination supplémentaire au maitre d'ouvrage. Cette étude faune/flore peut être menée dans le cadre d'un dossier d'incidence Natura 2000 : dans ce cas, le dossier N2000 ;
- **étude paysagère** : la réalisation de terrains d'essorage nécessite généralement une étude paysagère permettant de savoir comment intégrer ces terrains dans l'environnement du

site. Il s'agit là d'un impact qui peut être parfois très sensible selon le contexte du site (champ de visibilité d'un monument classé) ;

- **étude trafic** : le transport des sédiments entre les sites de dragage, le site d'essorage et le ou les sites de valorisation peut induire un trafic poids lourds important ; l'état des routes empruntées doit faire l'objet d'une étude spécifique afin de déterminer les itinéraires les mieux adaptés ainsi que les conditions de remise en état éventuelle. Une telle étude n'est pas à négliger et peut nécessiter un temps de réalisation important et des compétences en techniques routières spécifiques. La durée et le montant d'une étude de trafic est fonction du linéaire à parcourir et du nombre d'itinéraires possibles ;
- **études foncières** : une fois les zone de dépôt localisée, un volet foncier doit être réalisé afin d'identifier les propriétaires et déterminer les conditions d'occupation des parcelles concernées ; ceci comprend généralement une phase de négociation, à durée incertaine et qui peuvent remettre en question le choix des zones de dépôt ;
- **études urbanistiques** : la conception des zones de gestion à terre doit être réalisée en intégrant les contraintes des documents d'urbanisme des communes concernées. Ces contraintes peuvent influencer notamment la hauteur et l'emprise des ouvrages réalisés. La consultation des documents d'urbanisme est donc à prévoir.

6.3.4. Simplifier pour gagner en efficacité

Avec les nouvelles dispositions de la circulaire du 25 avril 2017 relatives aux modalités d'application de la nomenclature des ICPE du secteur de la gestion des déchets (DGPR, 2017), les travaux de dragage et de gestion à terre des sédiments peuvent éventuellement faire l'objet d'un seul dossier « dragage et devenir des sédiments », côté loi sur l'eau, puisque le dossier « stations de transit », n'est plus à faire côté ICPE. Ceci devrait permettre d'alléger les procédures, et diminuer les délais d'instruction.

On notera toutefois que même sans innovation en vue de proposer une nouvelle voie de valorisation à terre qui pourrait demander des études spécifiques pour apprécier l'impact environnemental des sédiments ainsi valorisés, la réglementation actuelle, en France, reste particulièrement exigeante pour le maître d'ouvrage. Cet état de fait a déjà été mentionné dans un rapport de l'inspection générale de l'environnement en 2003 (Armengaud *et al.*, 2003). Ces auteurs mettent en évidence les inconvénients de la lourdeur administrative que peut parfois subir une opération de dragage ainsi que les conséquences de voir mêler les avis d'autant de services de police différents (Eau, ICPE, pêche, agriculture, Natura 2000, urbanisme, …). « Renforcer la coordination entre services police de l'eau et services de l'inspection des installations classées sur l'instruction des dossiers de dragage et de gestion à terre des sédiments », faisait également partie des recommandations du Grenelle de la mer.

On notera également la quasi-absence de seuils permettant de statuer sur la possible valorisation des sédiments dans un contexte donné, à l'exception de l'épandage agricole.

Les efforts de simplification doivent donc être poursuivis. Actuellement, des expérimentations sont menées en application de la loi n° 2014-1 du 2 janvier 2014 habilitant le gouvernement à simplifier la vie des entreprises et projets d'ordonnances ; le gouvernement est habilité à adopter des ordonnances qui autoriseront le préfet à lancer différentes expérimentations dans un nombre limité de régions et pour une durée maximale de 3 ans.

Ce point fait également partie des recommandations du Grenelle.

6.3.5. Délais et coûts des études préalables

Au final, même si l'ampleur de certaines études peut fortement varier en fonction du contexte du projet, la durée totale des études préalables peut facilement atteindre 2 ans dans le cas d'un dossier ICPE (Tableau 19).

	Montant indicatif (€ HT)	Étude/rédaction	Instruction	Durée totale
ICPE	> 15 000	6 à 12 mois	6 à 12 mois	12 à 24 mois
Étude d'impact	> 15 000	> 2 mois	/	/
Étude faune flore	10 000 à 40 000	3 mois à 1 an	/	/
Étude de danger	5 000 à 10 000	10 jours à 1 mois	/	/
Étude trafic	> 5 000	> 1 mois	/	/
Étude paysage	5 000 à 20 000	> 1 mois	/	/
Plan d'épandage	> 5 000	> 1 mois	/	/
Dossier Loi sur l'eau :			/	/
Déclaration	> 15 000	1 à 3 mois	de 2 à 4 mois	3 à 7 mois
Autorisation	> 15 000	2 à 6 mois	8 à 12 mois	10 à 18 mois
Enquête publique	> 5 000	1 à 3 mois	4 mois	

Tableau 19 : Estimation des coûts et des délais de réalisation et d'instruction pour une opération de dragage et gestion à terre des sédiments (selon l'expérience des auteurs).

Le délai d'enquête publique est compris dans le délai d'instruction du dossier d'autorisation.

Le délai dépend étroitement de la qualité des dossiers transmis à la Préfecture ; tous les aspects des travaux doivent être mentionnés, y compris le devenir des sédiments ; les services instructeurs peuvent rejeter un dossier ou demander à ce qu'il soit repris si, par exemple, le devenir des sédiments est jugé trop succinctement abordé.

Le délai des études n'est pas additionnel : certaines études peuvent être menées en parallèles, c'est ce qui est généralement fait. Mais parfois, cela ne permet pas de gagner du temps car la concertation et le dimensionnement des mesures réductrices et/ou compensatoires doivent être menés de front ; le maitre d'ouvrage doit alors consulter les BE ayant participé aux études préalables, les autres services instructeurs et l'ensemble des acteurs locaux en même temps. Même si cela garantit généralement la réussite d'un projet, cela nécessite des compétences variées, une concertation étroite, une équipe de maitre d'ouvrage à long terme (ce qui, en collectivités, n'est pas toujours évident en raison des mutations) et compétente. Le planning global de l'opération est généralement difficile à estimer de manière définitive.

6.4. CONSÉQUENCE DU STATUT DE DÉCHET DES SÉDIMENTS DRAGUÉS VALORISABLES

Il est souvent entendu lors de journées techniques de la part des acteurs économiques de la gestion à terre des sédiments que leur statut de déchets freine leur valorisation et, donc, que la sortie du statut de déchet permettrait d'accroitre les volumes valorisés. Quelle analyse peut-on porter sur cet avis ?

