



L . A . M . H  
Laboratoire Artois Mécanique et Habitat

Equipe Hydrologie, Sol, et Environnement

**UNIVERSITE D'ARTOIS**

**Equipe Hydrologie, Sol et Environnement**

**Numéro d'ordre :**

**Année : 2002**

## **MEMOIRE**

Présenté à

**L'Université d'Artois**

Pour obtenir

**Le Diplôme d'Etudes Approfondies (D.E.A.)**

Spécialité : GENIE CIVIL

**VALORISATION DES BOUES DE DRAGAGE  
- APPLICATION : PORT AUTONOME DE DUNKERQUE -**

**Préparé par : MECHAYMECH AHMAD**

## RESUME

Les boues de dragage font de plus l'objet d'étude d'impact sur l'environnement. Ainsi, plusieurs études et recherches, et des réglementations ont été élaborées afin de caractériser, traiter, voire valoriser, les sédiments et leurs polluants.

En raison des enjeux environnementaux et économiques liés au dragage de sédiments contaminés, à la gestion des matériaux de dragage, à la dépollution de sites aquatiques, toute décision de traitement doit faire l'objet d'une analyse au cas par cas afin de bien comprendre l'ensemble de la problématique. La présence de sources actives de pollution, la nature et l'importance de la contamination, les risques de remise en suspension ou en solution des contaminants par des phénomènes naturels ou artificiels et la présence de ressources et usages sensibles sur ou à proximité du site à restaurer doivent être considérés.

Le sujet développé dans ce mémoire concerne la «Valorisation des Boues de Dragage », l'objectif a été d'effectuer une synthèse bibliographique sur le sujet. Alors que chaque valorisation doit être précédée par des procédés de traitements, ceux-ci nécessitent de bien comprendre toutes les caractéristiques concernant les sédiments, les pollutions et l'eau inclus. Les diverses technologies de traitement (thermique, biologique, et physique...) qui ont été expérimentées à travers le monde pour les sols et les sédiments, où qui font actuellement l'objet de projets de décontamination de sédiments sont présentées, compte tenu des volumes d'eau plus ou moins contaminé résultant de la manipulation et du traitement des sédiments, les technologies avérées ou en phase d'évolution pour le traitement des effluents ou des lixiviats sont également présentées.

Pour chaque type de technologie de valorisation, les informations suivantes sont rapportées : principe de base, techniques ou procédés disponibles, domaines d'application, avantages et limites pour le traitement des sédiments.

Afin de comparer les diverses technologies, les principes, les avantages, les limites, les coûts de traitement, et les impacts potentiels sur l'environnement et la santé humaine sont sommairement décrites pour chaque groupe de technologies et visualisées dans une matrice d'impact.

Une liste de critères d'évaluation et de choix des technologies de traitement visant à prendre en compte l'ensemble de ces considérations, est enfin proposée.

## **ABSTRACT**

The dredged mud represents today the subject of most universal attention when it comes to environmental concern. Several studies, researches and regulations were elaborated to include the characterizations of all components so that we are able to promote these issues.

Because of the environmental and economical issues linked to the presence of these contaminated sediments, as well as the management of the dredging materials, the cleaning up of water polluted dredged, all treatment decision must be object of a case by case analyzes in order to better understand the root of the problem. The presence of active sources of pollution, nature and the importance of contamination, the remittance risks in suspension or in solution of the contaminating by natural or artificial phenomena and the presence of resources and sensitive usages on or to proximity of the site to restore must be considered.

Considering the volumes of water more or less contaminated from manipulation and treatment of sediments, the proven and not yet proven technologies for the treatment of the effluents or lixiviat are equally presented

Foreseen objective during this training is to evaluate a bibliographical synthesis of «VALORISATION OF DREDGED MUDS» ; while every development must be to precede by procedures of treatments as well as those that need to be understood from all angles of their characteristics concerning the sediments, pollution water include.

The various technologies treatment (thermal, biological and physical ...) who were experimented through the world for the grounds and the sediments where their currently the object of decontamination projects in every technology type. The following information are retrieved: basic principal, technical or available procedures, domains application, advantages and limits for the treatment of the sediments.

In order to compare the various technologies, the principles, the advantages, limits and the treatment costs for every group of technologies. For the same reasons, potential impacts of certain treatment technologies on the environment and human health briefly are described and shown in a matrices impact.

A list of the evaluated criteria and choice of the treatment technologies aiming to take into account these considerations is finally proposed.

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

ADEME : Agence Départementale de l'Environnement et de la Maîtrise d'Energie.

AFNOR : Agence Française de NORmalisation.

Ag : Argent.

AIPCN : Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation.

As : Arsenic.

BAP : Benzo(a)pyrène.

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière.

Ca : Calcium.

Cd : Cadmium.

COD : Carbones Organiques Dissous.

COT : Carbones Organiques Totaux.

Cr : Chrome.

Cu : Cuivre.

EPA : Environmental Protection Agency (USA).

Fe : Fer.

GEODE : Groupe d'Etude et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement.

HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique.

HCB : Hexachlorobenzène.

Hg : Mercure.

IFTS : Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives.

K : Potassium.

MES : Matières En Suspension.

Mg : Magnésium.

Mn : Manganèse.

MS : Matière Sèche.

Na : Sodium.

Ni : Nickel.

Pb : Plomb.

PCB : Poly Chloro Biphényle.

## LISTE DES FIGURES

### **Partie 1 :**

Figure 2.1 : Schéma de l'expérience de DARCY 1856.	6
Figure 2.2 : Comportement des métaux rejetés en cours d'eau.	11
Figure 2.3 : Organigramme récapitulatif des technologies de pré-traitements	13
Figure 2.4 : Lit de filtration de boue.	15

### **Partie 2 :**

Photo 1 : Vue aérienne du port Ouest.	33
Photo 2 : Vue aérienne du port Est.	34
Figure 1.1 : Décomposition du port en zones.	34
Figure 1.2 : Courbe granulométrique de l'échantillon étudié.	35
Figure 1.3 : Histogramme de degré de contamination.	36
Figure 2.1 : Valorisation de roches.	38
Figure 2.2 : Valorisation de gravier et sable.	38
Figure 2.3 : Valorisation de l'argile compactée.	39
Figure 2.4 : Valorisation de la vase/argile.	39
Figure 2.5 : Valorisation du mélange.	40
Figure 2.6 : Courbe granulométrique du sable utilisé.	55
Figure 2.7 : Classement des sables traités aux liants hydrauliques.	56
Figure 2.8 : Classement des graves-ciments à 360 Mpa.	57
Figure 2.9 : Intrants et extrants des procédés d'immobilisation.	59
Figure 2.10 : Schéma de principe des procédés de Stabilisation/Solidification.	60
Figure 2.11 : Schéma de principe simplifié des procédés de Stabilisation/Solidification à base de ciment portland	61
Figure 2.12 : Schéma de principe simplifié des procédés de Stabilisation/Solidification à la chaux.	62
Figure 2.13 : Courbes de variation de la solubilité de certains métaux lourds en fonction du PH.	64

## LISTE DES TABLEAUX

### **Partie 1 :**

Tableau 1.1 : Concentrations en contaminants dans les matériaux dragués de 1986 à 1993 (mg/Kg).	2
Tableau 1.2 : les différents types de boues, en fonction de leurs caractéristiques	3
Tableau 1.3 : Potentiel redox de certaines réactions chimiques.	4
Tableau 2.1 : Niveau de référence concernant la qualité de dragage portuaires et estuaires.	12
Tableau 2.2 : Niveau de référence concernant la qualité des sédiments de canaux.	12
Tableau 2.3 : Récapitulatif des différentes techniques de déshydratation.	16
Tableau 2.4 : Synthèse des avantages et des limites de chaque type de traitement des sédiments contaminés.	30

### **Partie 2 :**

Tableau 1.1 : Degré de contamination de la zone «Réparation navale».	36
Tableau 2.1 : Bases générales pour l'identification et la classification des sols à draguer.	50
Tableau 2.2 : Classification des sols à draguer par des essais in situ et en laboratoire.	51
Tableau 2.3 : Mode d'exécution des essais in situ et en laboratoire.	52
Tableau 2.4 : Méthodes d'essai en laboratoire et in situ des roches à draguer.	53
Tableau 2.5 : Résultat du test de lixiviation.	55
Tableau 2.6 : Avantages, désavantages et applications des technologies d'immobilisation pour le traitement des sols contaminés.	66
Tableau 2.7 : Exemple de fabrication des briques des boues de dragage.	68
Tableau 2.8 : Différents constituants d'une argile destinée à la fabrication de briques.	69

## **INTRODUCTION**

Le terme « vase » est utilisé pour désigner une large famille de sédiments fins, argileux, plus ou moins organiques, dont les teneurs en eau sont supérieures à la limite de liquidité.

Les constituants principaux de ses sédiments sont les silicates, les carbonates, les oxydes et hydroxydes de fer et les phosphores.

Les activités industrielles, agricoles et le développement urbain autour des ports et des chenaux fluviaux ont entraîné depuis plusieurs années une accumulation de contaminants dans l'eau et dans les sédiments qui menacent l'écosystème maritime.

Dans plusieurs secteurs, l'eau est de moins en moins propre à la consommation, la baignade est interdite et les habitats sont détériorés au point de menacer la survie de plusieurs espèces fauniques et floristiques et de compromettre sérieusement la pêche commerciale et sportive.

Le dragage revêt une importance primordiale pour le maintien de la navigation dans les ports, les chenaux d'accès et les canaux.

[GEODE, 1994 ; VELLINGA, 1997 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1997] ont estimé les quantités de matériaux annuellement dragués à 35, 45, 250 millions m<sup>3</sup> respectivement pour la France, les Pays-Bas et les Etats-Unis.

Les voies d'élimination actuelles de ces matériaux se font soit par immersion en mer, soit par dépôt à terre.

Cependant, les efforts mondiaux et les travaux de recherches visent à développer des méthodes de gestion qui doivent répondre à un ensemble de critères économiques, techniques et environnementaux, et des programmes de protection, de dépollution ou d'assainissement des habitats aquatiques les plus menacés.

## SOMMAIRE

RESUME	I
ABSTRACT	II
INTRODUCTION	III
LISTE DES ABREVIATIONS	IV
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX	VI

### PREMIERE PARTIE :

---

#### *CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE*

1.1. Risques Environnementaux	1
1.2. Contaminants Chimiques :	2
1.3. Paramètres physiques et chimiques	3
1.3.1. pH et potentiel Redox	4
1.3.2. Température	4
1.3.3. Concentration en oxygène	4
1.3.4. Carbonates	4

#### *CHAPITRE 2 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE*

2.1. Notions préliminaires – caractéristiques des vases	5
2.1.1. Caractéristiques physiques	5
2.1.2. Propriétés mécaniques	6
2.1.3. Caractéristiques chimiques et minérales des vases	7
2.1.4. Caractéristiques biologiques	8
2.1.5. Caractéristiques des polluants rencontrés dans les sédiments	10
2.2. Technologies de pré-traitement des sédiments	12
2.2.1. Déshydratation	13
2.2.2. Injection des produits dans les boues draguées	17
2.2.3. Classification des particules	18
2.3. Procédés de traitement et de dépollution des boues	18

2.3.1. Procédés de traitement par concentration des polluants	19
Traitements physiques et physico-chimiques	
Traitements chimiques	
Traitements biologiques	
Traitements thermiques	
2.3.2. Procédés de traitement par dégradation des polluants	25
Oxydation à l'air humide	
Biodégradation	
2.3.3. Procédés de traitement par neutralisation des polluants	25
2.4. Le traitement des boues résiduares	26
2.5. Exemples d'application industrielle	26
2.6. Conclusions	28

### *CHAPITRE 3 : CAHIER DES CHARGE*

#### Contexte

3.1. Problématique	30
3.2. Objectif	31
3.3. Contraintes	32
3.4. Limites	32

### *DEUXIEME PARTIE :*

#### *CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU PORT AUTONOME DU DUNKERQUE*

1.1. Définition – Situation : P.A.D	33
Photos :	
Vue aérienne du port Est	
Vue aérienne du port Ouest	
1.2. Description du site de prélèvement	34
1.3. Caractérisation des Matériaux	
1.3.1. caractérisation physique	35
1.3.2. caractérisation chimique	35
1.3.3. caractérisation des polluants	35

### **CHAPITRE 2 : METHODES DE VALORISATION**

2.1. Valorisations des boues de dragage par voie agricole, manufacture.	37
2.2. Valorisations des boues de dragage dans les graves routières.	47
2.3. Valorisations des boues de dragage par les ciments (solidification/stabilisation).	59
2.4. Valorisations des boues de dragage par fabrication des briques.	68

*CHAPITRE 3 : LES PROPOSITIONS (ANALYSE MULTICRITERE – AIDE A LA DECISION)*

**Première partie**

Les propositions	71
------------------	----

**Deuxième partie (Analyse Multicritère)**

3.1. Définition – synthèse bibliographique	72
3.2. L'ensemble des solutions	74
3.3. Application	75
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	76

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GLOSSAIRE

ANNEXES

Annexe 1 : Les différents métaux rencontrés

Annexe 2 : Procédé TPS : DEEP - GREEN

Annexe 3 : Les constituants principales de procédé S/S

Annexe 4: Quelques coûts d'exploitation des boues

# **Partie 1**

**CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE**

**CHAPITRE 2 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

**CHAPITRE 3 : CAHIER DES CHARGES**

## CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE

Les structures portuaires sont le plus souvent établies dans des zones où la profondeur d'eau est relativement faible, telles que les estuaires. Il est alors indispensable de réaliser des dragages pour permettre aux bateaux d'accéder aux quais. Ces dragages sont effectués au moment de la construction du port, mais également de façon périodique pour enlever les sédiments qui se sont accumulés dans les chenaux et les darses (dragages d'entretien). C'est ainsi, que les pays riverains de la mer du Nord et de l'Atlantique draguent annuellement 70 à 85 millions de tonnes de déblais, qui sont rejetés en mer ou stockés dans des zones de dépôts à terre. Même si la pratique des dragages n'est pas à remettre en cause, elle ne peut être poursuivie qu'en prenant en considération les contraintes de préservation des écosystèmes côtiers. En effet, il est reconnu que les immersions sont une voie de transfert des contaminants vers le milieu marin : il convient donc de prendre les dispositions limitant les impacts sur les écosystèmes.

Ainsi les problèmes auxquels ont à faire face les opérateurs des dragages ainsi que les services qui instruisent les dossiers, relèvent à la fois de l'appréciation de l'impact potentiel des opérations et des solutions alternatives à l'immersion quand les sédiments présentent des caractéristiques toxiques indéniables. Cette problématique peut être traduite sous forme de trois questions principales pour lesquelles il n'existe pas de réponse unique et qui doivent être examinées au cas par cas :

- Comment prévoir les effets de la charge polluante lors des opérations de surverse ou d'immersion?
- Comment déterminer et suivre l'impact physique et écologique des rejets ou immersion?
- Que faire des sédiments réputés toxiques? Quelles sont les solutions écologiquement et économiquement acceptables?

Les réponses à ces trois questions passent par des développements méthodologiques, faisant appel aux résultats récents de la modélisation mathématique du devenir des contaminants et de l'évaluation de leurs effets écotoxicologiques.

### **1.1- Risques Environnementaux**

[ENVIRONNEMENT Canada, 1994]

Les sédiments non contaminés ne posent pas de problèmes particuliers quant à leurs effets sur l'environnement, et sont dans certains cas utilisés pour la création de zones humides : l'engraissement de plages en cours d'érosion ou la construction de routes. En revanche, le dragage et le rejet de matériaux contaminés posent un certain nombre de questions concernant : leurs effets sur la qualité physico-chimique des eaux, le devenir des substances toxiques pour les organismes vivants. Le phénomène le plus visible est l'augmentation localisée et temporaire de la turbidité au voisinage de la drague ou du site de dépôt. La majorité des études portant sur les effets de la turbidité sur les organismes vivants montrent que, dans la plupart des cas, les phénomènes naturels ont des impacts plus importants que ceux provoqués par des rejets de dragage. Les organismes benthiques, qui vivent en étroite liaison avec le fond, sont particulièrement exposés aux effets directs provoquant la destruction des habitats et l'enfouissement des espèces qui y vivent. Les suspensivores sont les espèces les plus résistantes, se nourrissant à l'aide d'un siphon, elles peuvent survivre à un recouvrement de plus de 50 cm.

Le dragage constitue une activité vitale pour l'exploitation des ports. En moyenne 40 millions de m<sup>3</sup> de sédiments sont dragués par an dans les ports français et rejetés dans le milieu marin. Les volumes les plus importants de matériaux déplacés proviennent des quatre grands ports d'estuaires ( Rouen, Nantes - St-Nazaire, Bordeaux) et des cinq grands ports maritimes (Dunkerque, Calais, Boulogne, le Havre et la Rochelle). A ceux-ci s'ajoutent les dragages, moins conséquents en volume, des multiples autres enclaves portuaires.

On distingue trois types de dragage qui diffèrent selon la nature des sédiments à draguer et le type de travaux à réaliser : entretien, approfondissement, aménagements de nouvelles aires portuaires.

Les dragages d'entretien sont des opérations répétitives, visant à extraire les sédiments déposés qui gênent la navigation : ils sont quasi permanents dans les ports d'estuaires, et périodiques dans les ports ouverts sur la mer.

Les dragages d'approfondissement sont entrepris lorsqu'il devient nécessaire d'adapter le seuil de navigation à la taille des navires. Ces travaux nécessitent de déplacer d'importants volumes de sédiments et demandent des moyens de dragages importants.

L'aménagement de nouvelles aires portuaires occasionne souvent le déplacement d'importants volumes de matériaux divers : roche, sable, terre, argile, graviers ou vases. Une circulaire conjointe du Ministère de l'Environnement et du Ministère de l'Equipement, fixe les conditions de prélèvement et d'analyse des déblais de dragage. Ces campagnes de mesures permettent d'évaluer la qualité des matériaux afin d'en déterminer le devenir: immersion, dépôt à terre, traitement, etc.

	Manche/Mer du Nord	Atlantique	Méditerranée
Mercure	0,15 - 1,45	0,05 - 0,19	1,16 - 2,51
Cadmium	0,5 - 0,95	0,27 - 0,64	1,0 - 1,25
Arsenic	3,9 - 13,8	4,4 - 28,7	10,4 - 11,2
Plomb	36 - 59	41 - 75	93 - 357
Chrome	38 - 65	37 - 75	56 - 74
Cuivre	18 - 35	10 - 53	107 - 745
Zinc	105 - 175	180 - 60	274 - 506
Nickel	12 - 17	6 - 39	25
PCB	0,01 - 0,14	0,005 - 0,1	0,1 - 0,81

Tableau 1.1 :Concentrations en contaminants dans les matériaux dragués de 1986 à 1993 (mg.kg-1)  
[GEODE, 1994]

## **1.2 Contaminants chimiques**

[CLAUDE ALZIEU, Dragage Et Environnement]

Les sédiments côtiers et estuariens renferment de nombreuses substances dont certaines présentent un caractère toxique affirmé : métaux lourds, tributylétain, hydrocarbures polyaromatiques, organochlorés (PCB), pesticides. Leur dragage et rejet en mer posent le problème de la mobilité des éléments et substances toxiques et de leurs effets sur les organismes vivants. Les processus qui interviennent dans le relargage ou l'immobilisation des contaminants associés au sédiment sont régulés dans une large mesure par les propriétés physico-chimiques de l'environnement du site de dépôt, mais aussi liés à l'activité microbologique dans le sédiment dragué. Une attention particulière est apportée aux contaminants toxiques, persistants et bioaccumulables.

### **1.3. PARAMETRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES**

[I.F.T.S., Rapport Déshydratation des Boues, 1995]

Les caractéristiques physiques et chimiques des sédiments exercent une très grande influence sur la biodisponibilité des contaminants présents dans les sédiments. Ces caractéristiques, qui varient d'un site à l'autre, peuvent avoir une grande influence sur le scénario de dépollution [USEPA, 1991a].

La caractérisation d'une boue nécessite la prise en compte de nombreux paramètres. En général, les caractéristiques physico-chimiques des vases sont :

*a) Siccité – Matières Sèches (MS) – Matières en Suspension (MES) :*

Un des éléments de référence indispensable à la description de toute boue est sa teneur en matières sèches (MS) appelée généralement siccité. La teneur en matières sèches inclut à la fois les matières en suspension (MES), particules insolubles supérieures à 30µm, les colloïdes et les sels dissous.

*b) Etat physique*

Une boue peut se trouver sous différents états :

- Etat liquide : la boue s'écoule par gravité,
- Etat pâteux : la boue manque de stabilité mécanique : déformation permanente,
- Etat solide : la boue peut se mettre en tas sans s'affaisser.

Cet état dépend essentiellement de la siccité comme le montre le tableau suivant :

	Boue liquide	Boue pâteuse	Boue solide	Boue sèche
Siccité	1 à 10%	10 à 30%	30 à 90%	Plus de 90%
Caractéristiques physiques	Boue non déshydratée	Boue déshydratée. Elle est pelletable, mais s'affaisse sous son propre poids.	Mise en tas sur une hauteur d'un mètre, elle forme un angle d'au moins 45° par rapport au sol.	Elle est pulvérulente ou granulée
Convoyage	Elle peut être véhiculée par pompage centrifuge ou volumétrique	Elle peut être véhiculée par pompe volumétrique ou par vis	Elle peut être véhiculée par tapis, vis sans âme ou pompe volumétrique.	Elle peut être véhiculée par tapis ou système pneumatique

Tableau 1.2 : les différents types de boues, en fonction de leurs caractéristiques. [OTV, 1997]

*c) Matières Organiques (MO) :*

Il est intéressant de connaître les proportions relatives de matière minérale et organique dans la phase solide de la boue car elles lui confèrent des propriétés de comportement et de traitabilité différentes.

La matière organique possède généralement une grande affinité pour l'eau et rend de ce fait les boues difficiles à déshydrater. Elle est par ailleurs fortement compressible et rend donc plus difficile les traitements de déshydratation mécanique. La matière minérale confère à la boue un comportement opposé.

La connaissance de la nature des MES pourra également être utile pour le choix des réactifs chimiques de conditionnement.

La concentration en matières organiques peut être appréhendée par détermination de la teneur en MVS (Matières Volatiles de la phase Solide). Cette grandeur représente la fraction organique des matières en suspension qui s'oxyde et se transforme en CO<sub>2</sub> après un temps de séjour de 2 heures à la température de 550 °C.

*d) Teneurs en éléments bénéfiques pour l'amendement des sols :*

Les boues peuvent parfois être utilisées comme fertilisants. Pour envisager une telle filière, il faut connaître la teneur de la boue en divers éléments, principalement : l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium et les oligo-éléments (Zn, Cu, Mn, Bo, Mo, Co, Sé)

*e) Teneurs en éléments indésirables pour l'amendement des sols :*

Les boues contiennent souvent des métaux tels que : Pb, Hg, Cd, Ni qui sont toxiques à de faibles teneurs. Il est important de connaître leur concentration.

Par ailleurs, les boues peuvent contenir des produits organiques de synthèse peu biodégradables tels que : PCB, Hydrocarbures Polycycliques Aromatiques, solvants, pesticides et détergents.

*f) niveau de fermentescibilité :*

Une partie des matières volatiles est constituée de germes vivants qui donnent un caractère instable à la boue (fermentation). Par ailleurs, certains de ces germes peuvent être pathogènes : streptocoques fécaux, salmonelles, pseudomonas, virus... Selon l'application désirée, une connaissance de la contamination totale et/ou la teneur en germes pathogènes pourra s'avérer nécessaire.

*g) Pouvoir Calorifique Inférieur : PCI*

En vue d'une incinération, il est intéressant de déterminer le pouvoir calorifique inférieur (PCI) d'une boue exprimée en Kcal/KgMS

**1.3.1. pH et potentiel Redox :**

Paramètres essentiels de tout changement chimique et électronique dans un système. Une variation à ces niveaux signifie une variation de la solubilité, de précipitation ou de formation de toute espèce dans un milieu considéré. Le diagramme pH-Potentiel d'oxydoréduction (POR ou Eh) décrit les interactions impliquant les différentes espèces présentes dans un système permettant ainsi une approche géochimique dans les sédiments. La connaissance de la nature des entités chimiques ainsi que leurs concentrations peuvent permettre une spéciation des espèces et une prédiction des composés pouvant se former. Les réactions suivantes amènent une description simplifiée de ces diagrammes d'équilibre.

Réactions chimiques	E <sub>h</sub> (Volts)
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	0.811
$NO_3^- + 6H^+ + 5e^- \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + 3H_2O$	0.746
$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	0.230
$Fe_2O_3 + 6H^+ + 2e^- \rightarrow 2Fe^{2+} + 3H_2O$	-0.047
$SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e^- \rightarrow H_2S + 4H_2O$	-0.206
$CO_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	-0.244

Tableau 1.3 : Potentiel redox de certaines réactions chimiques

Dans les sédiments, le potentiel d'oxydo-réduction et le pH du milieu sont étroitement contrôlés par la dégradation des produits organiques par les micro-organismes. Les mécanismes mis en jeu impliquent des réactions entre le carbone et les sources oxydantes présentes dans le milieu ce qui permet aux populations bactériennes de puiser leurs sources énergétiques. Dans les sédiments marins, deux types de processus d'oxydation peuvent avoir lieu : oxydation aérobie utilisant l'oxygène dissout et les réactions sulfo-réductrices entraînant la réduction des entités sulfates  $SO_4^{2-}$  en sulfures correspondants.

### **1.3.2. Température :**

Permet d'accroître un processus chimique selon la loi d'Arrhenius et aussi microbiologique.

### **1.3.3. Concentration en oxygène :**

Entraîne souvent une inhibition ou une inversion des processus chimiques ou microbiologique.

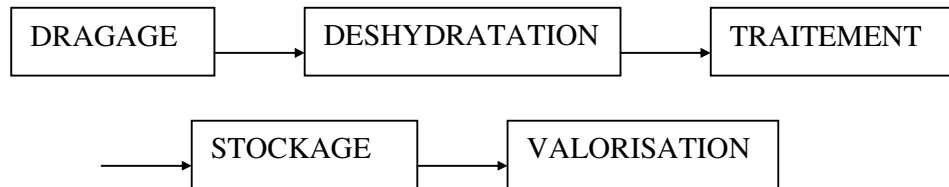
### **1.3.4. Carbonates :**

Paramètre étroitement lié à la teneur en carbonates comprenant la calcite qui de par son caractère tampon peut réguler le pH du milieu.

## CHAPITRE 2 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

L'état de l'art a permis de recenser les publications (ouvrages, études, articles, compte-rendu de congrès, rapports administratifs) disponibles sur le thème du traitement et de la valorisation des boues.

Le cycle général de boues de dragage est illustré par la figure suivante:



### 1. NOTIONS PRELIMINAIRES – CARACTERISTIQUES DES VASES :

On distingue plusieurs types de vases de dragage : les vases portuaires des canaux, et des estuaires.

Une formation générale liée à la sédimentation de particules élémentaires ou agglomérées, provenant de l'érosion des sols et des roches, ainsi que les conditions hydrodynamique (courant, houle, marée..) ont un rôle majeur sur la décantation des particules.

D'après [OTTMANN, 1972 ; VIDALIE, 1977] dans [MAROT, 1997], on observe trois principaux types de structure de vases à l'aide d'un microscope électronique à balayage :

- La structure floconneuse,
- La structure en alvéoles,
- La structure en château de cartes,

#### 1.1. Les caractéristiques physiques :

Les caractéristiques physiques des sédiments ont une grande influence sur leurs caractéristiques mécaniques, parmi ces caractéristiques, on peut citer :

##### ➤ les paramètres sans dimension :

- la teneur en eau :  $W(\%) = [\text{Masse de l'eau} / \text{Masse solide}] * 100$ ,
- l'indice de vide :  $e = [\text{Volume des vides} / \text{Volume solide}] * 100$ ,
- la concentration solide :  $C_s (\text{Kg/m}^3) = \text{Masse de solide} / \text{Volume total}$ ,

##### ➤ la granulométrie :

La granulométrie caractérise la taille des particules qui constituent la phase solide du matériau. Sa détermination se réalise suivant plusieurs techniques, parmi lesquelles le tamisage qui permet d'une part d'isoler physiquement chaque classe granulométrique, et d'autre part de déterminer leur proportion pondérale. Tandis que pour les fines particules, les mesures par granulométrie laser sont couramment utilisées.

[MAROT, 1997] propose quelques exemples sur la variation de la granulométrie des sédiments selon leur origine : les vases de l'estuaire de la LOIRE et de la SEINE contiennent environ 90% de silts et d'argiles (<63  $\mu\text{m}$ ), alors que cette même fraction granulométrique ne représente que 50% des boues draguées dans le port de HAMBOURG, [DETZNER, 1993].

➤ la densité de la phase solide :

Ses mesures sont effectués avec un pycnomètre.

1.2. Propriétés mécaniques : [MAROT, 1997]

Les propriétés mécaniques sont fonction de plusieurs paramètres :

- ❑ la distribution granulométrique ;
- ❑ la teneur en eau ;
- ❑ la structure ou composition minéralogique.

Elles se caractérisent par :

➤ les Limites d'Atterberg :

- $Wl$  = Limite de liquidité, séparant l'état plastique de l'état liquide.
- $Wp$  = Limite de plasticité, séparant l'état plastique de l'état solide.

L'indice de plasticité :  $Ip = Wl - Wp$

➤ les propriétés hydrauliques :

La loi de [DARCY, 1856], est la loi fondamentale de l'hydraulique des sols. C'est une loi expérimentale qui exprime que la vitesse d'écoulement de l'eau et le gradient hydraulique sont proportionnels :

$$V = k \cdot i$$

L'expérience de l'écoulement de l'eau dans un tube horizontal comprenant un échantillon de sol AB (figure 2.1) montre que le débit  $Q$  d'eau qui passe à travers cet échantillon par unité de temps peut être exprimé par la relation suivante :

$$Q = K \cdot S \cdot \partial h \quad / \quad Q : \text{débit (m}^3\text{)}$$

$K$  : coefficient de perméabilité (m/sec)

$\partial h$  : gradient

$S$  : section normale étudiée (m<sup>2</sup>)

Or, la loi de DARCY est applicable lorsque :

- les forces d'inerties sont négligeables (écoulement lent laminaire) ;
- le fluide a un comportement newtonien ;
- le fluide circulant est de l'eau à une température voisine de 20°C.
- 

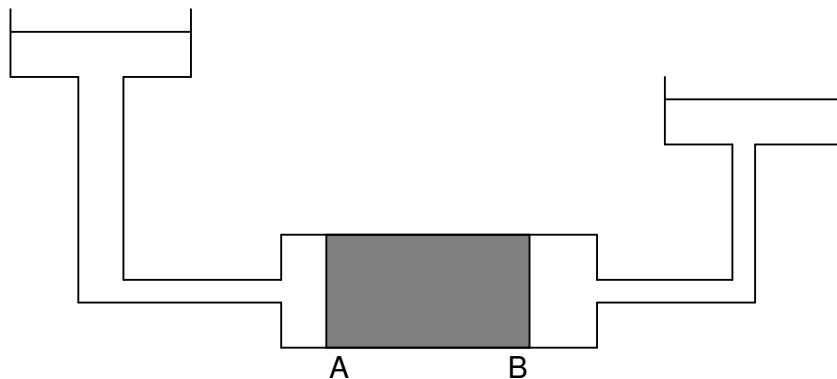


Figure 2.1. : Schéma de l'expérience de DARCY 1856.

➤ la sédimentation, le tassement et la consolidation :

Liquide, visqueuse, ou solide, une vase pourra prendre la consistance d'une véritable pierre après dessiccation prolongée.

En plus, la nature du sédiment (dimension, forme et charge électrique...) aura une influence sur le tassement des sédiments fins, qu'il est possible d'accélérer, soit en augmentant le drainage, soit en utilisant des produits chimiques ou des procédés électriques.

➤ la rhéologie :

La rhéologie est l'étude du comportement des matériaux. La rhéologie des vases est fonction de leur état de tassement.

En général, les argiles ont un comportement plastique, lié à la souplesse des liaisons qui existent entre les feuillets.

➤ la résistance mécanique :

Les appareils usuels sont la boîte de cisaillement et l'appareil triaxial, qui fonctionnent avec des conditions de drainage ouvertes ou fermées. On distingue donc deux types d'essais non drainés (court terme) et les essais drainés (long terme).

Dans un premier temps, les efforts sont repris en totalité par l'eau interstitielle. Puis, peu à peu, l'eau sous pression va migrer vers l'extérieur du matériau, à une vitesse dépendante de sa perméabilité. Au fur et à mesure, les efforts vont se reporter sur la fraction solide.

1.3. Les caractéristiques chimiques et minérales des vases : [MAROT 1997]

1.3.1. les principaux constituants :

L'identification minéralogique des vases est effectuée généralement par diffractométrie de rayons X. Les deux principaux minéraux formant la vase, sont : le quartz, les feldspaths ou les carbonates.

Ils sont reconnus par une simple observation à la loupe binoculaire.

1.3.2. les argiles :

- *définition* : les argiles se trouvent sous deux formes :
  - en sédimentologie : particules dont les diamètres n'excèdent pas 2  $\mu\text{m}$ .
  - en minéralogies : les argiles correspondent à des minéraux spécifiques que l'on ne rencontre jamais en particules plus grosses. Ces minéraux sont des silicates d'aluminium hydratés qui présentent une structure cristalline en feuillets [SCHLOSSER, 1998] dans [MAROT, 1997].
- *le gonflement* : certains types d'argiles gonfle en raison de leur hydratation. Comme les liaisons entre les feuillets sont faibles, des molécules d'eau peuvent s'intercaler dans les espaces interfoliaires.
- *La thixotropie* : la plupart des argiles sont thixotropiques, c'est à dire qu'elles perdent leur rigidité en présentant le comportement d'un liquide lorsqu'elle subissent une sollicitation mécanique, puis retrouvent leur caractéristique initiale après une phase de repos.
- *Les interactions argiles/contaminants* : ce phénomène est dû à la charge négative sur la surface des minéraux argileux, qui se sont neutralisés avec des cations compensateurs. Ils peuvent donc se lier avec les cations du milieu, qui fournissent une liaison, sous l'effet d'un équilibre plus ou moins stable.

Ce phénomène explique en grande partie les affinités qui existent entre les argiles et certains polluants organiques ou inorganiques (métaux lourds).

### 1.3.3. les constituants organiques : [MAROT, 1997]

- *origine et formation* :

Ce sont des composés naturels, simples ou complexes, de natures diverses : hérités des plantes et des animaux du milieu, ou bio synthétisés par la microflore, et définis par leur solubilité dans différents réactifs.

Ces substances humiques se regroupent en deux, ayant chacun des propriétés relativement indépendantes de leur origine :

- acides fulviques : composés solubles en solution aqueuse pour une large gamme de pH,
- acides humiques : composés solubles uniquement en milieu alcalin et parfois même totalement insolubles.

Les acides humiques sont de couleur noire, et les acides fulviques représentent souvent la fraction la plus importante des substances humiques totales (85% du carbone organique total) [BUFFLE, 1997].

Les substances humiques peuvent réagir avec des particules minérales solides et des composés minéraux dissous, sous différents types d'interaction, et dans différents milieux.

Cependant, en interaction avec les contaminants, les acides humiques forment avec les cations métalliques des humâtes et fulvates plus ou moins solubles selon les conditions du milieu.

Le mercure forme avec les matières humiques des complexes particulièrement stables qui semblent jouer un rôle important dans la concentration de ce métal. Ainsi, en retenant cet élément, les matières humiques auraient une fonction protectrice vis à vis de tous les autres organismes menacés par l'action toxique du mercure.

### 1.3.4. La nature de l'eau contenue dans les vases : [IFTS : 1995]

[Möller, 1983 et Smollen, 1988] ont déterminé quatre catégories d'eaux contenues dans les boues résiduares.

a) L'eau libre

C'est l'eau très faiblement retenue par la boue ; elle s'élimine par simple décantation.

b) L'eau de rétention

C'est d'une part l'eau faiblement adsorbée liée par des liaisons hydrogène et, d'autre part, l'eau retenue dans la structure alvéolaire formée par les micro-organismes et la matière organique. Son comportement hydrodynamique est celui de l'eau libre ; elle s'élimine par des procédés de déshydratation mécanique.

c) L'eau liée

C'est l'eau intracellulaire et l'eau fortement adsorbée aux particules solides ; elle s'élimine par séchage thermique ou électro-osmose.

d) L'eau de constitution

C'est l'eau liée chimiquement et faisant partie intégrante de la matière solide ; elle s'élimine facilement par traitement thermique au-delà de 105°C.

#### 1.4. Les caractéristiques biologiques : [GREGOIRE, 2002]

##### 1.4.1. introduction :

la définition d'une méthodologie de caractérisation des effets biologiques des substances indésirables présentes dans les sédiments sur les écosystèmes (aquatique et terrestre) est trop récente et peut être envisagée dans les cas suivants :

- approche soutenue par la réglementation,
- application de la recherche biologique,
- approche spécifique au site étudié,
- efficacité des moyens employés.

Les caractéristiques biologiques désignent comme premier paramètre l'analyse toxicologique, ainsi des tests de toxicité :

- Embryotoxicité.
- Amphipodes.
- Copépodes.

##### 1.4.2. justification des techniques sélectionnées :

###### 1.4.2.1. *Bio-essais* :

###### ❖ *Approche « TRIADE »* :

Trois bio-essais constituent le fondement de la caractérisation des effets biologiques selon l'approche Triade : bio-essais caractérisant des effets « chroniques » utilisant les espèces *Chironomus riparius* et *Daphnia magna* et bio-essais caractérisant des effets « aigus » utilisant les bactéries *Vibrio fischeri*.