6.4.1. Quelles différences d'interprétations entre pays européens ?

Comme nous l'avons vu au paragraphe 5.1., la réglementation hollandaise a manifestement placé la frontière des eaux de surface plus loin que le lit principal des rivières en l'étendant jusqu'au bassin versant qui comprend le milieu aquatique et le milieu terrestre adjacent. Dès lors, l'article 2.3 de la Directive Cadre « Déchets » (DCD) qui stipule que « les sédiments déplacés au sein des **eaux de surface** aux fins de gestion des eaux et des voies d'eau, de prévention des inondations, d'atténuation de leurs effets ou de ceux des sécheresses ou **de mise en valeur des terres** sont exclus du champ d'application de la présente directive, s'il est prouvé que ces sédiments ne sont pas dangereux », justifie que ce pays n'applique pas en premier lieu la réglementation sur les déchets mais celle sur le réemploi des matériaux (Building materials decree) et celle sur la qualité des sols (Soil Quality Decree) (EUDA, 2010).

Les règlementations française, belge, allemande, et britannique, quant à elles, ont arrêté les « eaux de surface » au lit principal des rivières si bien qu'un sédiment dragué géré à terre est extrait de son milieu et devient juridiquement un déchet. Cette position est globalement en cohérence avec les Directives cadre « Eau », « Sol » (non parue), et « Déchets » qui ne considèrent qu'à la marge le continuum entre les compartiments sol-eau-sédiment de l'environnement[16].

En conséquence, et en pratique, aux Pays-Bas, les sédiments dragués ne sont considérés comme des déchets que s'ils ne peuvent pas être « valorisés » au sein du bassin versant[17]. « Ré-employés » devrait-on dire, car, précisément, les néerlandais n'utilisent pas le terme « valorisation » (en anglais « recovery ») des sédiments dragués mais « réemploi » (en anglais « re-use ») car de cette manière, leur position est en accord avec la Directive Cadre « Déchets » dont la hiérarchie de gestion classe le « réemploi » dans la prévention et non dans la production de déchets (Figure 22).

Le Tableau 20 compare les termes de la directive cadre « déchet » en version anglaise et française.

[16] Le projet de Directive cadre Sol, initié en 2006 et abandonné en 2014, ne citait qu'une seule fois le terme « sédiment » pour signifier l'impact potentiel de l'érosion des sols sur le blocage des barrages hydroélectrique et l'endommagement des infrastructures hydrauliques des pays voisins de l'Union Européenne (page 7 de la proposition 2006/0086). La Directive cadre Eau quant à elle mentionne les sédiments à 3 reprises et sa Directive fille 2008/105/CE à 33 reprises, mais à chaque fois en lien avec leurs teneurs potentielles en polluants. La Directive cadre sur les Déchets, est quant à elle très explicite et classe les boues de dragage comme des déchets.

[17] Sur le plan scientifique, pédologues et scientifiques du milieu aquatique, débattent actuellement sur la pertinence de considérer les sédiments sur lesquels se développent les mangroves et les prairies sous-marines comme des sols (Kristensen et Rabenhorst, 2015) ce qui tendrait effectivement à gommer la différence entre les milieux « sol » et « sédiment ».

Figure 22 : Gestion hiérarchique des déchets selon la Communauté Européenne. La réutilisation d'un produit (re-use) ne le classe pas comme un déchet (source http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/).

Que l'on soit d'accord ou pas avec cette interprétation de la loi européenne, cette différence de statut des boues de dragage est-elle, au final, anecdotique ou a-t-elle une conséquence sur leur gestion à terre ?

Version anglophone	Version francophone
Article 2.3: Without prejudice to obligations under other relevant Community legislation, sediments relocated inside surface waters for the purpose of managing waters and waterways or of preventing floods or mitigating the effects of floods and droughts or land reclamation shall be excluded from the scope of this Directive if it is proved that the sediments are non-hazardous.	Article 2.3 : Sans préjudice des obligations prévues par d'autres dispositions communautaires pertinentes, les sédiments déplacés au sein des eaux de surface aux fins de gestion des eaux et des voies d'eau, de prévention des inondations, d'atténuation de leurs effets ou de ceux des sécheresses ou de mise en valeur des terres sont exclus du champ d'application de la présente directive, s'il est prouvé que ces sédiments ne sont pas dangereux.
Article 3-12 (extrait) : 'prevention' means measures taken before a substance, material or product has become waste, that reduce: (a) the quantity of waste, including through the re-use of products or the extension of the life span of products;…	Article 3-12 (extrait) : «prévention»: les mesures prises avant qu'une substance, une matière ou un produit ne devienne un déchet et réduisant: a) la quantité de déchets, y compris par l'intermédiaire du réemploi ou de la prolongation de la durée de vie des produits;…
Article 3.13: '**re-use'** means any operation by which **products or components that are not waste** are used again for the same purpose for which they were conceived;	Article 3.13 : «**réemploi**»: toute opération par laquelle des **produits ou des composants qui ne sont pas des déchets** sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus;
Article 3.15: '**recovery'** means any operation the principal result of which is waste serving a useful purpose by replacing other materials which would otherwise have been used to fulfil a particular function, or waste being prepared to fulfil that function, in the plant or in the wider economy. Annex II sets out a non-exhaustive list of recovery operations;	Article 3.15 : «**valorisation**»: toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie. L'annexe II énumère une liste non exhaustive d'opérations de valorisation;
Article 3-16 : '**preparing for re-use'** means checking, cleaning or repairing recovery operations, by which products or components of products that have become waste are prepared so that they can be re-used without any other pre-processing;	Article 3-16 : «**préparation en vue du réemploi**»: toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation, par laquelle des produits ou des composants de produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement;

Tableau 20 : Comparatif des termes de la directive cadre « déchet » en version anglaise et française.

6.4.2. Peu importe la porte tant qu'elle est facile à ouvrir

L'analyse de la réglementation et des pratiques dans 6 pays différents réalisées au cours de ce travail, semble montrer que la gestion à terre des sédiments est plus aisée pour ceux qui ont fait le choix de nuancer le statut de déchet des sédiments dragués (voir paragraphe 5).

L'explication n'est pas immédiate car, non seulement, un déchet peut être valorisé, mais, également, un non déchet peut justifier une surveillance environnementale si sa qualité peut nuire à l'environnement comme c'est le cas de nombreuses matières premières industrielles (hydrocarbures, minerais, produits chimiques élaborés, …).