Des sédiments fortement pollués peuvent également provoquer des effets toxiques aigus. C'est pourquoi, le bio-essai dit « aigu » utilisant *V. fischeri*, est réalisé en routine sur l'eau interstitielle.

###### ❖ *Bio-essais additionnels pour l'évaluation de la toxicité aiguë* :

Les essais dits « aigus » sont beaucoup moins onéreux, plus faciles et plus rapides à mettre en œuvre que les tests biologiques dits « chroniques ». En conséquence, les essais dits « aigus » sont recommandés pour augmenter la rentabilité d'une étude écotoxicologique en tant que tests de balayage.

L'utilisation en routine de cette technique, limitée par la complexité et le coût de la technique conventionnelle, a été facilitée depuis la parution du test, réalisé selon la procédure conventionnelle de l'OCDE 201 en 1984. En outre, cette technique offre une très bonne sensibilité générale aux polluants souvent présents dans les sédiments.

###### 1.4.2.2. *Essais de bio-accumulation* :

Cet essai sert à évaluer la disponibilité et l'accumulation biologique des polluants. Il permet également d'estimer les risques toxiques pour les êtres vivants situés à un niveau supérieur de la chaîne alimentaire.

Cet essai a l'avantage d'être moins cher et plus rapide que l'analyse chimique des concentrations en polluants dans les corps des organismes benthiques.

Néanmoins, si le budget disponible le permet, la réalisation parallèle des deux approches *in-situ* et en laboratoire peut donner des résultats complémentaires.

#### 1.4.2.3. *Inventaire sur site :*

L'évaluation des effets négatifs sur le site de l'étude peut être réalisée à partir des résultats d'un inventaire *in-situ* incluant :

- la qualité écologique : Indice Biologique Global Normalisé :NF T90-350 (1992).
- la présence d'effets pathologiques.

Les paramètres les plus fiables pour évaluer la qualité écologique d'un site sont ceux basés sur la présence et la densité des espèces macro-faunes très répandues, mais peu mobiles.

Elle peut être appréciée par des techniques passives de surveillance permettant de relever la présence et l'abondance de la flore et de la faune, corrélées à des facteurs physiques et chimiques du milieu.

Les effets pathologiques de polluants dans des sédiments sont liés à la malformation de la mâchoire des larves de *Chironomus* qui est un indicateur déterminant.

Cet indicateur a pour rôle de signaler la disponibilité biologique des polluants et pour surveiller le changement de cette disponibilité dans le temps.

### 1.5. caractérisations des polluants rencontrés dans les sédiments :

#### 1.5.1. généralités : origine et constituants :

Les polluants ont très souvent pour origine les rejets industriels, urbains ou agricoles. En conditions normales, ces polluants sont peu solubles dans l'eau. [BORGUSZ, 1992].

Ils sont plus concentrés dans les matières en suspension et dans les sédiments ; ils deviennent alors des réserves de composés toxiques mobilisables dans certaines situations. Néanmoins, ces sédiments peuvent devenir particulièrement toxiques lorsque les conditions physico-chimiques sont modifiées. Le dragage suivi d'une mise en régalage peut ainsi favoriser les re-largages de polluants.

[DARMENDRAIL, 1987] dans [MAROT, 1997] rappelle les processus majeurs d'accumulation des polluants dans les sédiments : adsorption sur les solides fins, précipitation de composés métalliques, coprécipitation de métaux sur des oxydes de fer et de manganèse, complexation avec des composés organiques, diffusion dans des réseaux cristallins tels que les carbonates.

[BOGUSZ, 1992] décrit trois méthodes pour évaluer la toxicité des sédiments :

1. analyses chimiques,
2. étude des bio-indicateurs, c'est à dire des organismes vivants dans le milieu considéré,
3. étude en laboratoire de l'effet de ces matériaux sur des espèces animales ou végétales provenant de milieu non contaminé,

On distingue classiquement deux familles de polluants :

- *les métaux* : qui sont naturellement présents dans les sols et les sédiments. En-dehors de ce contexte, la présence de métaux sous de fortes concentration est liée généralement à des rejets provenant de l'activité humaine [FOX et al., 1993].

Ces métaux peuvent changer de forme et devenir, de ce fait, plus ou moins mobiles. Les plus dangereux sont le mercure et le cadmium qui ne possèdent aucune activité biologique favorable. Ils bloquent l'activité enzymatique indispensable au métabolisme (oxygénation, digestion, reproduction,...). Viennent ensuite le plomb, le

cuivre, le nickel, le chrome ou encore le zinc dont l'accumulation dans les organes cibles (foie, reins) peut entraîner la mort.

- *Les molécules organiques toxiques*, comme les composés de carbone, d'hydrogène, d'azote...

Ils existent en grand nombre (dizaines de milliers), mais seulement 60 000 sont couramment utilisés.

### 1.5.2. facteurs influençant la mobilité des polluants et la toxicité des sédiments :

[DARMENDRAIL, 1987] décrit dans le schéma suivant les principaux échanges qui ont lieu entre les sédiments, l'eau, les matières en suspension et les polluants métalliques.

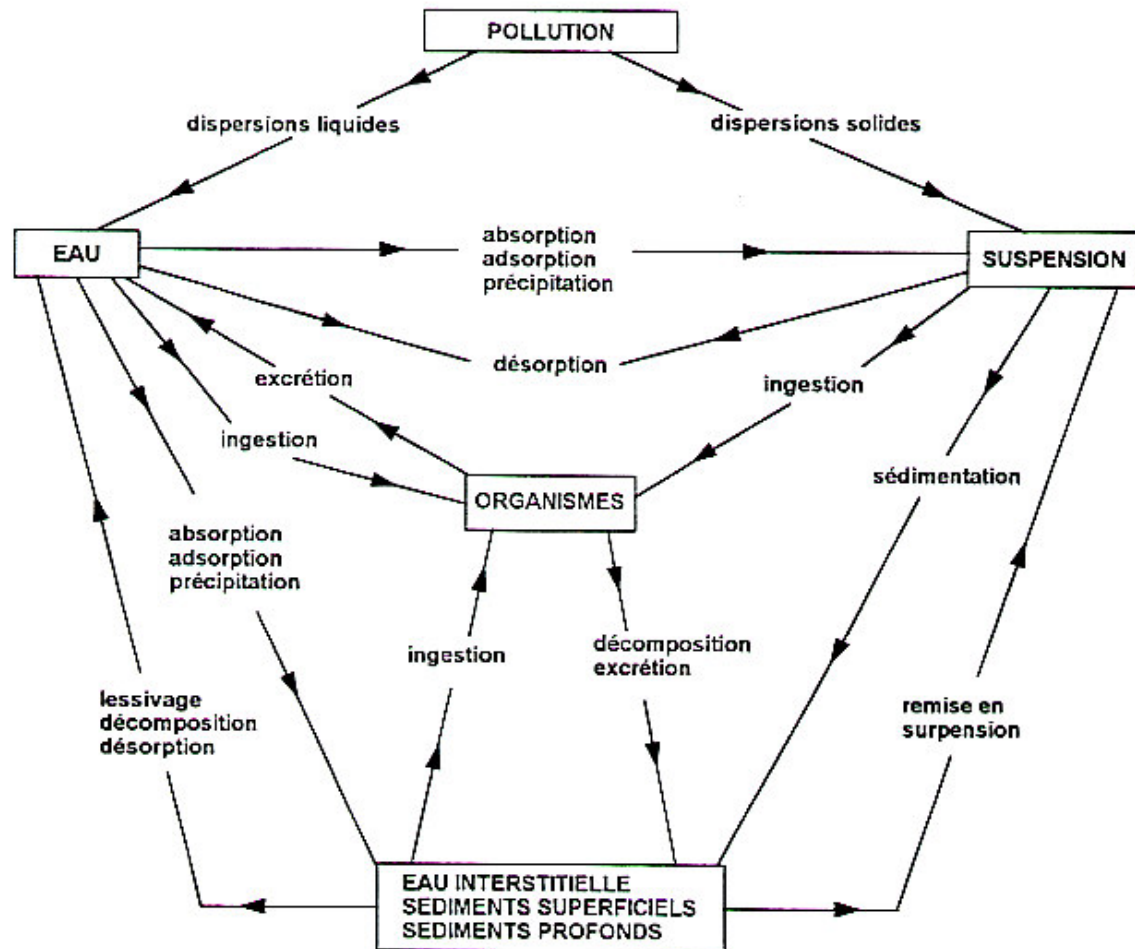


figure 2.2 : comportement des métaux rejetés en cours d'eau [MARCHANDISE et ROBBE, 1978]

### 1.5.3. Degré de contamination des sédiments : seuils de toxicité-références :

Les difficultés qui existent pour caractériser la toxicité des sédiments de dragage contaminés [MAROT, 1997], expliquent en grande partie l'absence de norme de référence concernant ces matériaux en France.

Les tableaux suivants permettent une classification prenant en compte l'origine de ces produits (estuariens, ports, canaux,...) et leur destination (immersion, dépôt, recyclage,...) :

→ *Les sédiments d'estuaires et portuaires* : [GEODE, 1996]

Teneur en mg/Kg de matière sèche	Recommandation GEODE		
	BdF	Niveau 1	Niveau2
Eléments			
Mercuré (Hg)	0.2	0.4	0.8
Cadmium (Cd)	0.5	1.2	2.4
Arsenic (As)	4.4	25	50
Plomb (Pb)	47	100	200
Chrome (Cr)	45	90	180
Cuivre (Cu)	35	45	90
Zinc (Zn)	115	276	552
Nickel (Ni)	20	37	74
PCB	-	0.5	1
HAP	-	-	-

Tableau 2.1 : Niveau de référence concernant la qualité de boues de dragage portuaires et d'estuaires. [BdF : Bruit de fond]

→ *les sédiments de canaux* : [GUILLARD, 1996]

Contaminant en mg/Kg de matières sèches	France	
	BdF des boues du Bassin Artois-Picardie	Sols (NFU 44-041)
Arsenic	5	-
Cadmium	0.5	2
Chrome	25	150
Cuivre	20	100
Mercuré	0.1	1
Nickel	-	50
Plomb	20	100
Zinc	75	300
PCB	-	-

Tableau 2.2 : Niveau de référence concernant la qualité des sédiments de canaux

\* BdF : le seuil naturel de présence des métaux dans l'environnement.

\* Sols : teneurs limites des sols habilités à recevoir l'épandage des boues de station d'épuration.

## 2. Technologies de pré-traitement des sédiments :

Par définition, les procédés de pré-traitements des sédiments sont utilisés pour préparer les matériaux de dragage en vue de leur transport, leur traitement ou leur mise en dépôt, voir leur valorisation.

[AVERETT *et al.*, 1990 ; USEPA, 1991b] dans [Environnement Canada], précisent les objectifs recherchés dans les pré-traitements :

- conditionner les matériaux de dragage en vue de leur traitement et (ou) leur mise en décharge,
- favoriser ou accélérer la sédimentation des parties solides,
- déshydrater afin de mieux manipuler les matériaux,
- séparer les parties grossières, potentiellement non contaminées, des parties fines, généralement plus contaminées,
- réduire les coûts d'exploitation, (dépollution, valorisation).

Les 3 technologies de pré-traitements des boues de dragage sont illustrées sur la figure suivante : [ENVIRONNEMENT Canada ; IFTS]

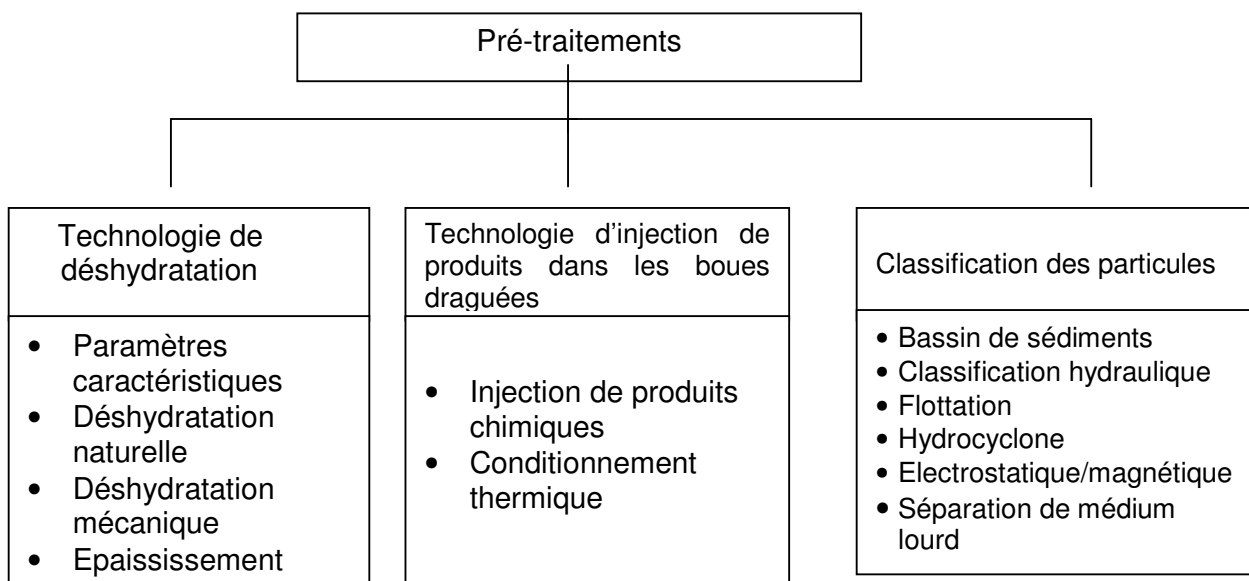


Figure 2.3 : organigramme récapitulatif des technologies de pré-traitements

## **2.1. La déshydratation :**

La teneur en eau est différente selon la méthode de dragage utilisée : dans les sédiments fins, les matériaux excavés par des dragues hydrauliques ont en général un contenu de 50%, alors qu'avec les dragues hydrauliques le contenu en eau peut être supérieur à 90%.

Or, les proportions d'eau jouent un rôle important dans certaines technologies de traitement.

Généralement, les déshydratations visent essentiellement à réduire le contenu en eau des sédiments pour une ou plusieurs des raisons suivantes :

- faciliter la manutention des sédiments,
- réduire les besoins en énergie lors de leur incinération,
- réduire les coûts de traitement de la plupart des technologies, en particulier des technologies thermiques,
- faciliter les dépôts des sédiments en milieu terrestre,
- réduire les coûts de transport par réduction du volume et du poids,
- réduire les volumes de matériaux à traiter ou à mettre en dépôt.

### **2.1.1. Les paramètres de déshydratation :** [I.F.T.S., 1995]

a) résistance spécifique à la filtration ( $\alpha$ ) :

Le coefficient de résistance à la filtration ( $\alpha$ ) représente la résistance opposée à l'écoulement du filtrat par une quantité de gâteau contenant une unité de masse de matière solide sèche répartie sur une unité de surface du filtre.

b) coefficient de compressibilité ( $n$ ) :

Le coefficient de compressibilité est un nombre sans dimension, qui caractérise quantitativement la façon dont la perméabilité du gâteau diminue sous l'augmentation de la pression appliquée.

c) siccité limite ( $S_l$ ) :

La siccité limite représente la siccité maximale que l'on peut obtenir théoriquement par des moyens mécaniques pour une boue donnée et une pression donnée.

d) vitesse de sédimentation ou de décantation :

La vitesse de sédimentation d'une boue est la distance parcourue par les particules en une unité de temps.

$$V = D/T$$

On distingue : \*  $V_0$  : vitesse constante

\*  $V$  : vitesse instantanée

e) teneur en matières sèches (MS) :

La teneur en MS de la boue liquide a une influence importante sur le résultat de la déshydratation sur les filtres à bandes, mais pas sur les centrifugeuses.

f) Teneur en matières volatiles (MVS) :

La siccité finale de la boue après déshydratation est d'autant plus élevée que la teneur en matières volatiles de la boue liquide est faible.

g) indice de centrifugation (IC) :

Une boue est d'autant plus déshydratable que son IC est faible.

h) viscosité :

La teneur en MS joue beaucoup sur la viscosité. Pour une teneur en MS donnée, la déshydratation diminue lorsque la viscosité augmente.

i) indice de boue (IB) :

L'IB renseigne sur la décantation et l'aptitude à la compaction d'une boue ; une boue qui se décante se déshydrate de façon satisfaisante.

j) temps de suction capillaire (TSC) :

Le TSC est le temps nécessaire à la ligne de front du filtrat pour parcourir un centimètre de papier filtre par capillarité. Plus le TSC est petit, meilleure est la filtrabilité de la boue.

k) temps d'égouttement (TEG) :

Le temps d'égouttement mesure la durée de filtration de 100ml de boue à travers un papier filtre donnant 10 ml de filtrat. Il est utilisé comme essai rapide d'optimisation du taux de flocculant.

### 2.1.2. Procédés de déshydratation :

□ la déshydratation naturelle : les lits de séchage :

Cette technique consiste à épandre les boues sur une couche drainante permettant le ressuyage de l'eau interstitielle.

Dans une seconde phase, l'évaporation permet d'atteindre des siccités élevées.

La figure suivante nous montre le lit de séchage classique avec ses constituants :

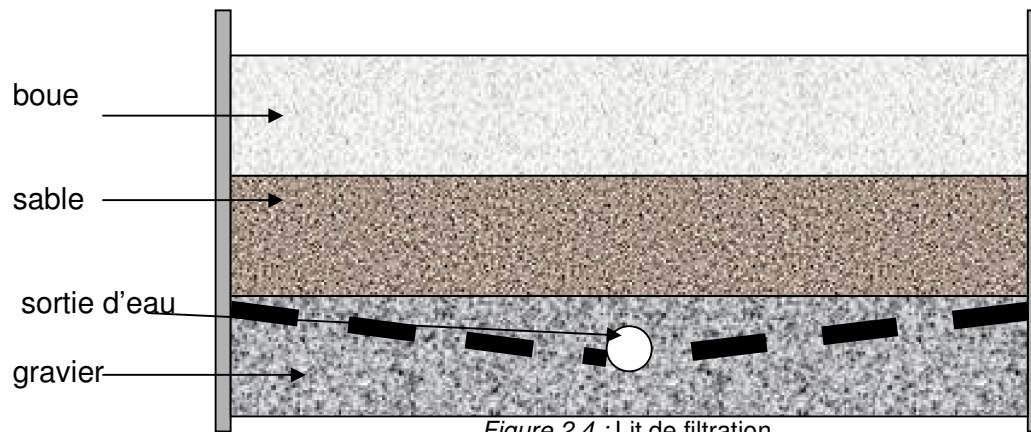


Figure 2.4 : Lit de filtration

□ la déshydratation mécanique :

Dans cette partie, nous allons citer les différentes technologies disponibles actuellement puis, nous dresserons un tableau (2.3.) comparatif de leurs forces et faiblesses :

- le filtre rotatif sous vide.
- Les filtres presses.
  - \* filtre presse classique
  - \* filtre presse à plateaux-membranes
  - \* filtre presse automatique (FPA)
- Les presses à vis.
- Filtres à bandes presseuses.
- Centrifugeuses.