Les hypothèses explicatives suivantes peuvent toutefois être avancées :

- **un problème d'image dégradée véhiculée par le déchet ?**

  Même si un déchet peut être valorisé, le statut de déchet reste connoté négativement notamment auprès des populations et des associations de riverains.

  Lorsqu'un maître d'ouvrage réalise un projet de dragage, dans le cas où la qualité des sédiments lui permet d'envisager une valorisation, il doit mener une concertation étroite avec les éventuels repreneurs des matériaux ; lors de cette concertation, la « renommée » des matériaux en question est essentielle pour mettre en place des filières, notamment dans le cas de concurrence de marché (cas où des épandages sont déjà pratiqués avec boues de STEP, cas où des carriers ont besoin de matériaux de remblais, etc.). Cette renommée peut être dégradée par le statut de déchets.

  Ceci peut nuire à la possibilité de valorisation des sédiments auprès des acteurs locaux, et des associations notamment lors des négociations préalables (plan d'épandage) ou des enquêtes publiques liées au dossier loi sur l'eau par exemple.

  Ainsi, le statut de déchet des sédiments n'améliore pas leur **acceptabilité sociale** auprès des acteurs susceptibles de les ré-utiliser (agriculteurs, carriers, etc.). L'éventuelle valeur commerciale du matériau ne bénéficie pas non plus d'un impact positif lié à ce statut ce qui peut freiner les investisseurs privés[18].

  L'importance de cette acceptabilité est soulignée au travers de la recommandation n° 24 du Grenelle de la mer relatif aux sédiments de dragage :

  « Améliorer l'acceptation des sédiments, à travers notamment la création de labels, et la mise en place d'actions de communication » ;

- **des procédures réglementaires induites trop lourdes et une absence de sécurisation des filières ?**

  L'idée fréquemment exprimée est que le statut de déchet des sédiments gérés à terre induit de nombreuses procédures réglementaires, souvent longues et incertaines en termes d'obtention des autorisations administratives, et toujours synonyme de surcoût pour le projet de gestion. En d'autres termes, il est suggéré que tout serait plus simple sur le plan réglementaire, si les sédiments dragués, gérés à terre, n'étaient pas des déchets (par exemple : pas de propriétés de danger à caractériser, pas d'étude d'impact à mener, …). Les procédures réglementaires nécessaires à l'instruction des dossiers de dragage et de gestion à terre des sédiments ont été présentées au paragraphe 6.3. Elles sont

[18] D'après les professionnels du secteur, à qualité équivalente, les prix à la vente des granulats recyclés sont pour moitié inférieurs à ceux des granulats naturels.

effectivement nombreuses et ne se limitent pas à la réglementation sur les déchets. Sur ce point des recommandations ont été émises par le Grenelle de la mer qui portent plus sur le renforcement de la coordination entre les services de la police de l'eau et les services de l'inspection des installations classées en vue de faciliter l'instruction des dossiers, que sur la sortie du statut de déchet des boues de dragage.

Mais, surtout, nous pensons qu'il faut reconnaître que le gisement de boues de dragage peut être hétérogène en qualité ce qui peut générer des incertitudes sur la qualité finale des ouvrages. Actuellement, cette incertitude est entièrement assumée par le maître d'ouvrage qui reste responsable des boues même après valorisation comme le spécifie la réglementation déchet. Mais, il en serait certainement de même, en présence d'un produit de qualité incertaine.

Par conséquent, nous pensons que la réglementation sur les déchets doit être perçue comme un moyen de sécurisation des voies de gestion des boues de dragage grâce au programme de caractérisation et de suivi qu'elle propose. Cette réglementation engage à valoriser les boues de dragage tout en sécurisant les voies retenues. On notera que les Pays-Bas comptent quasiment autant de textes de loi se rapportant à la gestion à terre des sédiments que la France (voir paragraphe 5.1.2). Mais ces derniers s'accompagnent plus systématiquement de guides d'application qui simplifient fortement la gestion (voir par exemple la référence Rijkswaterstaat (2010) - « Guidance Document for Sediment Assessment »). Au final, il semble qu'il y ait moins besoin en Hollande, de réaliser des études de risque au cas par cas grâce à la méthode choisie (qui se base sur les fonctions du sol receveur auxquelles sont associés des seuils), aux outils prévus par l'administration (les guides d'application) et la connaissance approfondie du territoire (cartes des fonctions du sol disponibles par localité). Leur élaboration a peu à voir avec le statut des sédiments. Mais, de nouveau, en positionnant les réglementations relatives aux matériaux et à la qualité du sol comme point de départ pour gérer leur devenir à terre, l'État néerlandais encourage une activité liée à l'aménagement du territoire alors qu'en France, est encouragée celle de la gestion des déchets, dont les principaux revenus des industriels du secteur sont liés à l'élimination et au stockage définitif.

Ces freins potentiels expliquent pourquoi certains acteurs de la gestion des sédiments prônent la sortie du statut de déchet de manière implicite ou explicite. La procédure est décrite dans l'article L 541-4-3 du Code de l'environnement. Le sédiment doit remplir les conditions suivantes :

- la substance ou l'objet est couramment utilisé à des fins spécifiques ;
- il existe une demande pour une telle substance ou objet ou elle répond à un marché ;
- la substance ou l'objet remplit les exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et les normes applicables aux produits ;
- son utilisation n'aura pas d'effets globaux nocifs pour l'environnement ou la santé humaine.

Ces critères sont fixés par l'autorité administrative compétente. Ils comprennent le cas échéant des teneurs limites en substances polluantes et sont fixés en prenant en compte les effets nocifs des substances ou de l'objet sur l'environnement. Les modalités d'application sont fixées par décret. Outre l'existence d'un marché qui n'est pas encore prouvée à l'heure actuelle, la sortie du statut de déchet n'empêche pas l'étude d'innocuité qu'il serait préférable de mettre à profit pour une valorisation dans des contextes plus larges des sédiments. De nouveau, la sortie du statut de déchet ne pourra se faire sans la sécurisation environnementale des filières de valorisation.

Au final donc, nous pensons que le manque d'outil en France pour faciliter l'élaboration et l'instruction des dossiers d'autorisation pour la gestion des sédiments dragués est un frein plus important que leur statut de déchet. Au contraire, ce dernier constitue un cadre pour sécuriser les filières. Il convient également de faire évoluer l'image actuellement négative du déchet associée à ces matériaux. Il paraît essentiel d'être en mesure de garantir l'absence d'impact à long terme des matériaux valorisés et ainsi faire reculer un principe de précaution très prégnant qui freine la valorisation.

En d'autres termes, l'important n'est pas tant le nombre, l'épaisseur, ou la hauteur des portes à franchir, mais de disposer des bonnes clefs pour les ouvrir sans contrainte.

7. Conclusion

L'analyse des normes françaises relatives aux voies de valorisation des sédiments de dragage en génie civil (terrassements routiers et plates-formes, remblaiement de tranchées, utilisation comme granulats (fillers) pour bétons, fabrication de granulats expansés pour bétons, production de clinker pour ciment et fabrication de briques de terre cuite) a mis en évidence une seule impossibilité stricte d'un point de vue normatif : la valorisation des sédiments en remblaiement de tranchées, en raison de leur teneur en matière organique.

Pour les autres voies de valorisation envisagées, elles ne révèlent pas d'interdiction pour l'usage des sédiments de dragage, avec toutefois des vérifications à réaliser concernant les teneurs en chlorures, en sulfates et sulfures dans les lixiviats et/ou les solides, pour des applications en tant que granulat pour béton avec armatures métalliques. En outre, les matériaux utilisés doivent répondre à des critères physiques, chimiques ou mécaniques que ne présentent pas les sédiments bruts, mais qui peuvent être atteints par traitement ou mélange avec d'autres matériaux.

La ré-utilisation des sédiments dans le BTP ne présente donc pas de limite majeure pour les réalisations hors structure.

En France comme en Europe, la gestion des sédiments à terre se situe à la croisée de plusieurs réglementations ce qui peut avoir pour effet de multiplier les dossiers et études à réaliser, augmenter les délais de réalisation de travaux et constituer un frein pour la réalisation des travaux de dragage. En effet, tout projet de dragage doit comprendre le volet de gestion des sédiments. L'analyse des réglementations en vigueur en France, aux Pays-Bas, en Allemagne, en Belgique et au Royaume-Uni, - et même si en France, une meilleure concertation des différents services instructeurs sur les dossiers serait très bénéfique pour améliorer les délais -, montre toutefois, que ce n'est pas tant la réglementation en elle-même qui empêche la valorisation mais plutôt le manque d'outils et de référentiels pratiques permettant de répondre, étape par étape, à la demande réglementaire. Les textes réglementaires français ouvrent effectivement autant de possibilités de valorisation à terre que leurs homologues étrangers mais les outils permettant une prise de décision rapide sont absents pour la plupart. Il pourrait s'agir de l'établissement de seuils sur la base de scénarios de risque standardisés, avec toutefois, l'étude d'adaptations locales en cas de dépassement compte tenu de la richesse contextuelle en France.

On remarquera également que le développement d'une réglementation sur le sol et notamment de guides pour la réutilisation des matériaux dans ce contexte, semble participer au développement des filières de valorisation à terre. C'est le cas du soil quality decree aux Pays-Bas, de l'ordonnance sur le sol en Allemagne et du décret sur la gestion des sols en Belgique. Ces trois pays ont également « allégé » le poids de la réglementation déchet soit en sortant totalement de son cadre les sédiments réutilisés (Pays-Bas), soit en spécifiant les voies de valorisation qui n'entrent pas dans ce cadre (Allemagne), soit encore en basculant quasi-automatiquement le statut du matériau une fois celui-ci valorisé (Belgique). Il semble que les freins induits par le statut de déchet des sédiments dragués soient avant tout liés à l'image négative que véhicule ce statut et au principe de précaution qui prévaut en l'absence de garantie sur le devenir à long terme des matériaux une fois valorisés. Ces points sont à surveiller et à lever en reconsidérant l'image des sédiments qui constituent une ressource et non une charge pour le premier, et, éventuellement, en facilitant le basculement déchet/produit une fois le matériau valorisé.

Le contexte géographique et géologique des Pays-Bas est certes différent de la France mais la relocalisation des sédiments fins dragués sur les côtes françaises en vue d'étendre progressivement les zones d'habitats faunistiques sur le littoral serait à étudier comme alternative au clapage. Cette voie de valorisation est également très sérieusement explorée au Royaume-Uni. De même, la construction de sol à base de sédiments fluviaux dragués en vue de requalifier des sites dégradés est à étudier et à faciliter.

Plus qu'un guide simplificateur dédié au projet de dragage et au volet de gestion des sédiments, la problématique de la valorisation à terre des sédiments de dragage a surtout besoin de la mise en place de ces outils permettant la prise de décision sans ambiguïté possible.

D'une manière générale, la nature des boues de dragage implique des traitements parfois multiples (déshydratation, tri granulométrique, traitement par liant hydraulique…) pour les rendre compatibles avec certains usages techniques en génie civil (élaboration d'une couche de forme en technique routière, incorporation dans des bétons de structure, fabrication de brique). L'expérience montre que ces applications peuvent rapidement devenir économiquement infaisables (STOWA, 2015). Les voies de valorisation privilégiées aux Pays-Bas sont celles faisant intervenir le moins de modification des matériaux : le régalage sur berges, l'incorporation des sédiments au sol, ainsi que la création de zones d'habitats faunistiques sur le littoral. Toutefois, des voies de valorisation plus sophistiquées peuvent surement constituer une réponse dans un contexte de protection accrue du littoral (développement de la compétence GEMAPI). Mais dans ce cas, une fois les contraintes techniques maîtrisées, les autres critères en vue de garantir le succès d'une filière de valorisation doivent également être discutés.

La viabilité d'une filière demande donc une étude de marché qui devra tenir compte de contraintes locales.

Enfin, dans un contexte de raréfaction des granulats naturels terrestres dans certaines régions, des demandes de permis de recherche de grande ampleur au large des côtes françaises sont déposées laissant augurer une augmentation de la production de matériaux d'origine marine (Augris et Simplet, 2013). Les sédiments de dragage sont quant à eux mentionnés dans la « Stratégie nationale pour la gestion durable des granulats terrestres et marins et des matériaux et substances de carrières », comme une ressource secondaire à valoriser en priorité (MEDDTL et MIEEN, 2012). L'objectif est de faire évoluer la part de matériaux recyclés actuellement évaluée à environ 6 % dans les travaux du BTP à au moins 10 % de la production nationale dans les 10 prochaines années. **La question des incitations pour atteindre cet objectif reste toutefois entière.**

8. Bibliographie

AFNOR (1974a) NF P 13-301. - Céramique. Briques creuses de terre cuite.

AFNOR (1974b) NF P 51-301. - Briques de terre cuite pour la construction des conduits de fumée.

AFNOR (1982) NF P 18-309. - Granulats. Granulats d'argile ou de schiste expansés fabriqués en four rotatif destinés à la confection de béton.

AFNOR (1983) NF P 13-304. - Briques en terre cuite destinées à être apparentes.