□ la déshydratation par séchage thermique :

Le séchage thermique est une technologie qui sert à évacuer l'eau interstitielle présente dans les boues.

Ce séchage thermique sont varié selon les caractéristiques physiques et chimiques des produits à traiter. Il doit assurer :

- le transport de la matière à sécher ;
- le transport de l'eau ;
- le transfert de l'énergie thermique ;

Cependant, pour des raisons économiques, il est préférable que les boues soient préalablement déshydratés mécaniquement.

PROCEDES	TECHNIQUE	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Gravitaire	Lits de séchage	- siccité élevées (60%) - simplicité - très faible coûts de maintenance	- grandes surfaces au sol - main d'œuvre pour reprise - sujet aux aléas climatiques
Filtration sous vide	Filtres à tambour rotatif	- procédé auto-adaptatif - siccité stable	- coût d'exploitation - complexité - faible siccité (10-20%) - consommation électrique
Filtration sous pression	Filtres presses	-siccité élevée >30% - grande souplesse d'exploitation - entretien limité - filtrats clairs	-système discontinu -investissement élevé -inadaptés aux boues collantes -main d'œuvre -conditionnement chimique préalable recommandé
	Presses à vis	- simple et robuste - économique - procédé continu - peu d'entretien	-limité aux boues grossières -siccité limitée à 25% -conditionnement préalable impératif
	Filtres à bandes presseuses	- investissement modéré - faible encombrement - grande productivité	-siccité limitée à 25% -pas de boues fibreuses -conditionnement poly électrolytes : 2 à 6 Kg/T MS
Centrifugation	Centrifugeuses	-procédé continu -exploitation aisée -grande productivité	-investissement élevé -siccité limitée à 20-25% - conditionnement poly électrolytes :1.5 – 2.5Kg/T MS -inadaptés aux boues grossières.

Tableau 2.3 : récapitulatif des différentes techniques de déshydratation mécanique

A partir de ce tableau, nous constatons que chaque procédé de déshydratation mécanique nécessite des conditions propres à son application, et elles sont en fonction de caractéristiques des sédiments traités et l'endroit d'application.

Par conséquence, les avantages et les inconvénients citées au-dessus, nous permettent de conclure que le procédé «Gravitaire», est le procédé le plus efficace, faisable du point de vue économique ; voir le devenir des boues.

□ L'épaississement :

L'épaississement est un procédé simple qui permet de réduire efficacement le volume des boues sans dépense considérable d'énergie. Cette étape ne s'adresse qu'à l'eau libre des boues.

Le tableau suivant compare les différents procédés d'épaississement :

<b>Procédé</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Epaisseur gravitaire	- faibles coûts d'investissement et d'exploitation - exploitation simple	- insuffisant pour les boues biologiques en grande quantité
centrifugeuse	- compacité - rapidité - efficace sur boues difficiles	- coûts d'exploitation et d'investissement élevé - exploitation délicate
Grille d'égouttage	- coût d'investissement modéré - coût d'exploitation le plus faible - simplicité de fonctionnement - bonne efficacité	- suppose un bon conditionnement.
Tambour d'égouttage	- coûts d'exploitation modérés - simplicité de fonctionnement - bonne efficacité	- suppose un bon conditionnement
Benne filtrante	- fonctionnement très simple - bien adapté aux petites stations	- coûts d'exploitation élevés - temps de main d'œuvre important

### **2.2. Injection de produits dans les boues draguées :**

Dans le cas de projets de dragage hydraulique, l'injection de produits dans les boues prend avantage du processus de mélange disponible dans le pipeline utilisé pour le transport des matériaux de dragage.

Les produits d'injection sont de natures chimiques différentes, et permettent de :

- de conditionner les sédiments pour leur traitement,
- d'accélérer la sédimentation des particules au site de dépôt,
- d'améliorer la biodégradation des substances organiques dans ces mêmes sites de dépôt.

Prenant comme application la technologie de conditionnement qu'elle a de nature physique, chimique ou thermique et elle intervient par l'augmentation de la taille et de la densité des particules après modification des propriétés électriques, chimiques et structurelles.

On peut citer le conditionnement chimique :

- par flocculants minéraux : et surtout la chaux et les sels métalliques trivalents tel que le sulfate d'aluminium, les sulfates et les chlorures ferriques.

Les flocculants minéraux sont bien adaptés à la déshydratation par filtre presse ou filtre sous vide.

- par poly-électrolytes de synthèse, les poly-électrolytes ont pour effet une floculation extrêmement marquée, et une très forte diminution de la résistance spécifique de la boue.

La quantité de matière sèche à déshydrater n'est donc pratiquement pas modifiée.

- par charges inertes, ce sont des produits à faible valeur marchande, telles les cendres volantes de centrales thermiques ou d'usines d'incinération. Ces charges peuvent être incorporées à la boue avant filtration ou utilisées en pré-couches.

### **2.3. Technologie de classification des particules :**

La technologie de classification des particules sépare les boues selon leur granulométrie et enlève les particules grossières incompatibles avec les procédés de traitement. Dans la gestion des sédiments contaminés, cette classification en fonction de la granulométrie est importante car les contaminants s'accumulent

principalement dans la partie fine et organique des sédiments. La partie fine peut être traitée pendant que la partie plus grossière, relativement non contaminée, peut être mise en dépôt après un traitement minimum ou sans aucun traitement additionnel [USEPA, 1991b].

Les technologies de séparation des particules, pour un site donné, doivent tenir compte des caractéristiques suivantes :

- le volume de sédiments contaminés,
- la composition des sédiments à savoir la granulométrie et les pourcentages de solides et d'argile qu'ils contiennent,
- la nature de la contamination,
- le type de drague utilisé,
- l'environnement du site, incluant les superficies de terrain disponibles à proximité.

Les technologies de classification ou de séparation des particules incluent :

- les bassins de sédimentation,
- les clarificateurs hydrauliques et à vis hélicoïdale,
- la flottation,
- les grillages fixes ou mobiles,
- les grilles à barreaux,
- les hydrocyclones, les séparateurs électrostatiques/magnétiques,
- la séparation de médium lourd et les tables secouées.

#### **2.4. Conclusion :**

Enfin, il convient de rappeler que le choix de certaines technologies est fonction uniquement de la granulométrie ou de la densité des particules, alors que d'autres technologies tiennent compte à la fois de la granulométrie, de la densité des particules, et d'autres paramètres : économiques, degré de contamination, le futur type de valorisation... d'autre part.

Des propriétés conductrices ou magnétiques des particules peuvent aussi influencer le choix de certaines technologies.

### **3. PROCÉDES DE TRAITEMENT ET DE DEPOLLUTION DES BOUES :**

Les études et les recherches appliquées sur les sédiments toxiques sont récentes, et ont presque les mêmes programmes que ceux concernant les sols contaminés.

La problématique sur les sédiments est dans l'ensemble plus complexe [MAROT, 1997]. Deux facteurs en sont à l'origine :

- D'une part, pour des nombreux sols contaminés, l'origine de la pollution est déterminée (ancienne activité industrielle, déversement accidentel). Sa nature est ainsi connue et les responsabilités sont plus facilement établies. Tandis que dans le cas des sédiments, la pollution provient la plupart du temps de rejets d'origines variées (industriels, urbains ou agricoles), mélangés entre eux et véhiculés par l'eau et les matières en suspension. Tous ces phénomènes, qui favorisent la dispersion et la transformation chimique des polluants, rendent la caractérisation nettement plus difficile.
- D'autre part, les caractéristiques physiques sont assez différentes et influent considérablement sur les procédés de traitement. Les polluants sont très souvent liés aux particules fines et une simple séparation granulométrique peut suffire à les récupérer.

Cependant, le rapport de l' [I.F.T.S., 1995] ajoute d'autres paramètres : physico-chimiques, la nature de l'eau contenue et l'aptitude à la déshydratation.

Les différents procédés et les éventails des techniques de traitement des sédiments toxiques et sols contaminés se trouvent presque tous dans la majorité des références les plus récentes concernant les études sur les boues de dragage : [Environnement Canada, 1993].

[MAROT , 1997] a classé et organisé ces techniques en trois grandes familles en donnant des exemples d'application :

- les procédés de traitement par concentration des polluants : les polluants sont isolés de la matrice sédimentaire et le sédiment est décontaminé en tout ou en partie, (paragraphe 3.1)
- les procédés de traitement par dégradation des polluants : ces procédés ne sont applicables qu'à certaines contaminations organiques. Les polluants sont détruits par voie chimique (oxydation) ou biologique (biodégradation), (paragraphe 3.2)
- les procédés de traitement par neutralisation des polluants : le matériau contaminé est alors soit stabilisé (mélange avec de liants hydrauliques, vitrification, ..), soit détruit (incinération), (paragraphe 3.3)

### **3.1. procédés de traitement par concentration des polluants :**

#### *3.1.1. Traitements physiques et physico-chimiques :*

Les procédés de traitements physico-chimiques reposent sur les spécificités des polluants et les fractions particulières de la matrice des sédiments. On parle alors du lavage du sol (soil washing).

L'objectif de ces procédés est de réduire le volume des sédiments contaminés afin de les décharger, et de dégrader les polluants. Cela entraîne une augmentation de la fraction fine qui pénalise les bilans de décontamination [BUNGE, 1995].

[MAROT , 1997] décrit ces différents procédés:

##### 3.1.1.1. Le cyclone :

- Principe : ce procédé consiste à utiliser un hydrocyclone : il s'agit d'un tube conique ouvert à ses extrémités, l'alimentation en pulpe sous pression se fait par des orifices latéraux. Sous l'effet de la vitesse, un vortex se forme. Les grosses et lourdes particules glissent vers la sortie en bas. Les particules les plus fines et les plus légères se stabilisent au fond du vortex et sortent en débordement de l'hydrocyclone.

Cet outil est largement utilisé dans le traitement des sédiments de dragage, il permet la séparation granulométrique jusqu'à dix microns.

- Exemples d'application : l'utilisation de l'hydrocyclone en Allemagne (port de HAMBOURG) a permis de traiter environ deux millions de mètres cubes par an de sédiments pollués par différents composés (métaux, huiles, PCB et PAC). Les travaux de caractérisation ont montré que la quasi-totalité des polluants se trouve dans la fraction granulométrique inférieure à 60µm.

Ainsi, en Angleterre, il a été utilisé pour dépolluer les sédiments de « Birmingham Canals »(5000 m<sup>3</sup>), contaminés par des métaux (Pb, Zn, Cu) et des huiles. [BROMHEAD *et al.* , 1996] dans [MAROT, 1997].

[GARBCIAK *et al* , 1993] a remarqué que la fraction fine des sédiments de «Saginaw River » aux Etats Unis, contenait des silts et des argiles représentant 10 à 20 % de la boue initiale. La teneur en PCB de la fraction sableuse est divisée par six, après cyclonage.

Dans ces trois exemples, [MAROT, 1997] note que le traitement par hydrocyclonage est suffisant pour obtenir une fraction sableuse propre.

#### 3.1.1.2. L'attrition :

- Principe : l'attrition n'est pas un outil de décontamination des boues, elle est utilisée souvent en pré-traitement pour conditionner les matériaux à traiter. Les matériaux argileux sont les plus concernés parce qu'ils peuvent se trouver enrober avec des grosses particules minérales par des fines polluées. D'autre part, une attrition efficace de sols contaminés conduit à la désagrégation sans substances organiques nocives, et au nettoyage des surfaces minérales sans concassage excessif des minéraux cristallins.

- Exemples d'application : des essais ont été réalisés à Francfort sur un sol argileux, pollué par des HAP et des métaux lourds. L'attrition a donné des fractions fine inférieure à 63 µm.

#### 3.1.1.3. La gravimétrie :

- Principe : ils existent plusieurs formes d'interaction polluants/matériaux, (liaisons ioniques, liaisons hydrogène, interactions avec cations métalliques, liaisons de London-Van der Waals, interactions hydrophobes, liaisons covalentes [BAYARD, 1997]) : tels que les matériaux organiques (bois, charbon, végétaux) qui absorbent facilement certains polluants [ENNIS *et al.*, 1992]. En outre, les polluants sont à la fois sur la fraction légère constituée de matières organiques et sur la fraction lourde correspondant à des minéraux lourds ou à des déchets particuliers [MAROT, 1997]. Cependant, la séparation gravimétrique est importante pour les opérations de décontamination. Les principaux procédés sont les spirales, les tables à secousses ou les élutriateurs.
- Exemples d'application : aux Pays-Bas, un appareil de séparation gravimétrique a été mis au point [ENNIS *et al.*, 1992] dans [MAROT, 1997] ; la séparation est obtenue à une densité d'environ 1,8. En Allemagne, cette opération est réalisée au moyen de liqueurs denses organiques [LANGEN *et al.*, 1994] dans [MAROT, 1997]. Une première liqueur de densité 2 sépare la fraction légère, puis une seconde de densité 2,85 isole la fraction lourde.
- Limites du procédé : ces techniques de séparation ne semblent pas avoir été essayées à grande échelle sur les sédiments. La granulométrie des particules constitue la principale limite à ces utilisations (fractions fines).

#### 3.1.1.4. La séparation magnétique :

- Principe : Ce procédé est utilisé pour les sols et les sédiments contaminés par des particules solides métalliques. Il consiste à séparer les différents métaux magnétiquement ou électrostatiquement.
- Exemple et limites : Des études ont été faites au Canada [MORTAZAVI *et al.*, 1992] sur un sol contenant du cadmium, du cuivre, du Plomb, et du zinc. La granulométrie des particules était comprise entre 500 et 1180 µm ; les résultats obtenus nous ont montré une fraction magnétique concentrant 70% du cadmium et 75 % du zinc, mais seulement 32 et 38 % du plomb et du cuivre,

respectivement. Ainsi, pour des contaminations marquées par des différences de comportement aussi importantes entre les porteurs métalliques, le potentiel d'application de ce procédé est particulièrement limité.

#### 3.1.1.5. La flottation :

- Principe : c'est une technique physico-chimique qui consiste à séparer les particules solides de la solution aqueuse et gazeuse (habituellement l'air) en utilisant les différences de propriétés des interfaces. En plus, l'ajout d'un additif chimique (collecteur) rend ces particules solides hydrophobes.
- Exemple d'application : la flottation a été utilisée dans différents domaines :
  - traitement des minerais,
  - traitement des eaux usées,
  - désencrage des vieux papiers.

En outre, cette technique a été utilisée dans le traitement des sols et des sédiments en tenant compte de très nombreux paramètres qui peuvent être contrôlés (collecteurs, pH, température, concentration solide, taille des particules,...) [PEARL *et al.*, 1994] dans [MAROT, 1997].

Aux Pays-Bas, une étude a été menée sur les sédiments du port de Elburg contaminés par des HAP et des métaux [RIZA, 1996] dans [MAROT, 1997]. Les premiers essais ont été réalisés en laboratoire sur la fraction inférieure à 300  $\mu\text{m}$ . Un hydrocyclone a permis de séparer les particules fines (0/30  $\mu\text{m}$ ) et sableuses. Puis, les deux produits engendrés par ce prétraitement ont été traités séparément en cellule de flottation. La flottation de la fraction fine a conduit à récupérer entre 58 et 72% des HAP sur 10 à 30% de la masse initiale. Les résultats sont encore meilleurs pour la fraction sableuse. Dans ce cas en effet, 84 % des polluants organiques sont isolés sur 1.8% de la masse.

Face à de tels résultats, des essais pilotes ont été lancés sur 500 tonnes de sédiment brut. Un hydrocyclone a permis d'éliminer la fraction grenue saine. La flottation a été réalisée sur les 100 tonnes de fines en deux jours. Le comportement des polluants organiques est relativement homogène tout au long des essais. Les résultats sont plus difficiles à interpréter dans le cas de la pollution métallique. En effet, la teneur en plomb du circuit d'alimentation a varié de 270 à 1900 ppm. Ainsi, le bilan de la première campagne d'essai concernant ce métal est nul (8% du plomb sur 8% pondéral). La seconde campagne montre une tendance positive qui reste cependant inférieure à celle des polluants organiques (67% du plomb est isolé sur 26% de la masse).

- [LANGEN *et al.*, 1994] confirme que l'application de cette technique est intéressante sur les pollutions organiques. Les résultats pour les pollutions métalliques, étaient mitigés.

Deux facteurs sont à prendre en compte : le choix des collecteurs et le complexe formé par la matrice et les polluants dans le sol.

#### 3.1.1.6. L'électromigration :

- Principe : Cette technique consiste à mettre en place deux électrodes dans les matériaux à traiter. Une différence de potentiel se produit qui favorise la formation de deux solutions : basique à la cathode et acide à l'anode. Ensuite, les 2

solutions sont récupérées et mélangées pour obtenir la neutralisation des jus et la précipitation des métaux. [MAROT, 1997]

- Exemples d'application : des essais ont été réalisés aux Etats-Unis qui ont conduit à des récupérations de 72% du zinc et du manganèse et seulement 46% du plomb [LUTFUL *et al.*, 1994] dans [MAROT, 1997].
- Limites : La première limite rencontrée en considérant l'exemple précédent : des éléments tel que le plomb.. ont besoin de différence de potentiel supérieures à 200 volts ; cela implique des consommations excessives en énergie. Ensuite deux raisons majeures rendent l'application de cette technique assez délicate sur les sédiments:
  - le matériau doit être suffisamment perméable pour faciliter la migration des polluants ;
  - la forte proportion de fines dans les sédiments est donc préjudiciable.

### 3.1.2. *traitements chimiques :*

Le traitement des sédiments par voie chimique dépend de la nature des polluants, qui peuvent être soit extraits par mise en solution (extraction par lixiviation; extraction par complexation pour les inorganiques), soit piégés (extraction par solvant pour les organiques, échange de cations pour les inorganiques) [MAROT, 1997]

#### 3.1.2.1. Extraction par lixiviation :

- Principe : ce type d'extraction chimique concerne en grande partie les pollutions métalliques, il entraîne un changement des contaminants et bien souvent de leurs porteurs [GOSSOW *et al.*, 1992] dans [MAROT, 1997].

Les trois principales étapes sont :

La dissolution des polluants par l'utilisation d'acides (HCL, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>) ou de bases (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ou NaOH) qui s'attaquent à leurs porteurs spécifiques. La solution ionique est ensuite récupérée par filtration ou centrifugation, puis les polluants qu'elle contient sont précipités [ASSINK, 1985] dans [MAROT, 1997].