AFNOR (1990) P18-557. - Granulats. Éléments pour l'identification des granulats.

AFNOR (1992) NF P 11-300.- Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

AFNOR (2002) NF EN 13055-1. - Granulats légers. Partie 1 : granulats légers pour bétons et mortiers.

AFNOR (2004) FD P 18-542. - Granulats. Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction.

AFNOR (2005) NF P 98-331. - Chaussées et dépendances. Tranchées : ouverture, remblayage, réfection.

AFNOR (2006a) NF EN 14227-10. - Mélanges traités aux liants hydrauliques. Spécifications. Partie 10 : sols traités au ciment.

AFNOR (2006b) NF EN 14227-11. - Mélanges traités aux liants hydrauliques. Spécifications. Partie 11 : sols traités à la chaux.

AFNOR (2006c) NF EN 14227-13. - Mélanges traités aux liants hydrauliques. Spécifications. Partie 13 : sols traités au liant hydraulique routier.

AFNOR (2006d) NF P 15-317. - Liants hydrauliques. Ciments pour travaux à la mer.

AFNOR (2008a) NF EN 12620/IN1. - Feuille d'instruction pour la consolidation de la norme NF En 12620 d'août 2003 et de son amendement A1. Granulats pur béton.

AFNOR (2008b) NF EN 12620+A1. - Granulats pour béton.

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

AFNOR (2009) NF P98-115. - Assises de chaussées. Exécution des corps de chaussées. Constituants. Composition des mélanges et formulation. Exécution et contrôle

AFNOR (2011a) NF P18-545. - Granulats. Éléments de définition, conformité et codification.

AFNOR (2011b) NF EN 771-1. - Spécification pour éléments de maçonnerie. Partie 1 : briques de terre cuite.

AFNOR (2012a) NF EN 197-1. - Ciment. Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

AFNOR (2012b) NF EN 771-1/CN. - Spécifications pour éléments de maçonnerie. Partie 1 : briques de terre cuite.

AFNOR (2014) NF EN 206 de 2014-11-29. - Béton - Spécification, performances, production et conformité.

Agostini F. (2006) - Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins, Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Lille, 208 p.

Agostini F., Skoczylas F., Lafhaj Z. About (2007) - A possible valorisation in cementitious materials of polluted materials after treatment. Cement & Concrete Composites ; 29 ; 270-278

AGW (1995) - Arrêté du Gouvernement wallon relatif à la gestion des matières enlevées du lit et des berges des cours et plans d'eau du fait de travaux de dragage ou de curage - 30 novembre 1995 http://dps.environnement.wallonie.be/home/legislation/agw-matieres-dragage-ou-curage-30111995.html

AGW (1999) - Arrêté du Gouvernement wallon modifiant l'arrêté du Gouvernement wallon du 30 novembre 1995 relatif à la gestion des matières enlevées du lit et des berges des cours et plans d'eau du fait de travaux de dragage ou de curage - 10 juin 1999.

AGW (2001) - Arrêté du Gouvernement wallon favorisant la valorisation de certains déchets - 14 juin 2001 http://dps.environnement.wallonie.be/home/legislation/agw-valorisation-dechets-14062001.html

AGW (2009) - Arrêté du Gouvernement wallon relatif à la gestion des sols - 27 mai 2009 http://dps.environnement.wallonie.be/home/legislation/decret-sols-05122008/agw-sols-27052009.html

Aouad G., Laboudigue A., Gineys N., Abriak N.E. (2012) - Dredged sediments used as novel supply of raw material to produce Portland cement clinker. Cement & Concrete composites.; 34; 788-793.

Armengaud J., Balland P., Badré M. (2003) - Le curage d'entretien des cours d'eau « vieux fonds, vieux bords ». Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 43 p.

Augris C. et Simplet L. (2013) - Les matériaux marins, *Géoscience*, 17, 82-89.

Bataillard P., Grangeon S., Quinn P., Mosselmans F., Lahfid A., Wille G., Joulian C., Battaglia-Brunet F. (2014) - Iron and arsenic speciation in marine sediments undergoing a re-suspension event. Impact of the biotic activity. *Journal of Soil and Sediment*. 14:615-629.

Bataillard P., Michel P., Mossmann J.-R., Lefebvre G. et Hébrard C. (2017) - Caractérisation de la dangerosité des sédiments dragués et gérés à terre - Principes et méthode. Rapport final. BRGM/RP-67318-FR, 25 p., 3 fig., 3 tabl.

Ben Allal L., Ammari M., Frar I., Azmani A., Belmokhtar N.E. (2011) - Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc). Revue Paralia. 2011 ; 4 ; 5.1-5.13.

Blanc C. (2012) - Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement. BRGM/RP-60013-FR, 53 p.

Bolleboom T. (2012) - Sediment management Dutch approach. webinar of the Snowman Network - Risk assessment of contaminated sediments, 14 novembre 2012, http://snowmannetwork.com/wp-content/uploads/Sediment-management-Dutch-approach-Tommy-Bolleboom.pdf

Boyd N.A., Taylor K.G. and Boult S. (1999) - Early diagenetic controls on contaminant geochemistry and mobility in urban water bodies: Salford Quays, Manchester. Environmental Geochemistry and Health, 21(4), 317-322.

Brakni S., Abriak N.E., Grégoire P., Zentar R. (2007) - Valorisation de boues de dragage maritime en granulat artificiales an vue de stabiliser l'érosion littoral. 25e rencontres de l'AUGC, 23-25 mai 2007, Bordeaux.

Bray, RN, AD Bates et Land JM (1997) - Dredging, a Handbook for Engineers, 2ème édition, Arnold Publishing, Londres, Sydney, Auckland.

Brils J., de Boer P., Mulder J. and de Boer E. (2014) - Reuse of dredged material as a way to tackle societal challenges, Journal of Soils and Sediments, 14, 1638-1641.

Broad Authority (2015) - Sediment Management Strategy. 2. Principles for sediment management http://www.broads-authority.gov.uk/__data/assets/pdf_file/0020/412535/2_Principles.pdf

Calvet R. (2003) - Le Sol : propriétés et fonctions - Tome 2 : Phénomènes physiques et chimiques - Applications agronomiques et environnementales, Dunod - Éditions France Agricole, 511 p.

Cappuyns V, Swennen R. (2009) - Sediment characterization during oxidation and ripening and evaluation of its potential reuse, *Environmental Technology*, 30, 785-797.

Cappuyns V., Deweirt V., Rousseau S. (2015) - Dredged sediments as a resource for brick production: Possibilities and barriers from a consumers' perspective, *Waste Management,* 38, 372-380.