- Exemples d'application : en plus des sédiments et de la nature du polluant, le pH joue un rôle important dans l'extraction acide. Des essais menés aux Pays-Bas, montrent l'utilisation d'acide chlorhydrique sur des prélèvements qui n'ayant pas conduit à des lixiviations satisfaisantes, malgré une forte acidité du milieu (pH compris entre 0.5 et 1).

Cet acide a un pH = 2, a été utilisé sur des sédiments du port d'Anvers pollué par des métaux. La libération des métaux a été étudiée en fonction du temps. Après une ou deux heures, l'optimum est atteint pour Ni, Co, Pb, Fe, et Cr et après un certain temps pour d'autres métaux (Cd et Zn...).

- Limites : cette technique est insuffisante dans le traitement des sédiments : d'une part, certains métaux sont difficilement lixiviable (Hg et As), et la réutilisation des matériaux est comprimée après traitement dans un milieu acide, et d'autre part, elle entraîne une forte concentration en sels. Ce problème peut être résolu par évaporation, mais cela entraîne des coûts importants [DETZNER, 1993].

#### 3.1.2.2. Extraction par complexation :

- Principe, exemples et limites : ce procédé consiste à introduire dans la pulpe sédimentaire, par agitation, des agents chimiques ayant de fortes propriétés complexantes vis-à-vis des polluants inorganiques. Les principaux agents sont : l'EDTA, le NTA ou encore l'acétate d'ammonium.

Des essais qui ont été réalisés sur des sédiments contaminés par des métaux avec l'agent EDTA, montrent une récupération métallique comprise entre 70 et 90%. [SCHOTTEL et RIENKS, 1993].

#### 3.1.2.3. Extraction par solvant :

- Principe, exemples et limites : ce procédé est appliqué sur des sédiments solide et liquide, contaminé par des polluants organiques, il s'agit de les séparer en utilisant des solvants.

Nous pouvons citer deux applications faites aux Etats-Unis.

la première s'est effectuée sur deux échantillons de la rivière « grand Calumet », les teneurs en PCB étaient de 12 et 425 ppm et celles en HAP de 548 et 70920 respectivement. Le solvant utilisé était du tri éthylamine. Le procédé a permis de récupérer la majeure partie du PCB et des HAP (PCB > 99.5% et HAP variait entre 96 et 99%). [GARBACIAK *et al.*, 1993]

Dans la deuxième application, le solvant utilisé était un gaz liquéfié (mélange de propane et de butane). La concentration du PCB était de 360 et 2575 ppm. La récupération du contaminant a atteint 90 à 98% [JAMES *et al.*, 1992] dans [MAROT, 1997] qui a estimé le coût de ce procédé entre 750 à 2300 F.F./tonne (115 à 350 euros/tonnes).

#### 3.1.2.4. Procédés d'échange cationique :

Ce procédé a été appliqué en laboratoire [MAROT, 1997] : l'ajout de polymères synthétiques a été préféré aux coagulants alumineux et ferriques.

Les deux paramètres à respecter pour ce procédé sont la valeur du pH naturel ou neutre (7) et le temps de contact.

#### 3.1.3. *traitements biologiques :*

##### 3.1.3.1. biolixiviation :

- Principe : la bio-lixiviation a pratiquement le même principe que la lixiviation chimique, sauf que le milieu acide est contrôlé selon une procédure particulière (bactéries, champignons...). La procédure est la suivante :
  - décomposer et mettre les matériaux à traiter en tas,
  - ajouter une solution lixivante qui sert à disperser les bactéries et les métaux dissous,
  - récupérer le jus de lixiviation à la fin de l'essai pour être traité et recyclé.

Le choix des microorganismes dépend de plusieurs facteurs : du pH, de la source du carbone, de la vitesse d'agitation, de la température.

- Exemples d'application : Des essais ont été effectués aux Pays-Bas [SCHOTTEL *et al.*, 1993] et à HAMBOURG, Allemagne [DETZNER, 1993], sur des sédiments analogues, avec des bactéries qui permettent l'acidification du milieu par production d'acide sulfurique. Les résultats sont mitigés car le temps de traitement était extrêmement long et faible pour permettre une décontamination suffisante. Enfin, la flottation des silts pour éliminer la solution chargée en métaux dissous a posé de nombreux problèmes.

Une autre étude est en cours sur des sédiments prélevés dans le canal de la Deûle à HAUBOURDIN [IZA, 1994] dans [MAROT, 1997]. Ils ont utilisé des champignons à la place de bactéries car la solubilisation des métaux lourds se produit à des pH nettement moins acides. Trois mécanismes permettent de solubiliser les métaux : l'acidolyse, la complexolyse et la rédoxolyse.

Les résultats montrent que les champignons se développent facilement sur les boues, même fortement contaminées. Les bilans définitifs ne sont pas encore établis.

- Limites : les limites de cette technique ne paraissent pas trop importantes. Les éléments permanents à prendre en compte sont la nature des sédiments et les formes chimiques des polluants.

Les durées importantes du procédé sont compensées par des coûts assez faibles [MAROT, 1997]

#### 3.1.3.2. bioaccumulation :

- Principe : certaines parties des plantes (racines, tiges, feuilles..) permettent d'accumuler des métaux, et sont plantées dans des sites pollués. Cette accumulation sert à diffuser la pollution.

[ERNEST, 1992] a mesuré dans certaines plantes des valeurs de teneurs métalliques supérieures à 1 g/kg de matière sèche.

Après avoir cultivé, récolté, séché les plantes, et les avoir incinéré, les métaux sont récupérés dans les déchets ultimes de l'incinération, ce qui permet l'élimination d'une partie des polluants.

Des concentrations trop fortes en zinc sont susceptibles de perturber l'action des plantes [DETZNER, 1993].

- Exemples et limites: les premières expérimentations ont été effectués au port d'HAMBOURG, ils ont choisi le chiendent pour bioaccumuler les métaux contenus dans les silts de l'Elbe. [DETZNER, 1993]

Les résultats obtenus ont été positifs, mais des limites qui rendent cette technique n'est pas applicables sur différents types des sédiments, en considère comme exemple le port dernier : les sédiments testés sont peu pollués par rapport aux études généralement menées sur les sols, le procédé est rapide au début, et décroît au fur et à mesure de la diminution des teneurs métalliques. En plus, les surfaces de traitement sont importantes.

Une autre étude est encore en cours sur les sédiments de la région Nord-Pas de Calais. L'utilisation de jacinthes d'eau nécessite le recours aux cultures sous serres, car en-dessous de 10°C, cette plante tropicale cesse de pousser. Les premiers résultats montrent là encore des bio accumulations importantes.

#### 3.1.4. *traitements thermiques* :

##### 3.1.4.1. la désorption :

Les technologies thermiques utilisent la chaleur pour détruire, encapsuler, désorber ou volatiliser les contaminants. Les procédés les plus communs sont l'incinération qui détruit les contaminants organiques par combustion (condition aérobie) et la pyrolyse qui détruit les contaminants organiques en l'absence d'oxygène (condition anaérobie). En annexe, est détaillé le procédé TPS TECHNOLOGIES de la société DEEP GREEN.

- Exemples d'application et limites : l'application de cette technique sur différents sédiments pollués par le PCB et les HAP aux Etats-Unis, a permis la libération de 80% du HAP, et la récupération des composés volatilisés par condensation. Ainsi, les polluants sont concentrés sous une forme huileuse représentant un volume réduit, facilement récupérable. [GARBACIAK *et al.*, 1993]

### **3.2. Procédés de traitement par dégradation des polluants :**

### 3.2.1. oxydation à l'air humide :

- Principe : l'oxydation à l'air humide est un procédé qui permet d'accélérer la cinétique d'oxydation chimique des composés organiques. D'après [FLETCHER et BURT,1996] dans [MAROT, 1997], ces composés organiques se transforment en gaz carbonique et en eau sous l'action de l'oxygène. Deux facteurs importants jouent un rôle dans la saturation et la solubilisation en oxygène : La température et la pression.
- Exemples et limites : d'après [MAROT, 1997], cette technique est limitée aux boues de stations d'épuration (régénération du charbon actif) et dans le traitement des sols (traitement des HAP et des huiles minérales). Cependant il y a eu une application sur les sédiments portuaires du port d'Elburg aux Pays-Bas [RIENKS, 1996], les résultats préliminaires ont permis de séparer les fractions fines polluées des sables propres. Les matériaux ont été exposés aux techniques d'oxydation (pression, température et temps convenables), la quasi-totalité des HAP a été dégradée et les huiles minérales ont été dégradées à 80%.

### 3.2.2. oxydation au peroxyde d'hydrogène :

Cette technique repose sur le même principe que toutes les techniques d'oxydation. Elle consiste en l'oxydation des composés organiques par des agents chimiques (par H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Les résultats des essais qui ont été faits ne sont pas suffisants. C'est pourquoi, cette technique n'a pas été développée [MAROT, 1997].

### 3.2.3. biodégradation :

- Principe : le traitement par dégradation micro-biologique favorise des réactions naturelles afin d'accélérer la destruction des molécules polluantes (souches bactériennes adaptées, aération du matériau, température, pH et teneur en eau). Cette technique n'est pas très efficace pour les métaux car ils ne sont pas biodégradables. Le principe consiste à épandre les sédiments sur une couche imperméable en ajoutant une souche bactérienne appropriée. Le temps nécessaire pour cette méthode est de 2 à 3 ans, cependant l'utilisation des serres pourrait accélérer la biodégradation [MAROT, 1997]. Cette technique peut se réaliser avec procédé dynamique, mais les coûts sont nettement supérieurs.
- Exemples et limites : des essais ont eu lieu en Belgique et aux Etats-Unis qui ont donné des résultats performants (la dégradation de 97% des huiles minérales et d'une grande proportion du PCB ). [DE MEYER, 1996 et GARBACIAK et *al.*, 1993] dans [MAROT, 1997]. La seule limite rencontrée pour cette technique est la dégradation insuffisante des métaux lourds, et le temps nécessaire.

## **3.3. Procédés de traitement par neutralisation des polluants :**

procédés préliminaires de séparation solide-liquide :

- La flottation-coagulation,
- Les traitements mécaniques,
- Le séchage.

procédés de neutralisation des polluants :

- Procédés d'immobilisation,

- La vitrification,
- L'incinération.

Le contexte général de ce type de traitement consiste soit à stabiliser le matériau contaminé en le mélangeant avec des liants hydrauliques, ou par vitrification.., soit à le détruire (incinération). C'est ce qu'on dénomme procédé de Solidification/Stabilisation. [BOUTOUIL et *al.*, 1998].

Ce traitement sera vu en détail, dans le chapitre 2 : Valorisation.

#### **4. LE TRAITEMENT DES BOUES RESIDUAIRES :** [I.F.T.S., 1995]

Quelle que soit la boue, la ligne de traitement est un poste très important ; dans les stations d'épuration, elle est à l'origine de 90% des problèmes d'exploitation. Elle est conditionnée par la destination finale des boues.

Le traitement des boues consiste à :

- réduire leur caractère fermentescible afin de diminuer les nuisances qu'elles peuvent engendrer (en décharge, pour l'agriculture) ;
- concentrer la matière sèche afin :
  - d'améliorer leur valeur agronomique (agriculture)
  - de diminuer les coûts de transport et de stockage (valorisation agricole, décharge)
  - d'augmenter leur pouvoir calorifique (incinération).

La chaîne de traitement classique des boues est schématisée ci-dessus (voir différentes méthodes de prétraitement).

#### **5. EXEMPLES D'APPLICATION INDUSTRIELLE :**[Environnement Magazine ; No 1597 – Mai 2001]

##### Compostage :

Hortstmann a mis en route l'an dernier la première unité de compostage de boues en tunnel, une technique déjà appliquée à l'étranger sur d'autres déchets. Dans le cas de l'unité de Rambouillet (15 000 tonnes par an), les boues sont mélangées avec des déchets verts ou avec la fraction fermentescible des ordures ménagères.

Le procédé en tunnel optimise le processus naturel de fermentation aérobie (aération forcée), ce qui raccourcit considérablement les phases d'hygiénisation et de maturation du compost. Les odeurs sont éliminées par un circuit fermé avec désodorisation par bio filtre et lavage d'air si nécessaire. La récupération des jus et des eaux de pluie suffit à couvrir les besoins. Le système est automatisé et peut être modulaire. Doté d'un modem, il peut être commandé à distance et faire l'objet d'un diagnostic à distance. [HORSTMANN, 2000]

##### Informatique :

Développé par Sede en 1997, Suivra est le premier logiciel intégré pour la gestion des filières de recyclage des boues en agronomie. Dans sa nouvelle version (v5), un module d'exploitation gère la logistique de la filière. Le logiciel permet en outre une remise à jour dynamique des quantités entreposées par lieux de stockage, chaque site pouvant accueillir plusieurs produits. Comme les autres modules, celui gérant l'exploitation est lié à un système cartographique visualisant les parcelles d'épandage avec les données chiffrées s'y rapportant. [SEDE, 1997].

##### Sédiments

Bertin technologies, en partenariat avec Solvay, développe un procédé pour valoriser les sédiments fluviaux et maritimes. Le procédé Novosol, dérivé d'un

procédé Solvay de traitement et de stabilisation des cendres volantes d'incinération des boues, associe un traitement chimique qui fixe les métaux lourds, à un traitement thermique pour l'oxydation complète des composés organiques. Les résultats obtenus en laboratoire montrent qu'on obtient un solide inerte non polluant. Un projet doit démontrer les performances du procédé à l'échelle pilote et évaluer les possibilités d'utilisation du matériau traité en applications techniques routières, en ouvrages de protection du littoral (digues, jetées) ou en réhabilitation d'anciennes carrières. [BERTIN TECHNOLOGIES].

### Pompages

La société Rivard propose une solution pour éviter les mauvaises odeurs lors des opérations de collecte des boues des réseaux d'assainissement ou des graisses de bacs à graisse. Le RGOS est un module de filtration sur cartouche de tissu de charbon actif qui adsorbe les odeurs dans un volume réduit. Une fois saturées, ces cartouches, issues du savoir-faire de la société Sofrance, peuvent être incinérées sans dégagement de vapeur toxique ou de chlore. Le système RGOS, installé sur le Mistral, le plus silencieux des hydrocureurs de Rivard, permet de pomper les boues dans des conditions optimales. [RIVARD, 2001]

### Compostage :

Valbé a testé l'an dernier et mis en œuvre pour la première fois cette année un procédé de compostage des boues et de déchets verts en mélange dans des boudins en polyéthylène ventilés (3m\*45m) d'une capacité de 100 m<sup>3</sup>. Une machine sur laquelle s'enfile le sac en plastique contrôle la densité et le compactage de chaque sac du remplissage et pose les tuyaux de ventilation. Ainsi le procédé garantit une aération homogène du mélange et la production d'un bon compost. Des vannes sont ensuite poinçonnées sur les sacs pour contrôler la ventilation, la température et suivre la maturation du compost.

Totalement clos, le système assure la maîtrise des nuisances olfactives et l'écoulement des lixiviats. L'apports d'eau est moindre et bien sûr le système présente l'avantage d'être mobile et évolutif en fonction des sites.

### Extraire les métaux lourds des boues :

Un nouveau procédé de traitement des boues a été récemment annoncé par ONDEO, à la suite d'un accord passé avec la société canadienne Biolix.

Il s'agit de la gamme Métix, qui regroupe quatre procédés de lixiviation des métaux, deux biolixiviations et deux lixiviations chimiques.

Dans un premier temps, la lixiviation chimique sera privilégiée par la Lyonnaise des eaux qui commercialisera le procédé. Le principe consiste à introduire les boues liquides dans un réacteur sous certaines conditions de pH et d'oxydoréduction afin que les métaux se solubilisent.

Ils sont alors récupérés dans le filtrat lors de la déshydratation mécanique des boues puis précipités.

Métix devrait permettre de garantir l'innocuité des boues d'épuration urbaine, tant pour l'épandage que pour l'incinération (cendres sans métaux faciles à valoriser), mais aussi intéresser le marché du traitement des boues de dragage.

## **6. CONCLUSION :**

Les techniques de traitement des boues de dragage, ne sont ni compliquées, ni irréalisables ; les constituants des boues sont rencontrés dans la vie courante :

- Sédiments (Argile, Limon, Sable, Roche,...)

➤ Polluants (Déchets des activités industrielles, Composés organiques,...)

Le choix d'une méthode est conditionné par un certain nombre de paramètres:

- la nature des sédiments et des polluants ;
- le degré de contamination ;
- le coût ;
- le volume à traiter ;
- le type de liaison sédiment – polluant.
- 

[L'ENVIRONNEMENT Canada, 1994] présente dans le tableau suivant tous les procédés de traitement des boues, leurs applications, leurs limites, puis leurs impacts secondaires.

Une problématique constatée dans cette synthèse bibliographique est la pollution métallique. Plusieurs ouvrages ont interprété la problématique des boues, leurs caractéristiques, leurs traitements, et leurs valorisations sans avoir détaillé la voie de traitement de la pollution métallique. Cependant nous avons remarqué que la Solidification/Stabilisation offre souvent des solutions satisfaisantes, en plus de nouveau procédé décrit ci-contre (extraire des métaux lourds).

<i>Procédés</i>	<i>Applications</i>	<i>Limites</i>	<i>Impacts secondaires</i>
<b>Mécaniques et prétraitement :</b> -bassin de sédimentation  -déshydratation mécanique  -classification des particules	-Déshydratation et séparation des sédiments selon leur granulométrie. -Déshydratation plus efficace des sédiments fins.  -Séparation des particules solides allant jusqu'à 10µm	Requiert des terrains de grande superficie. Longue période de traitement. Coûteux et énergivore. Procédés conditionnés par la granulométrie des sédiments, le pourcentage des solides, la densité des particules, la proportion et le type de contaminants à traiter.	Risque de relargage des contaminants dans l'environnement.  Produit une eau de lavage devant être traitée. Aucun impact significatif.
<b>Biologique :</b> Utilisation de microorganisme pour dissocier les PCB pesticides et autres contaminants organiques.	Les microorganismes doivent être adaptés aux types de contaminants présents dans les sédiments.	Nécessaire de longues périodes et de grandes superficies pour le traitement. Fiabilité non assurée en raison de la nécessité de maintenir des conditions optimales en tout temps.	Emissions de substances organiques volatiles.  Dégradation incomplète des produits dangereux.
<b>Thermique :</b> -Haute température (milliers de degrés).  -Basse température (centaines de degrés).	Option efficace pour détruire les contaminants organiques.  Haute efficacité pour les contaminants organiques (de l'ordre de 80% pour les HAP)	Non-destruction des métaux à l'exception du mercure et du plomb (volatiles) Certains peuvent devenir plus mobiles dans les cendres qu'initialement dans les sédiments . Coûts élevés si les sédiments ont une forte teneur en eau.	Emissions atmosphériques.  Dépôt contrôlé des cendres.

<p>Extraction : Enlèvement des contaminants d'un milieu par une dissolution dans un fluide, lequel est ensuite traité.</p>	<p>Peut enlever les contaminants organiques et les métaux lourds, mais rarement les deux dans le même fluide.</p>	<p>Pour une haute efficacité, nécessite plusieurs cycles d'extraction. Efficacité limitée pour les sédiments contenant un pourcentage élevé de particules fines (limon, argile)</p>	<p>Elimination des résidus.</p>
<p><b>Chimique :</b> Utilise des substances chimiques et l'oxydoréduction pour enlever ou détruire les contaminants.</p>	<p>Application répandue dans l'industrie chimique lorsqu'un nombre limité de composés chimiques sont présent et que le milieu à traiter est l'eau.</p>	<p>Technique peu appliquée pour le traitement des contaminants organiques et des métaux lourds dans les sédiments. Réaction traitant un polluant peut augmenter la mobilité d'autres contaminants.</p>	<p>Emissions de substances organiques volatiles.  Elimination des résidus.</p>

Tableau 2.4 :synthèse des avantages et des limites de chaque type de traitement des sédiments contaminés.[centre st. Laurent, 1994]

## CHAPITRE 3 : CAHIER DE CHARGE

L'entretien des installations portuaires ou fluviales nécessite le recours aux opérations de dragage. Ces dernières génèrent des volumes de vases considérables. Par exemple : au port de Nantes-saint-Nazaire 5 Mm<sup>3</sup>/an, et au port P.A.D. (Port Autonome du Dunkerque) 3.5 Mm<sup>3</sup>/an.

En général, le volume en boues portuaires et de canaux estimé en France est supérieur à 40 Mm<sup>3</sup>/an.

Au niveau européen, la production de boues est estimée à environ 7 millions de tonnes de MS/an. Elle devrait passer à 15 – 20 millions à l'horizon 2005. [OTV, 1997]

Les millions de mètres cubes de sédiments dragués annuellement, proviennent soit de l'entretien régulier des chenaux, soit d'opération de restauration des niveaux d'eau dans des darses ou bassins plus ou moins exposés aux apports polluants.

Ces boues draguées sont souvent contaminées par plusieurs types de polluants : «métaux lourds, composés organiques, hydrocarbures polycycliques aromatiques, organochlorés (PCB), pesticides..», dus aux rejets industriels et autres apports.

Des recherches et des études ont été réalisées en vue du traitement des boues de dragage. Plusieurs voies de traitement existent : thermique, biologique, physique, physico-chimique et chimique. [MAROT, 1997].

D'autres recherches et études s'intéressent aux méthodes de valorisation et à la réutilisation dans différents domaines :

- «Utilisation en grave routière [Ecole de Mines, DOUAI] »
- « Procédé de Solidification/Stabilisation [Boutouil, 1998] »
- « Utilisation dans l'agriculture et les manufactures [A.I.P.C.N.] »
- « Procédé de fabrication des briques »

### **1. Problématique :**

On distingue deux catégories de sédiments :

- La première catégorie est constituée des boues portuaires ; en général, les ports sont situés à proximité de sites urbains et de secteurs où règnent des activités industrielles. Ces boues sont souvent contaminées par des métaux lourds et/ou des composés organiques.
- La seconde catégorie de sédiments de dragage est constituée des boues de curage de canaux ou des boues résiduelles. Ces boues peuvent être fortement polluées, c'est le cas des boues du canal de la Haute Deûle dans la Région Nord-Pas de Calais, qui ont fait l'objet de plusieurs caractérisations [MAROT, 1997 ; Rapport : IFTS, 1995].

La démarche d'études des boues consiste à sélectionner les sédiments qui, de par leur nature et leur charge polluante, pourraient présenter des risques écologiques pour les écosystèmes côtiers.

Deux questions se posent :

- A partir de quelles teneurs en polluants, le matériau dragué est-il considéré comme contaminé ?
- A partir de quelle teneur mesurée, ce polluant présente-t-il un danger pour l'environnement ?

Ceci a conduit plusieurs pays à déterminer, pour les éléments métalliques et les substances les plus toxiques, des seuils ou valeurs guides permettant de caractériser les sédiments qui méritent une attention particulière.

En France, le Groupe d'Etude et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement (GEODE) a défini deux niveaux de référence permettant de juger de la toxicité des sédiments en cas d'immersion en mer. [GEODE, 1996].

→ Niveau 1 : valeur au-dessous de laquelle l'immersion peut être autorisée sans étude particulière, mais au-dessus de laquelle des études plus approfondies que la simple analyse physico-chimique doivent être entreprises.

→ Niveau 2 : valeur au-dessus de laquelle l'immersion est susceptible d'être interdite s'il n'est pas apporté la preuve qu'elle constitue la solution la moins préjudiciable pour l'environnement.

Entre ces deux niveaux, une étude plus approfondie pourrait être nécessaire.

Sans préjuger de l'inévitable augmentation des volumes à traiter, le simple effet des réglementations sur les décharges et les rejets en mer pèse déjà sur plus de 3 millions de tonnes de boues brutes.

## **2. Objectif:**

Notre objectif était d'effectuer une étude bibliographique relative à toutes les techniques de traitement et de valorisation et de proposer une démarche méthodologique pour évaluer les possibilités de décontamination des vases pollués par des métaux lourds et pour déterminer leur devenir après traitement. Pour atteindre ces objectifs, nous avons relevé les avantages et les inconvénients de chaque technique, afin de les comparer, en tenant compte de plusieurs critères: économique, environnemental, technique.

En particulier, nous avons traité les points suivants :

- Caractérisations physique-chimique, et mécanique de produits de dragage;
- Nature et niveau des éléments contaminants;
- Volume des sédiments;
- Faisabilité technique des différentes solutions et transferts;
- Propositions techniques du traitement;
- Impacts sur l'environnement;
- Aspects économiques;
- Aspects sociaux, politiques et réglementaires.

Il est important que les scénarios envisagés pour les opérations de dragage puissent satisfaire les objectifs suivants :

- a) Assurer que les interventions soient justifiées compte tenu du degré de contamination et de la vulnérabilité des ressources et des activités humaines du milieu ;
- b) Assurer l'efficacité et la durabilité de l'intervention à moyen et long termes ;

- c) Assurer que les risques liés à toutes les phases de travaux de restauration ne soient pas plus élevés que ceux associés à une non-intervention ;
- d) Prendre en compte les caractéristiques physico-chimiques des sédiments contaminés ;
- e) Prendre en compte les possibilités de recontamination du site.

### **3. Contraintes:**

Les contraintes de cette étude sont:

- la grande valeur du volume dragué au Port Autonome du Dunkerque (P.A.D.): 3,5 millions de m<sup>3</sup> in situ/an, parmi lesquels, on a:
  - \* 0,4 Mm<sup>3</sup> du sable propre.
  - \* 3,1 Mm<sup>3</sup> des vases (plus ou moins polluées).
- La diversité et le degré de toxicité des polluants trouvés (plus de 160 types).
- Les normes, les réglementations françaises et européennes issues des conventions et de nombreuses enquêtes, qui sont très strictes sur le sujet des boues de dragage.

### **4. Limites:**

La plus importante limite est due aux réponses insuffisantes des entreprises ou des personnes contactées pour transmettre des informations sur leurs travaux.

Une autre relève de la difficulté à comparer toutes les techniques de traitements aux boues de Dunkerque, en raison de la diversité des nombreuses zones étudiées et des polluants, en plus du manque de données nécessaires pour que cette application ait lieu.

# **PARTIE 2 :**

**CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU PORT AUTONOME DU DUNKERQUE.**

**CHAPITRE 2 : METHODES DE VALORISATION.**

**CHAPITRE 3 : LES PROPOSITIONS  
(ANALYSE MULTICRITERE – AIDE A LA DECISION).**

## CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU PORT AUTONOME DE DUNKERQUE

### 1. DEFINITION– SITUATION : P.A.D. :

Parmi les sites contaminés répertoriés dans le Rapport Scientifique : « Vers une évaluation plus performante de l'écotoxicité des boues de dragage » [DHAINAUT, 2001], le Port Autonome du Dunkerque a été choisi comme site d'étude.

Ce port s'étend sur 17 Km de rivage et dispose de deux grands sites :

- Le port Ouest (photo 1), directement relié à la mer, qui permet les escales rapides des porte-conteneurs et des navires rouliers, et l'accès des grands minéraliers et pétroliers d'un tirant d'eau de 20.50 m ;
- Le port Est (photo 2), qui est accessible aux navires de 14.20 m de tirant d'eau. Il reçoit les minéraliers, pétroliers et ainsi que les navires de marchandises générales.

Au total, plus de 60 navires peuvent être accueillis simultanément sur les 16 Km de quais et appontements du port.

Le port de Dunkerque s'est développé autour de différentes activités ; ainsi, ce sont successivement implantés sur le port un terminal aux aciers, des terminaux multivrac, des terminaux céréaliers, et un sidérurgique.

Ainsi, quelques grands noms de l'industrie mondiale sont présents dans la zone industrielle de Dunkerque. Ils se sont implantés sur des centaines d'hectares ; ils sont représentatifs de plusieurs types d'énergie et d'activités (charbon, électricité, gaz, pétrole,...), et sont amenés à rejeter leur déchets dans la mer. [P.A.D. 99,00,01,02].



**Photo 1 :Vue aérienne du port Ouest**



### 3. CARACTERISATION DES MATERIAUX :

Les résultats présentés dans ce rapport ont été analysés sous forme de tableaux donnant les paramètres nécessaires pour l'étude des sédiments et des polluants. Dans le cadre de ce chapitre, on s'intéresse aux résultats le plus récent. (datés de 1994 - 1999).

Nous présentons ici celles de la zone « Réparation Navale » sur lequel nous avons porté notre réflexion.

#### 3.1. caractérisation physique :

##### étude granulométrique :

La courbe granulométrique d'un échantillon de cette zone, est donnée ci-dessous (figure 1.2) :

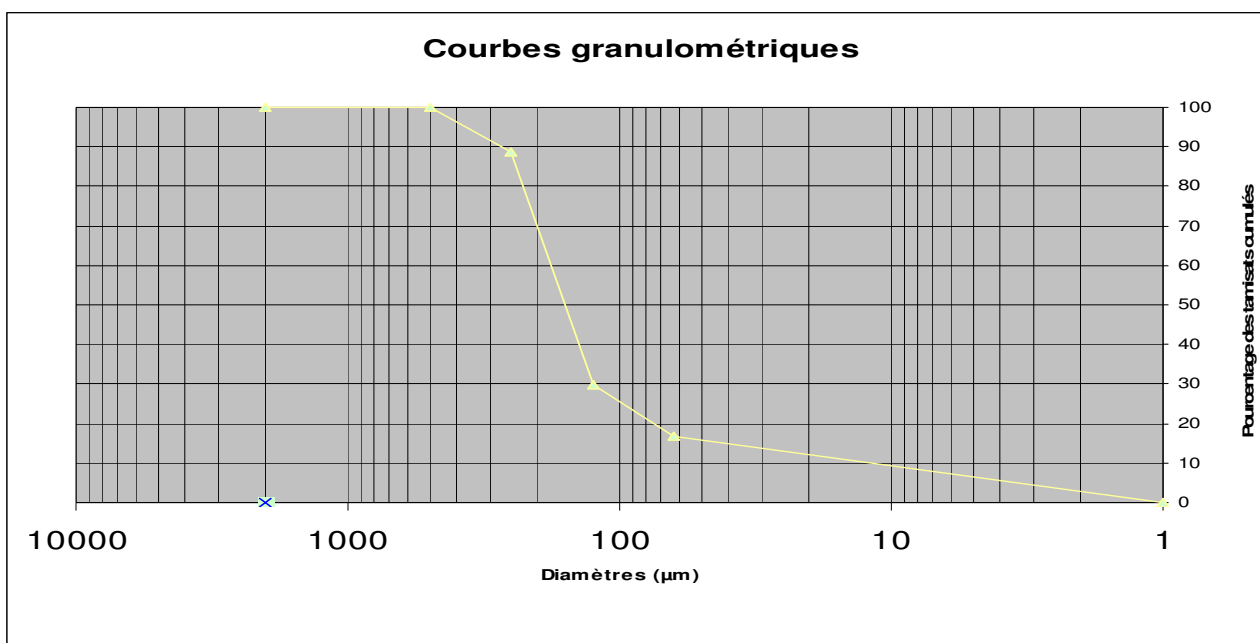


figure 1.2 : courbe granulométrique de l'échantillon étudié

Cette courbe illustre une granulométrie correspondant en grand pourcentage à celle du sable gros et fin et d'un faible pourcentage en limons. Cette distribution se distingue par une absence notable des argiles.

#### 3.2. caractérisation chimique :

Dans le chapitre deux, on a détaillé les caractérisations chimiques qui doivent être effectuées sur les boues de dragage pour les caractériser en vue d'une valorisation. Cependant, les résultats reçus ne sont pas suffisants pour conclure sur cet aspect. En outre, la conclusion retirée de l'absence d'argile : le phénomène de gonflement et la complexité des interactions sédiments/polluants n'auront pas lieu.

### 3.3. caractérisations des polluants :

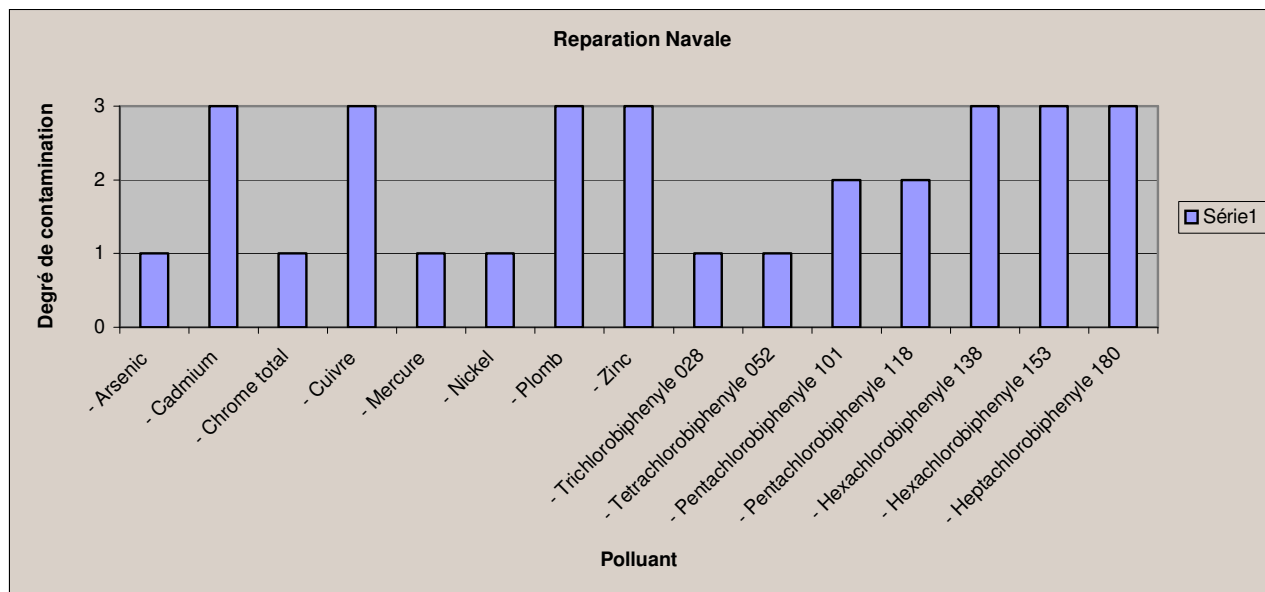
Plusieurs techniques existent, servent à analyser et déterminer les caractérisations et les types des polluants.

Nous présentons ci-contre les résultats des essais apportés qui ont été faits au « LABORATOIRE MUNICIPAL ET REGIONAL DE ROUEN » le 17 octobre 2000 (tableau et histogramme) :

Réparation Navale	Degré contamination
- Arsenic	1
- Cadmium	3
- Chrome total	1
- Cuivre	3
- Mercure	1
- Nickel	1
- Plomb	3
- Zinc	3
- Trichlorobiphenyle 028	1
- Tetrachlorobiphenyle 052	1
- Pentachlorobiphenyle 101	2
- Pentachlorobiphenyle 118	2
- Hexachlorobiphenyle 138	3
- Hexachlorobiphenyle 153	3
- Heptachlorobiphenyle 180	3

**Tableau 1.1: degré de contamination de la zone**

« réparation navale »



*figure 1 .3: histogramme de degré de contamination*

## **CHAPITRE 2 : METHODES DE VALORISATION**

### **A) VALORISATION PAR VOIE AGRICOLE, MANUFACTURE :**

#### **1. INTRODUCTION :**

Dans le monde entier, le dragage des ports, canaux, chenaux et autres lacs naturels et artificiels revêt une importance primordiale pour la vie des affaires autant que les activités de loisirs.

Le plus grand problème que pose le dragage est sans doute le sort à réserver aux produits dragués.

Les multiples études réalisées un peu partout dans le monde ont démontré l'innocuité de la majeure partie de ces produits, qui les rend aptes, parmi beaucoup d'autres, à des utilisations telles que le rechargement des plages, la protection des côtes, la constitution de terre végétale à usage agricole et l'amélioration de l'environnement. Ces produits constituent donc une ressource précieuse et ne devraient pas être considérés en terme de mise en dépôts.

Plusieurs centaines de millions de mètres cubes de produits sont dragués chaque année dans le monde. Ces produits de dragage constituent potentiellement une ressource des plus intéressantes.

Le présent chapitre s'attache à décrire divers modes de valorisation possibles de ce matériau ainsi qu'une procédure générale d'évaluation susceptible d'éclairer le choix du mode de valorisation le plus adéquat.

#### **2. INTERET DE LA VALORISATION :**

Souvent, en effet, une valorisation bien choisie confère à ces produits une incontestable valeur. Celle-ci est peut être mobilisée en fonction du choix de méthode, des options, des modes de valorisation ou bien à une certaine coordination entre toutes les parties concernées, y compris en particulier les utilisateurs potentiels de ces matériaux.

Donc ce projet, poursuit ouvertement l'objectif d'amener à coordonner les divers milieux concernés et à intégrer la valorisation dans leurs modes de pensées habituels et de promouvoir ainsi la valorisation des produits de dragage.