CEAMAS (2015) WP2-A8 - Requirements for sediment-based civil engineering formulations. http://www.ceamas.eu/sites/default/files/documents/wp2-a8_3-report_on_reuse_of_sediments_in_concrete_and_geotechnical_applications_final.pdf

CETMEF (2008) - Enquête « Dragage 2006 » - Analyse des données. 21 p. http://www.eau-mer-fleuves.cerema.fr/IMG/pdf/Rpt-Enquete-Dragage-2006_cle51c1f3.pdf

CETMEF (2013) - Enquête « Dragage 2010 » - Synthèse des données. 35 p. http://www.eau-mer-fleuves.cerema.fr/IMG/pdf/AGj_Web_R13-06_EnqueteDragage2010_Txt051213_cle041d98.pdf

Chiang K.-Y., Chien K.-L., Hwang S.-J. (2008) - Study on the characteristics of building bricks produced from reservoir sediment, *Journal of Hazardous Materials*, 159, 499–504.

Collectif, (2014) - Le dragage des ports : une nécessité ! http://www.pegaseas.eu/wp-content/uploads/2015/01/Brochure_APLM_francais_anglais.pdf

Corrochano G.B., Azcarate A.J., Gonzalez R.M. (2011) - Chemical fractionation and immobilization in lightweight aggregates produced from mining and industrial waste, International Journal of Environmental Science and Technology, 8, 667-676.

Dalton J. L., Gardner K. H., Seager T. P., Weimer M. L., Spear J. C.M., Magee B. J. (2004) - Properties of Portland cement made from contaminated sediments, *Ressources, Conservation and recycling*, 41, 227-243.

DREAL/DDTM (2013) - L'état recense toutes les réglementations applicables - Planifier le dragage des ports en Bretagne, 69 p.

DGPR (2017) - Modalités d'application de la nomenclature des installations classées pour le secteur de la gestion des déchets - circulaire du 25 avril 2017 - https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/BPGD-16-135%20Note%20nomenclature%20du%2025%20avril%202017_final.pdf

de Boer P. (2012) - Transitions in water management in the Netherlands - Trends in dredging. webinar of the Snowman Network - Risk assessment of contaminated sediments, 14 novembre 2012, http://snowmannetwork.com/wp-content/uploads/Trends-in-Dredging-Pieter-de-Boer-Rijkswaterstaat-The-Netherlands.pdf

Delcour P., Lefebvre G. (2013) - Benchmark européen de la valorisation des sédiments - Étude 1 : Réglementation européenne et des principaux États Membres actifs dans la valorisation des sédiments fluviaux. CETE Affaire n° 13 02 00075, 106 p.

Detzner H.-D. Knies R. (2004) - Treatment and beneficial use of dredged sediments from Port of Hamburg, WODCON XVII: Dredging in a Sensitive Environment - September 2004, Hamburg, Germany.

DGRNE (2007) - Boues de dragage : synthèse de la situation environnementale en région Wallonne, Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement, Office wallon des Déchets, Direction des Infrastructures de Gestion des Déchets, 6 pages, http://environnement.wallonie.be

Dijkstra J.J., van Zomeren A., Comans R.N.J., Brand E. and Claessens J.W. (2013) - Calculating site-specific emission criteria for sustainable landfills : the dutch approach Proceedings Sardinia 2013, Fourteenth International Waste Management and Landfill Symposium; 30 September - 4 October 2013 Cagliari, Italy.

Dockx J., Vandekeybus J. (2012) - VAMORAS: Valorisation of dewatered dredged material from the Port of Antwerp, PRISMA-technical day, 22nd november 2012.

Duclay E., Syndique H., David O., Tchilian N. (2010) - Le Grenelle de la Mer - Sédiment de dragage - Groupe n° 11 - Rapport final. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/G11-2.pdf

Environment Agency (2010) - Standard rules SR2010No18 - Storage and treatment of dredgings for recovery - Chapter 4, The Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2010.
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/296607/geho0512bwmm-e-e.pdf

EUDA (2010) - Dredging Perspective on Hierarchy Evolution, Workshop on Dredged Material and the Implementation of the new EU Waste Directive, EuDA offices, 29 avril 2010, Belgique.
http://www.european-dredging.eu/pdf/New_Waste_FD_philosophy.pdf

Foucault A. et Raoult J.-F. (1988) - Dictionnaire de géologie, 3e édition, Masson.

Gadayev A., Kodess B. (1999) - By-product materials in cement clinker manufacturing, *Cement and Concrete Research,* 29, 187-191.

GEODE (2012) - Suivis environnementaux des opérations de dragage et d'immersion - Annexe 2 : Effets et impacts des opérations de dragage et d'immersion sur l'environnement, 58 p. http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/club-geode-r65.html

GEODE (2014) - Rédaction des études d'impact d'opérations de dragage et d'immersion en milieu estuarien et marin - Annexe technique et réglementaire, 23 p. http://www.eau-mer-fleuves.cerema.fr/IMG/pdf/Guide_GEODE_EI_Annexe_technique_Reglementation_cle1df34a.pdf

GEODE (2016) - Bonnes pratiques pour la caractérisation des matériaux en vue d'une opération de dragage et d'immersion en milieu marin et estuarien, 118 p. http://www.eau-mer-fleuves.cerema.fr/IMG/pdf/guide_geode_bonnes_pratiques_analyse_sediments_14112016-1_cle21a618.pdf

Grosdemange D. (2005) - Guide pour la gestion des opérations de dragage - Fédération Française des Ports de Plaisance - In Vivo Environnement. 82 p.
http://www.invivo-environnement.com/UserFiles/File/GuideDragageFFPP_lite2005.pdf

GUBAK-WSV (2009) - Joint transitional arrangements for the handling of dredged materials in german federal coastal waterways, 59 p.

Hale B., Evans L., Lambert R. (2012) - Effects of cement or lime on Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sb and Zn mobility in field-contaminated and aged soils. *J. Hazard. Mater*. 199-200, 119-127.

Hamer K., Karius V. (2002) - Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment, *Waste Management*, 22, 521-530.

Han Y. (2010) - Mise au point d'un essai de caractérisation environnementale sur matériau monolithique par percolation ascendante, thèse de doctorat, École Centrale de Lille, 215 p.

Harrington J. and Smith G. (2013) - Guidance on the Beneficial Use of Dredged Material in Ireland, Cork Institute of Technology, 87 p. + ann.

Herman S., Pieters A. Glaser D., Gregoire P., Priez C., Desmoulin D., Guglielmetti D. (2014) - A lustrum of valorization of contaminated sediments from the port of Dunkirk (France), Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction, Rostock, 10-12 April 2014.