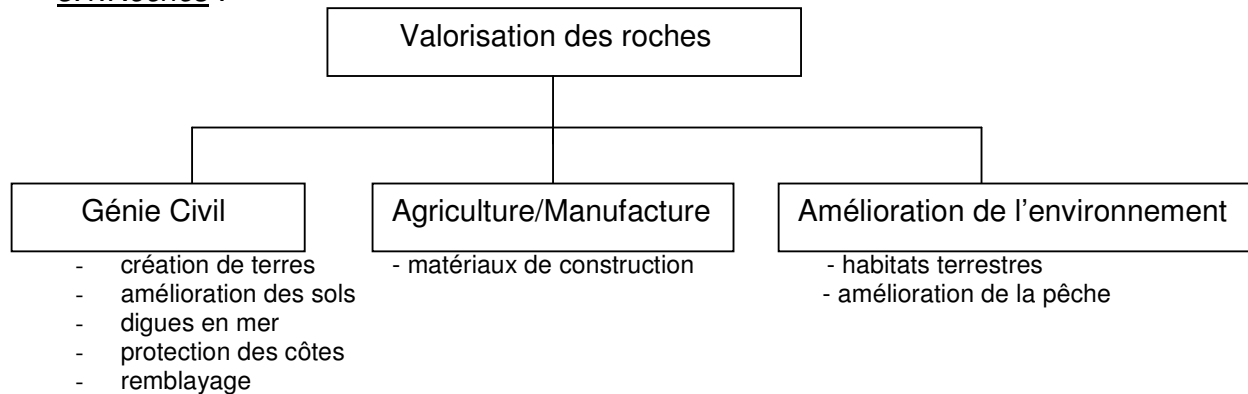
#### **3. OPTIONS DE VALORISATION :** [AIPCN : rapport du groupe de travail]

On a vu dans le chapitre 2 (synthèse bibliographique), la perspective et les étapes initiales par cette voie de valorisation.

Le choix d'une option de valorisation précise est, dans une large mesure, influencé par la structure et la granulométrie du matériau concerné.

Ces principales options peuvent être classées dans les catégories suivantes : Génie Civil, Agriculture et Intégration dans des produits, Amélioration de l'environnement.

### 3.1. Roches :



*figure 2.1 : valorisation de roches*

Les dimensions des roches draguées varient dans une large mesure en fonction de la nature et du matériel de dragage utilisée.

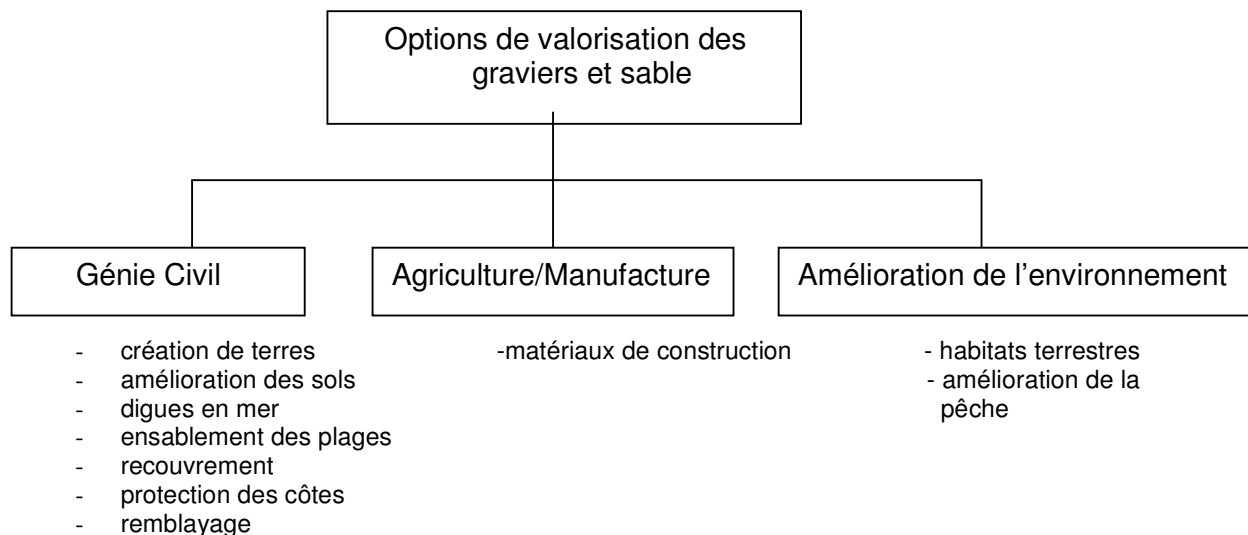
La roche, qu'elle soit obtenue par explosion, désagrégation mécanique ou arrachage, est rarement constituée d'un seul type de matériau .

La roche constitue un matériau de construction appréciable, en dépit des variations de sa granulométrie (voir essai : courbes granulométriques) induites par les techniques de dragage utilisées. Certaines applications peuvent en exiger un tri et, éventuellement, une fragmentation, encore que les blocs de dimensions importantes puissent s'avérer intéressants pour la constitution de récifs de pêche.

L'utilisation économique des roches est fonction de leurs quantités et de leurs dimensions.

En termes généraux, les roches trouvent leurs utilisations les plus efficaces dans la construction d'ouvrages de remblayage sous-marin et d'assises des voies de circulation terrestres et en tant que composantes d'ouvrages en béton. Les roches draguées sont généralement exemptes de contamination.

### 3.2. Gravier et sable :



*figure 2.2 : valorisation de gravier et sable*

Le gravier et le sable extraits des chantiers de dragage sont généralement considérés comme les produits les plus intéressants, dans la mesure où, comme la

roche, ils sont généralement exempts de contamination et donc réutilisables à de multiples fins.

On notera parmi celles-ci, sans aucun traitement, le remblayage. Toutefois, leur intégration dans des ouvrages en béton nécessite qu'ils soient triés et lavés à l'eau douce s'ils proviennent d'un environnement d'eau saline ou saumâtre. Les matériaux granulaires sont également affectés, de manière non exclusive, à des fins de rechargement des plages, d'aménagement de parcs, d'espaces littoraux ou d'îles de nidification, ou encore de restauration de zones marécageuses.

### 3.3. Argile compactée :

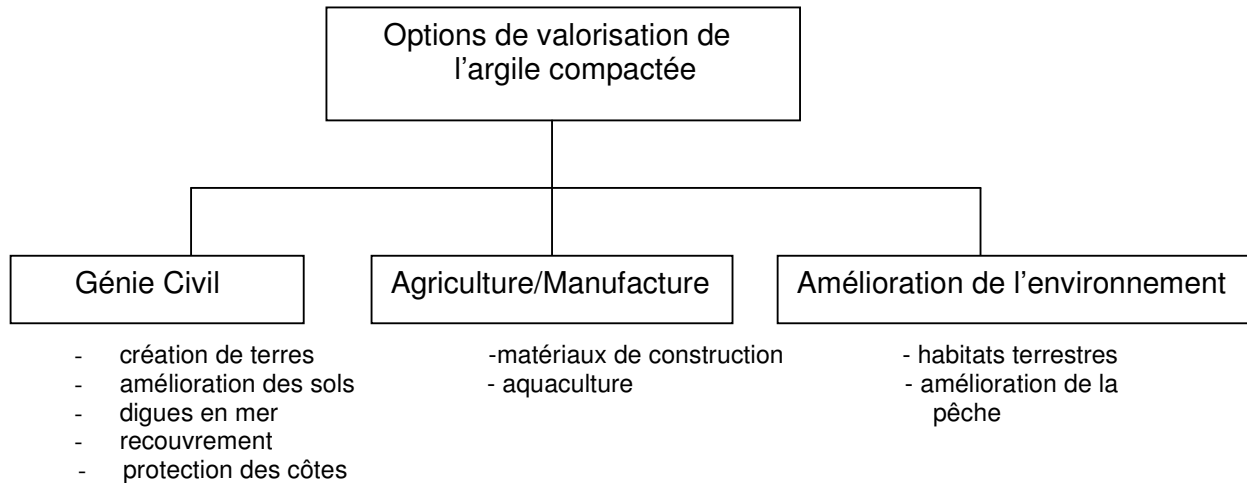


figure 2.3 : valorisation de l'argile compactée

Produit du dragage de travaux neufs, l'argile compactée est généralement exempte de contamination. Elle peut être peu consistante ou, au contraire, très consistante. En fonction de ce degré de consistance autant que de l'équipement de dragage utilisé, elle sort de processus de dragage sous forme de bloc ou, à l'opposé, d'un mélange homogène d'eau et d'argile. Lorsque la teneur en eau est élevée, l'argile draguée peut devoir être asséchée avant transport.

L'argile compactée trouve des débouchés dans les matériaux de construction tels que les briques ou la céramique ainsi que dans la construction de digues et de talus de berge.

### 3.4. Vase/Argile peu consistante :

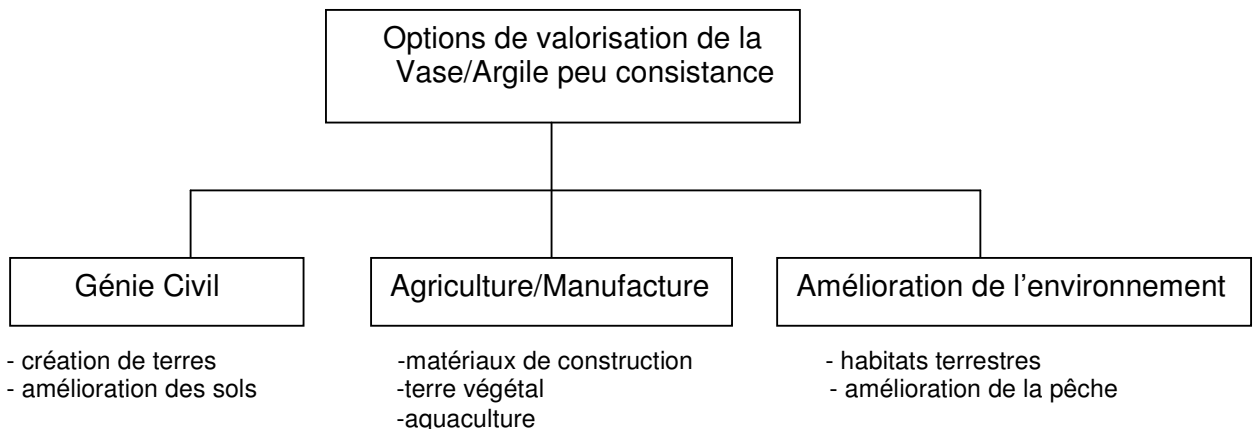


figure 2.4 : valorisation de la vase/argile

La vase et l'argile peu consistante sont les matériaux les plus courants générés par le dragage d'entretien des voies fluviales, canaux et ports. Ce matériau est particulièrement adéquat à des fins agricoles et de toute forme de développement de zones d'habitat naturel. La fertilité universelle des sols riverains des rivières et fleuves illustre parfaitement ces utilisations potentielles. Pour être utilisées comme matériaux de construction, cependant, la vase et l'argile peu consistante doivent être asséchées, en raison de leur teneur élevée en eau. Ce processus d'assèchement exige quelquefois des mois, voire des années et, selon le processus de drainage utilisé, leur mise en dépôt provisoire peut s'avérer nécessaire. Lorsqu'elles sont reconnues adéquates, la vase et l'argile peu consistante constituent des matériaux idéaux de recouvrement de sol et de développement de réserves naturelles. Certaines réglementations et législations nationales acceptent l'utilisation de la vase et de l'argile légèrement contaminées dans des produits ou elles sont contenues, telles que briques, tuiles et céramiques, ainsi que dans certains ouvrages de génie civil.

### 3.5. Mélange roche/sable/vase/argile peu consistante :

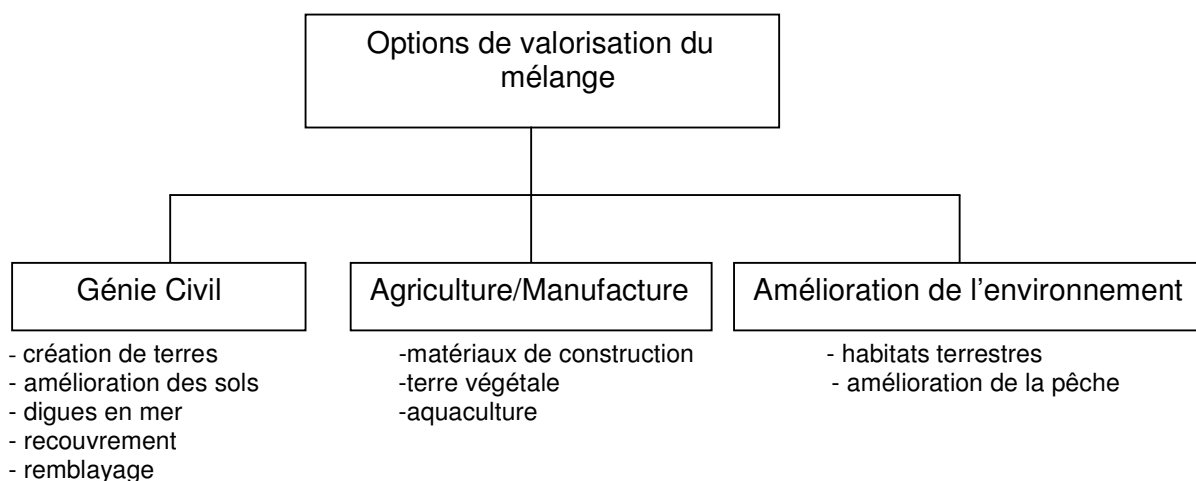


figure 2.5 : valorisation du mélange

L'objet du dragage de travaux neufs se présente généralement sous forme de couches résultant de certains processus hydrauliques passés. Si ces couches sont suffisamment profondes, les différents matériaux qui les constituent peuvent faire l'objet d'un dragage et d'un traitement distincts. Ainsi, dans le cas d'une couche épaisse de tourbe déposée sur une autre couche d'argile, il est possible d'enlever successivement les deux matériaux et de les transporter séparément vers des endroits différents. On se souviendra cependant que cette approche peut exiger le recours à des méthodes de dragage elles aussi différentes.

Le produit du dragage d'entretien, quant à lui, se présente généralement sous la forme d'un mélange de matériaux divers qui peut inclure des blocs, des blocs d'argile, du gravier, des matériaux organiques et des coquillages de densités variables ; en fonction de leur degré d'adéquation, ces matériaux mixtes se prêtent à une large gamme de modes de valorisation allant du remblayage au dépôt d'une couche de terre végétale en passant par l'amélioration des sols. Si leur intégration dans des travaux publics ou des produits finaux est quelque peu limitée par leur nature hétérogène, leur traitement, notamment par hydrocyclone, est cependant susceptible de la rendre possible.

#### **4. MODES DE VALORISATION :**

Le paragraphe précédent nous a résumé les trois catégories de valorisation : Génie Civil, Agriculture et Intégration dans des produits, Amélioration de l'environnement.

Certains types de valorisation appartiennent à plus d'une de ces catégories ;

Par exemple : le rechargement des plages, classé ici dans la catégorie « génie civil », constitue également à améliorer l'environnement.

Ces divers types de valorisation mentionnés, font l'objet d'un commentaire détaillé par la suite.

##### **4.1. Génie Civil :**

Les produits de dragage peuvent entrer dans des ouvrages de génie civil à finalité commerciale, industrielle ou publique.

Au niveau régionale, ce type de valorisation contribue à résoudre la manque en matériau de construction.

En outre, au niveau environnement, en réduisant le besoin de transport, on aura : réduction de la consommation de combustibles, des émissions de gaz d'échappement, du bruit, de l'intensité du trafic, et de nécessité d'entretien routier.

L'intégration des produits de dragage à des travaux de construction se réalise généralement dans la zone côtière ou limitrophe de la voie fluviale concernée, encore que les produits de dragage puissent parfaitement être transportés à l'intérieur des terres, le cas échéant.

De manière générale, également, les matériaux de granulométrie élevée, tels que le sable et le gravier, se prêtent mieux à ce type de valorisation que les produits plus fins tels que la vase et l'argile.

La gamme des utilisations potentielles des produits de dragage dans le domaine de la construction est extrêmement diversifiée, n'étant limitée que par l'imagination du responsable de la conception.

On trouvera ci-dessous la description de quelques-unes des applications les plus communes :

##### **→ Création de terrains :**

Dans le cadre de la mise en valeur de terrains, les produits de dragage peuvent être utilisés à des fins de remblayage, de rehaussement et de protection d'une zone qui, en l'absence de ces travaux, serait immergée de manière périodique ou permanente.

Dans le cas de ports ou d'ouvrages portuaires, la paroi côté mer de l'ouvrage de protection doit quelquefois être verticale. Ceci peut être obtenu par diverses méthodes, parmi lesquelles les palplanches métalliques à emboîtement, les agglomérés en béton ou les ouvrages en caisson.

Les produits du dragage d'entretien consistent généralement en vase ou sable, alors que les produits du dragage d'investissement peuvent revêtir pratiquement toutes les formes possibles ou un assortiment de celle-ci. Il est parfois possible de séparer les produits à faible granulométrie des produits à granulométrie plus élevée et d'affecter les deux matériaux ainsi obtenus à des fins différentes.

A Copenhague, au Danemark, un entrepreneur de dragage d'investissement décida, de sa propre initiative, de prendre en charge les coûts supplémentaires de remblaiement de terrains plutôt que de déposer les produits de dragage en mer. Une fois les travaux terminés, et les terrains remblayés aménagés, cet entrepreneur put tirer profit de la commercialisation de ces terrains.

L'utilisation de produits de dragage dans le cadre d'opérations de création de terrains se heurte fréquemment aux contraintes de temps ou de disponibilité des produits adéquats. Ces contraintes peuvent être levées par une planification à long terme programmant l'aménagement territorial sur une période longue, même sans affectation spécifique au départ. En certains endroits, ce sont les législations en matière de protection de l'environnement qui limitent les possibilités de mise en valeur de terrains.

→ Amélioration des sols :

Lorsque les terrains sont de qualité insuffisante ou lorsqu'ils sont situés à des niveaux trop faibles pour échapper aux inondations périodiques, il peut s'avérer utile de remédier à ces situations.

Il existe des méthodes bien établies d'amélioration des sols par de matériaux fins tels que vases et argiles en provenance de dragage d'entretien. Les sites de réception est généralement partagé en plusieurs zones, permettant une opération tournante de remblayage jusqu'à une hauteur limitée. Ceci permet d'optimiser l'assèchement par drainage et par évaporation. Le site de réception peut également être retravaillé de manière systématique au moyen d'engins agricoles ou de terrassement légers. Cette opération accélère encore l'assèchement des matériaux concernés. Enfin, une évacuation adéquate de l'eau de surface peut être obtenue par incorporation de produits de granulométrie plus élevée à la couche supérieure de matériaux fins. Une fois le remblayage terminé, un processus sélectif de plantation permet généralement d'accroître encore la qualité du sol.

→ Plages :

Si aucun phénomène naturel ne contribue à remplacer le matériau enlevé des plages, une opération de rechargement peut s'avérer nécessaire. Ce sera l'occasion d'améliorer le profil de la plage en vue d'atténuer l'impact des vagues sur la côte et d'améliorer ainsi la protection côtière.

La durée de vie d'un projet d'ensablement des plages est par définition limitée : dix ans constituent une norme courante en la matière, encore qu'une durée de vie longue puisse être acceptée, notamment lorsque le coût du produit de rechargement est faible.

→ Digues sous-marines :

Il est possible de modifier localement l'action des vagues sur le littoral en vue d'améliorer la stabilité des plages par constitution des digues sous-marines adéquatement localisées et utilisant des produits de dragage.

Ces digues sous-marines absorbent une partie de l'énergie des lames qui s'approchent de la plage de manière à en atténuer l'impact sur celle-ci.

Les digues étant généralement immergées, elles peuvent être pratiquement et exclusivement constituées par dépôt des produits de dragage sur le fond au moyen de barges. Elles sont souvent soumises à une érosion et à une dispersion progressive de leurs matériaux constitutifs.

Quant au processus d'érosion, lorsqu'il existe, il est fonction de la hauteur d'eau au-dessus de la digue et des conditions locales de houle. Lorsque le coût supérieur de la construction d'une digue par rapport à d'autres possibilités de dépôts est faible, la durée de vie de la digue ne revêt qu'une importance mineure, surtout lorsqu'elle est construite au moyen de matériaux fournis de manière permanente et à faible coût par le dragage d'entretien.

→ Recouvrement de matériaux :

Lorsqu'il est nécessaire d'isoler des matériaux de leur environnement sous-marin, il est possible de recourir à l'opération dite de recouvrement, qui consiste à déposer une couche stable de matériaux propres sur le matériau à isoler.

Le sable, l'argile et les matériaux mixtes se prêtent à cette application. Pour des opérations de recouvrement à terre, par contre, le matériau choisi est généralement l'argile.

→ Protection des côtes :

Dans cet option, on notera l'utilisation des produits de dragage dans la construction de digues de défense contre la mer, soit par constitution de leur noyau au moyen de sable refoulé, soit par incorporation d'argile provenant directement d'un chantier de dragage.

→ Remblayage :

Ce mode de valorisation est le plus envisageable, en raison des caractéristiques physiques des boues supérieures à celles du sol (voir différentes caractéristiques : partie 1).

Un exemple classique en est la substitution de sols de faible résistance par du sable provenant de chantiers de construction de tunnels, ponts, voies navigables et ports.

Si les matériaux de faible granulométrie et donc de faible résistance ne se prêtent pas aux opérations de remblai de la majorité des projets de génie civil, ils trouvent parfaitement leur place dans d'autres types d'applications tels que l'aménagement de zones vertes ou de parcs. Sur les chantiers de remblayage industriels, les sols constitués de tourbe et d'argile sont généralement enlevés et remplacés par du sable ou d'autres matériaux granulaires permettant d'obtenir la force portante exigée par les bâtiments et ouvrages envisagés. Voici quelques exemples de tels remblais de substitution :

- Remblai des vides laissés dans le paysage par les carrières de graviers ou d'argile.
- Enlèvement des terres meubles et réhabilitation de la zone par de sable de dragage.
- Substitution de matériaux propres à des terres contaminées.
- Enlèvement de tourbes ou d'argiles meubles et remblai au moyen de sable en vue d'obtenir un sol suffisamment résistant pour supporter des soutènements, tunnels, routes et voies ferroviaires.
- Remblai de canaux et docks désaffectés et remise en valeur des terrains concernés.

*4.2. Applications agricoles et intégration dans des produits :*

Cette catégorie de mode de valorisation va de la mise en place de terres végétales à des fins agricoles à l'aquaculture dans les zones de dépôt de produit de dragage en passant par la fabrication de matériaux de construction à partir de produits de dragage.

→ Terres végétales agricoles :

Généralement, les produits de dragage produits par les ports, chenaux d'accès et voies fluviales, sont des mélanges de sable, d'argile et de matières organiques. Ces matériaux adéquats peuvent être déposés en une fine couche, directement par pompage.

Le processus d'évaporation et d'assèchement peut être accéléré et amélioré par dépôt de couches successives de produits de dragage d'une épaisseur comprise entre 0.5 et 1 mètre.

Une fois asséchés, les produits de dragage peuvent alors être transportés et déversés par moyen mécanique en fines couches sur la zone à recouvrir.

La meilleure terre végétale est constituée de sable, de vase, d'argile et de matières organiques. Seuls les matériaux propres entreront dans la production d'aliments. Dans les autres applications, le degré de contamination admis sera fonction du type de culture et de l'utilisation finale du produit.

Les produits de dragage peuvent encore être affectés au recouvrement de terres peu fertiles. Notamment pour le recouvrement de sites de dépôt de déchets urbains ou industriels.

La valorisation des produits de dragage sous forme de terre végétale est encore fonction de la localisation du site de dragage, du site de réutilisation et de la disponibilité d'espaces suffisants pour recevoir provisoirement les produits en vue de leur assèchement. Enfin, la confrontation du coût total de l'opération de valorisation, d'une part, et de la valeur commerciale des matériaux recyclés, d'autre part, constitue bien entendu un autre facteur critique.

#### → Aquaculture :

L'aquaculture d'espèces littorales telles que crevettes, moules et saumon constitue une activité économique en croissance internationale rapide.

Les zones de dépôt des produits de dragage sont compatibles avec les activités d'aquaculture dans la mesure où la faune aquatique vivant dans de tels endroits est capable de suivre, de se développer et d'atteindre la taille et la qualité qui en permettent la commercialisation.

Quant à la compatibilité concrète entre les activités de gestion de la mise en place des produits de dragage et d'exploitation de l'aquaculture, elle peut s'obtenir via deux grandes techniques :

- partition des zones de dépôt de produits de dragage en compartiments ou cellules multiples à usage séquentiel et rotation des activités d'aquaculture d'une cellule à l'autre.
- Alternance des périodes d'aquaculture et de mise en dépôt périodique de produits de dragage d'entretien dans le cadre d'une zone de dépôt non compartimentée.

#### → Matériaux de construction :

Certains produits de dragage sont utilisables en tant que matériaux de construction. Très souvent, les produits de dragage consistent en un mélange de sable et de fractions argileuses qui doivent être séparés sur le site de dépôt ou par recours à des équipements tels que les hydrocyclones. Dans certains cas, leur teneur particulièrement élevée en eau exige en outre un assèchement préalable.

Des produits de dragage tels que le sable et le gravier peuvent entrer dans la composition du béton, éventuellement après tamisage pour obtenir le calibrage souhaité.

Si la salinité n'est pas trop élevée, la fraction sablonneuse des produits de dragage peut être utilisée comme produit de remblai ou comme composant de solutions bitumineuses ou de mortier.

Lorsque leur teneur en sable n'excède pas 30% et pourvu que les essais adéquats le permettent, les produits de dragage peuvent constituer une matière première pour la fabrication de briques.

Les produits de dragage peuvent encore constituer une matière première en vue de la production d'enrochements ou de blocs destinés à la protection de digues ou de berges contre l'érosion ; dans le cas de briques, on les retrouve également dans des produits en céramique tels que tuiles, argile expansé d'isolation, éléments de remblais ou agrégats légers.

#### 4.3. Amélioration de l'environnement :

En ce domaine, le problème de l'obtention et du maintien de l'accord du public, des privés et des politiques sur le projet s'avère plus aigu que les considérations d'ordre technique, qui sont quant à elles relativement bien connues et simples. La mise en place des matériaux doit fournir un dépôt suffisamment stable, situé à une altitude adaptée à l'accueil des espèces animales et végétales visées, et sur un sous-sol compatible et suffisamment riche en éléments nutritifs.

Il convient également d'étudier la meilleure méthode d'introduction initiale de la végétation et la mise en place d'un programme de gestion à long terme.

Un suivi régulier sur le terrain doit enfin permettre de s'assurer du succès de l'opération et orienter les décisions de gestion.

#### → Reconstitution et création de zones humides :

Depuis un certain temps, les produits de dragage sont utilisés à grande échelle dans la régénération et la constitution de zones humides. Par exemple, en Amérique du nord, plus de 16000 Ha de tels terrains ont à ce jour été restitués ou constitués à partir de produits de dragage.

Il est souvent plus réaliste de reconstituer, à partir de ces produits, des zones humides préalablement existantes que d'en créer de nouvelles à partir de rien.

La création d'une nouvelle zone marécageuse exige l'introduction sur le site des propriétés hydriques du sol et des conditions hydrologiques adéquates autant que de la végétation future. Les données disponibles ne permettent pas de prévoir le temps nécessaire pour que le sol se dote de caractéristiques hydriques après saturation : dans l'état actuel des connaissances, une quinzaine d'années semble constituer une période minimale. En outre, la mise en place d'une hydrologie marécageuse peut être compliquée, soit par absence d'ouvrages de régulation permanente des niveaux d'eau (tels que barrages avec déversoir), soit par manque d'alimentation locale suffisante en eau pour préserver le caractère marécageux de la zone.

#### → Habitats à l'intérieur des terres et îles de nidification :

En divers endroits du monde, les produits de dragage ont, de manière délibérée ou non, été à la base de la constitution d'îles de nidification d'oiseaux ou de gibiers d'eau. Cette application implique que de nombreuses contraintes techniques soient réunies sur l'île, et notamment tout ou partie des caractéristiques suivantes :

- Rivage en pente douce (naturelle ou artificielle) ;
- Disponibilité suffisante de tout ce qui est nécessaire à la construction des nids et à l'alimentation des jeunes ;
- Accès aux berges ou à la côte ;
- Végétation adéquate ou absence de végétation, en fonction des besoins de nidification de l'espèce considérée ;

- Isolement – ou au moins limitation d'accès – évitant une pression excessive de la présence humaine en cours de nidification.

→ Accroissement du potentiel de pêche et digues en mer :

L'amélioration du potentiel de pêche peut revêtir de nombreuses formes, parmi lesquelles on soulignera la stimulation des fonctions écologiques de l'habitat des zones de pêche par mise en place judicieuse de produits de dragage.

## **5. CONCLUSION :**

Cette voie de valorisation des boues est la plus répandue, et est surtout pratiquée par les Etats du nord de l'Europe (Suède, Danemark, Grande-Bretagne, Grèce..) et la France.

Chaque Etat membre a aussi ses propres exigences en matière de valorisation agricole, de mise en décharge ....

Cependant, l'[OTV, 1997] note que l'épandage en agriculture est, certes, un moyen de valorisation des boues, mais sa fonction première est de réaliser une fertilisation contrôlée des sols.

La pérennité de la valorisation des boues en agriculture nécessite que l'épandage soit réalisé dans des conditions techniques irréprochables :

- transformation de la boue en un véritable produit organique fertilisant ;
- maîtrise parfaite des nuisances olfactives ;
- garanties d'innocuité ;
- encadrement rigoureux avec totale transparence des contrôles.



*épandage des boues en agriculture*

## **B) VALORISATION DANS LES GRAVES ROUTIERE :**

### **Première partie : Introduction – Identification**

#### 1. Introduction :

Les ports disposent annuellement d'une quantité considérable de sable de dragage extrait pour éviter les ensablements.

La présente étude a pour objectif la valorisation de ce sable dans la cadre d'une grave routière, si possible à base de sable uniquement.

#### 2. Objectif :

L'[A.I.P.C.N., 1984] dans son rapport « CLASSIFICATION DES SOLS ET DES ROCHES A DRAGUER » ; insiste sur la recommandation d'une approche internationale d'identification, et de classification des sols et des roches à draguer.

L'attention doit être attirée sur le fait que, pour se faire une idée de l'équipement le mieux adapté aux dragages et aux excavations sous l'eau et pour évaluer leur rendement, il est absolument nécessaire de connaître la nature, l'emplacement et les quantités de matériaux à draguer.

Ceci requiert un système uniformisé de classification, particulièrement au niveau international, pour éviter tout malentendu.

Cependant, d'un point de vue scientifique, il est impossible d'énumérer tous les facteurs qui pourraient fournir une connaissance suffisante de la composition d'un matériau géologique en vue d'opération de dragage ou de déblai.

#### 3. Description :

- le tableau 1 donne une classification générale des sols fondée sur deux propriétés essentielles : la taille des grains et leur résistance.
- Le tableau 2 et 3 indiquent les tests permettant de déterminer approximativement les propriétés des sols concernés par les opérations de dragage.
- Le tableau 4 montre les essais permettant d'obtenir des informations plus détaillées sur les roches.

#### 4. Utilisation des normes nationales :

Les normes fréquentées dans cette synthèse sont : les normes britanniques (B.S.) ou américaines (A.S.T.M.). il est important lorsqu'on s'intéresse à la classification des sols, et des roches, et aux campagnes de mesures sur le site que l'utilisation de Norme Nationale appropriée soit signalée.

Par exemple, d'autres références excellentes existent, comme la norme DIN de la république Fédérale d'Allemagne. Dans une certaine mesure, l'utilisation d'une norme particulière n'a pas d'importance à la condition expresse qu'elle fasse l'objet d'une publication pertinente et référencée, facilement compréhensible.

En outre, il est important que des documents délicats pour des travaux de dragage fassent référence à la norme utilisée dans les campagnes de reconnaissance ou dans l'étude de faisabilité.

## 5. Commentaires généraux :

Pratiquement, le sol n'est pas compatible et ne correspondra pas précisément à un seul des grands types prédéterminés.

Les tableaux suivants nous décrivent les types et les combinaisons des sols.

Chaque description doit comporter quelques indications telles que les caractéristiques suivantes :

- a) structure (résistance à la pénétration, compacité),
- b) pour les sols granuleux : répartition quantitative des tailles de grain, présentée de préférence sous forme d'une courbe granulométrique, indication descriptive de la taille des grain,
- c) pour les sols cohésifs : résistance au cisaillement,
- d) odeur et couleur,
- e) pour les tourbes, le degré de décomposition devra être précisé.

En outre, pour les sols composés, les caractéristiques majeures doivent être données en fonction de la prédominante du sol.

Des descriptions claires doivent être données, telles que :

- Argile rigide, fissurée, grise ;
- Graviers fins moyens, lâches, jaunes, arrondis et sables grossiers contenant des coquillages ;
- Limon mou, gris-bleu, sablonneux ;
- Tourbe molle, noire, argileuse, fibreuse, à odeur forte ;
- Sable fin brun, à grains arrondis, peu aggloméré ;
- Sable grossier, anguleux, compacté, mélangé à des graviers épais et irréguliers ;
- Argile dure, brune, contenant sable et graviers.

Pour les sols fins, ils peuvent être souvent classés suivant leurs propriétés plastiques à partir de la relation entre la limite de plasticité et la limite de liquidité.

Par exemple, « d'après Casagrande », on peut utiliser une célèbre charte de plasticité où les sols minéraux et organiques se situent d'une part et d'autre d'une ligne limite «la ligne A » ; (au-dessus de laquelle les sols sont plutôt des limons et au-dessus sont des argiles). Pour plus de détails on peut se référer au normes britanniques 5930 « Mesures in situ (1981) ».

## 6. Tableaux : (P.A. : pas applicable)

6.1. tableau 1 bases générales pour l'identification et la classification des sols a draguer .

Principaux types de sols	Identification de la dimension des grains Echelle des dimensions (mm)	Identification	Aspects des grains et plasticité	Résistance au cisaillement et structure
Blocs Cailloux	>200 mm 200 à 60 mm	Examen et calibrage visuels (3)	Forme des grains : Arrondi irrégulier anguleux feuilleté allongé  Texture : Rugueux, lisse, poli	P.A.
Graviers	Gros 2 à 20 mm Moyens 20 à 6 mm Fins 6 à 2 mm	Facilement identifiable par examen visuel		Possibilité de trouver des couches de graviers cimentés qui ont l'aspect d'une roche faiblement aggloméré. Des graviers très compacts peuvent se trouver mêlés à du sable
Sable (4)	Gros 2 à 0.6 mm Moyens 0.6 à 0.2 mm Fins 0.2 à 0.06 mm	Tous les grains visibles à l'œil nu. Très faible cohésion lorsque le sol est sec.		La compacité des dépôts peut varier : les sables peuvent être lâches, compacts ou cimentés. La structure peut être homogène ou stratifiée. Le mélange avec des limons ou des argiles peut produire des sables très compacts.
Limons (4)	Gros 0.06 à 0.02 mm Moyens 0.02 à 0.006 mm Fins 0.006 à 0.002 mm	D'habitude les grains sont invisibles. Seuls des grains grossiers de limon sont encore visibles à l'œil nu. L'essai de dilatance (1) permet la meilleure détermination possible. Le limon peut être pétrissable, mais séché, il tombe des doigts lorsqu'on secoue les mains ; une simple pression des doigts pulvérise les notes séchées.	Non-plastique ou peu plastique	En majeure partie non plastique : les caractéristiques peuvent être identiques à celles du sable, si la matière est principalement grossière ou sablonneuse. Le limon plus fin se rapproche de l'argile et a des caractéristiques plastiques. Très souvent mêlé ou traversé de sable fin ou d'argile. Il se présente de façon homogène ou en couches. La consistance du limon peut varier allant de la vase liquide au limon ayant la consistance d'une pierre en passant par le limon dur.

Argiles	Au-dessus de 0.002 la distinction entre les limons et les argiles ne devrait pas se faire uniquement d'après la dimension des	Les argiles ont une cohésion et une plasticité importantes mais ne réagissent pas au test des secousses. Un échantillon humide	plasticité moyenne (argile pauvre)  Haute	Résistance au cisaillement(2)  * très molles : peuvent être facilement comprimées entre les doigts < 20 KN/m <sup>2</sup> * Molles : peuvent être facilement pétries avec les
---------	---	--	---	--

	grains puisque les propriétés physiques les plus importantes des limons et des argiles n'ont qu'un rapport indirect avec la dimension des grains.	colle au doigts et au toucher paraît lisse et onctueux. Les fragments secs ne se réduisent pas en poudre mais au cours du séchage ils se contractent et se fissurent en acquérant une haute résistance au cisaillement.	plasticité (argile grasse)	doigts. 20 – 40 KN/m <sup>2</sup> * Fermes : requièrent une forte pression pour être pétries avec les doigts. 40 – 75 KN/m <sup>2</sup> * Tenace : ne peuvent être pétries avec les doigts mais le pouce peut y marquer son empreinte. 75 – 150 KN/m <sup>2</sup> * Dures : compactes, peuvent difficilement être marquées par l'ongle du ponce. >150 KN/m <sup>2</sup> . La structure peut être fissurée, intacte, homogène stratifiée ou altérée.
Tourbes et terres organiques	variée	Peuvent être généralement identifiées par leur couleur noire ou brune et souvent par forte odeur et par la présence de matières fibreuses ou ligneuses.		Peuvent être de nature ferme ou spongieuse. La résistance au cisaillement peut varier considérablement suivant les directions verticales ou horizontales.

- (1) La dilatance est la propriété présentée par le limon en réaction à des secousses. Se un échantillon humide est placé dans la main et secoué, l'eau apparaîtra sur la surface de l'échantillon lui donnant un aspect brillant. L'argile plastique n'a pas cette réaction.
- (2) Définie comme la résistance au cisaillement, non drainée, constaté à partir d'essai in situ ou de laboratoire.
- (3) Bien qu'un examen et un calibrage visuels soient suffisants, une indication doit être donnée concernant la taille des grains telle que le pourcentage des différentes tailles.
- (