IRGT (2005) - Gestion des Boues en Belgique - État des lieux - Arriéré du passé et défis environnementaux, Étude scientifique réalisée par le Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), Notice réalisée par l'Institut Royal pour la gestion durable des ressources naturelles et la promotion des Technologies propres, 26 p.

Kaushik S.K. and Islam S. (1995) - Suitability of sea water for mixing structural concrete exposed to marine environment, Cement and Concrete Composites, 17, 177-185.

Kribi S. (2005) - Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage.

Kristensen E. and Rabenhorst M.C. (2015) - Do marine rooted plants grow in sediment or soil ? A critical appraisal on definitions, methodology and communication, Earth-Science Reviews, 145, 1-8.

Lalandre A. et Roblin L. (2004) - Histoire des Ports-de-Paris et de l'Île-de-France, Éditions Ouest-France, 125 p.

Lalaut Y. (2014) - Valorisation à terre des sédiments non immergeables : l'action du Grand Port Maritime de Dunkerque, 4ème Assises du Port du Futur, 8-9 septembre 2014, Paris,
http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Valorisation_a_terre_des_sediments_non_immergeables_-_l_action_du_Port_de_Dunkerque_cle0d57de.pdf

Le Gac S., Chiffoleau A.-C., Claudel H., Lozach L. (2011) - Bilan de la réglementation française et anglaise pour le dragage des ports, Rapport de synthèse, projet SETARMS, 54 p.

Le Robert (1989) - Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française, 2e édition, Edition Dictionnaires Le Robert.

Libert Y. (2015) - Introduction historique et évolution du domaine - AIPCN - Séminaire d'automne SPW - 20 novembre 2015.
http://www.pianc-aipcn.be/figuren/Aanmeldingen/SPW%202015/AIPCN_20nov15_YL_01.pdf

Lions J., van der Lee J., Guérin V., Bataillard P. and Laboudigue A. (2007) - Zinc and cadmium mobility in a 5-year-old dredged sediment deposit: experiments and modelling. *Journal of Soils and Sediments.* 7(4) 207-221.

Maes E. (2007) Eau 5 - Les sédiments et les matières en suspension. Chapitre 10 : L'eau et l'environnement aquatique - Rapport Analytique 2006 - 2007 sur l'environnement wallon - p. 420-432 - http://etat.environnement.wallonie.be/index.php?page=le-rapport-analytique-2006-2007

Mancioppi L., Padox J.-M., Hennebert P. (2010) - Qualité chimique des sédiments fluviaux en France - Synthèse des bases de données disponibles. 99 p.

Marrec A. (2012) - Mise au gabarit européen de l'Oise : Études préliminaires - Dragage et gestion des sédiments extraits. 64 p.
http://www.mageo-concertation.fr/img/pdf/05_MAGEO_EP_Dragages_Gestion_Sediment_IDR-PRE-GEO-NT-001_D_Dragages_gestion_sediments.pdf

Mathieu C. et Lozet J. (2011) - Dictionnaire encyclopédique de science du sol, Édition Lavoisier et Tec&Doc Éditions.

MEDDTL et MIEEN (2012) - Stratégie nationale pour la gestion durable des granulats terrestres et marins et des matériaux et substances de carrières. http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/document_cadre_version_finale.pdf

Mezencevova A, Yeboah N.N., Burns S.E., Kahn L.F., Kurtis K.E. (2012) - Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick, *Journal of Environmental Management* 113, 128-136.

Miquel P. (1994) - Histoire des canaux, fleuves et rivières de France, Édition n° 1, 372 p.

Miraoui M. (2010) - Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil.

Miraoui M., Zentar R., Abirak N.E. (2012) - Road materials basis in dredged sediments and basic oxygen furnace steel slag. *Construction and building materials*. 30; 309-319.

Misko P. (2007) - État de l'art des pratiques, expériences et techniques de traitement des sédiments portuaires contaminés de type vaseux en France et à l'étranger - Recensement des politiques de gestion durable des sédiments portuaires contaminés de type vaseux en France et à l'étranger. Rapport final. 68 p.

MMO (2014) - Use of beneficial dredged materials in the South Inshore and South Offshore Marine Plan Areas, 57 p.

MMO (2017) - Evidence requirement R057: Alternative use of dredged material. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/650333/Alternative_use_of_dredged_material.pdf

Molenaar C. (2009) - Soil management - Sustainable reuse of excavated soils and sediments related to Waste directive, 9th meeting of the International Committee on Contaminated Land, Helsinki, 16 et 17 septembre**.**

Molenaar C. (2014) - The Dutch legislative framework for (re)use of dredged material. 8th Rostock dredging seminar - expert meeting, 24 septembre 2014. http://www2.auf.uni-rostock.de/ll/baggergut/rbs8/pdf/Molenaar.pdf

Morse J.W. and Luther G.W. (1999) - Chemical influences on trace metal-sulfide interactions in anoxic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*; 63 (19/20); 3373-3378.

Mouvet C. (2012) - Protocole pour l'évaluation de l'écotoxicologie de sédiments destinés à une gestion à terre. Rapport final. BRGM/RP-60835-FR, 15 p., 2 ill.

Mulligan C., Fugue M. et Sato (2010) - Sediment contamination and sustainable remediation, CRC Press, Taylor & Francis Group, and IWA publishing Ed., 305 p.

Netzband A., Brils J., Brauch H.-J., Liska I., Miloradov M., Nachtnebel H.-P., Pirker O., Rast G. Almodôvar M., Brogueira Dias E., Veloso Gomes F., Heise S., Portela L., Vale C., Förstner U., Gabriel T., Heininger P., Sassen K., Schulz S., Brien J., Morris R., Owens P., White S., Whitehead P., Winn P., den Besten P., Della Sala S., Eisma M., Hauge A., Keller M. and Slob A. (2007) - Sediment management: an essential element of river basin management plans, Venice, 22-23 november 2006, *Journal of Soils and Sediments*, 7, 117-132.

Netzband A. (2010) - Dredged Material and Waste: The German perspective. Workshop on Dredged Material and the Implementation of the new EU Waste Directive, EuDA offices, 29 avril 2010, Belgique. http://www.european-dredging.eu/pdf/DE_Axel_Netzband.pdf

Neumann R., Henneberg M. (2014) - Legal aspects for the reuse of dredged material and the application in dike constructions, Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction,- Rostock, 10-12 April 2014, ISBN: 978-3-86009-409-9.

Ndiba P., Axe L., Boonfueng T. (2008) - Heavy metal immobilization through phosphate and thermal treatment of dredged sediments, *Environmental, Science and Technology*, 42, 920-926.

OSPAR (2009) - OSPAR Guidelines for the Management of Dredged Material, Reference number: 2009/4, OSPAR Commission, London.

Panfili F., Manceau A., Sarret G., Spadini L., Kirpochtotchivoca T., Bert V., Laboudigue A., Marcus M.A., Ahamdach N., Libert M. (2005) - The effect of phytostabilization on Zn speciation in a dredged contaminated sedi- ment using scanning electron microscopy, X-ray fluorescence, EXAFS spectro- scopy and principal component analysis. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 2265-2284.

Piou S. (2005) - Caractérisation des processus de vieillissement des matrices polluées : étude couplée des réponses de la toxicité et de la migration des polluants métalliques associés. Thèse de doctorat. Université de Metz.

Piou S., Bataillard P., Laboudigue A., Ferard J.F. and Masfaraud J.F. (2009) - Changes of the geochemistry and ecotoxicity of a Zn and Cd contaminated dredged sediment over time in field conditions. *Environmental Research*, 109, 712-720.

Posthuma L., de Zwart D. (2012) - Predicted mixture toxic pressure relates to observed fraction of benthic macrofauna species impacted by contaminant mixtures, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31, 9, 2175-2188.

Raison S. (2010) - Port de Dunkerque: stratégies de développement durable, de dragages et de gestion des sédiments. 8èmes JST - Brest - 8 et 9 décembre 2010. http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/article_sediments_Raison_cle5918d5-1.pdf

Prévost O. (2008) - Destination des sédiments fluviaux contaminés retirés des canaux : optimisation des filières et possibilités de valorisation. *Techniques, Sciences, Méthodes*, 9, 71-79.

Prévost O. (2010) - Politique de VNF en matière de gestion des sédiments issus du dragage. http://www.sedilab.com/documentation/VNF_OPrevost.pdf

Rijkswaterstaat (2007) - Bulletin of Acts, Orders and Decrees of the State of the Netherlands, Decree of 22 November 2007 containing rules with respect to the quality of soil (Soil Quality Decree) http://rwsenvironment.eu/subjects/soil/legislation-and/soil-quality-decree/

Rijkswaterstaat (2010) - Guidance Document for Sediment Assessment - Methods to determine to what extent the realization of water quality objectives of a water system is impeded by contaminated sediments, 156 p.
http://www.sednet.org/download/guidance_document_for_sediment_assessment.pdf

Rijkswaterstaat (2014) - Into Dutch Soils, 80 p.

Roeloffzen A.B. (2013) - Nota Actief Bodem- en Baggerbeheer Rotterdam 2013, Samenvatting, 59 p.

Said I, Missaoui A, Lafhaj Z. (2015) - Reuse of Tunisian marine sediments in paving blocks: factory scale experiment, *Journal of Cleaner Production* 102, 66-77.

Scordia P.-Y. (2008) - Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers, Thèse de doctorat École Centrale de Lille, 189 p.

SedNet (2014) - Moving Sediment Management Forward - The four SedNet messages, 9 p.
http://www.sednet.org/download/Moving-Sediment-Management-Forward.pdf

Semcha A. (2006) - Valorisation des sédiments de dragage : applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug.

SETRA (1992) - Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique SETRA/LCPC.

SETRA (1994) - Remblayage des tranchées et réfection des chaussées. Guide technique SETRA/LCPC.

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

SETRA (2011) - Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière - Étude environnementale. 32 p.

Sévèque J.-L. (2010) - Le procédé vBc 3000 : une technologie durable pour le traitement des sédiments hors de l'eau, Colloque Gestion durable des sédiments transfrontaliers - ISSeP - Mons - Belgique.

Sigg L. (2000) - Redox potential measurements in natural waters: significance, concepts and problems, In Redox - Fundamentals, processes and applications, Schüring J., Schulz H.D., Fischer W.R., Böttcher J. and Duijnisveld W.H.M. Editors, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

Sihama K., Fabrice B., Nor Edine A., Degrugilliers P. (2008) - Marine dredged sediments as new materials resource for road construction, *Waste Management,* 28, 5, 919-928.

SMOCS (2014) - Sustainable Management of Contaminated Sediments - Guideline, 80 pages.

STOWA (2015) - The beneficial re-use of dredged material, Deltafact of Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer - Pays-Bas
http://deltaproof.stowa.nl/Publicaties/deltafact/The_beneficial_re_use_of_dredged_material.aspx?pId=52

Tack F.M., Lapauw F. and Verloo M.G. (1997) - Determination and fractionation of sulphur in a contaminated dredged sediment. Talanta, 44; 2185-2192.

van der Brugge R., Rotmans J., Loorbach D. (2005) - The transition in Dutch water management, *Reg. Environ. Change*, 5, 164-176.

van Hooydonk E. (2006) - The impact of EU Environmental law on waterways and ports, Maritime Transport Coordination Platform, 6th framework program, priority 6, sustainable surface transport, WP2.2 - Safety, Security & Environment, Document ID: M22.00.24.052.001, 215 p.
http://www.martime-transport.net/mtso/downloads/Public_Information/MTCP_report_Environmental_Transport_Legislation_study.pdf

Verschoor A.J., Lijzen J., van den Broek H.H., Cleven R.F.M.J., Comans R.N.J., Dijkstra J.J. (2008) - Revision of the Dutch building materials decree: alternative emission limit value for inorganic components in granular building materials. 9th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, 1-4 juin, Hong Kong.

Wezenbeek J.M. (2007) - Know the quality of your soil or aquatic sediment: clarifying the risks, 55 p. http://rwsenvironment.eu/subjects/soil/publications/know-the-quality/

Wang D., Abriak N.E., Zentar R. Strenght an ddeformation properties of Dunkirk marine sediments solidified with cement, lime and fly ash. Engineering geology. 2013; 166; 90-99.

Waste classification (2015) - Guidance on the classification and assessment of waste (1st edition 2015) Technical Guidance WM3.

Wijesekara S., Navarro R.R., Zhan-Bo U., Matsumura M. (2007) - Simultaneous Treatment of Dioxins and Heavy Metals in Tagonoura Harbor Sediment by Two-Step Pyrolysis, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 16, 569-584.

Zentar R., Dubois V., Abriak N.E. (2008) - Mechanical behaviour and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediment. Resources, Conservation & Recycling. 2008; 57; 947-954.

Zhang D., Kong H., Wu D., He S., Hu Z., Dai L. (2009) - Impact of pyrolysis treatment on heavy metals in sediment, Soil and Sediment Contamination, 18, 754-765.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Écotechnologie
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr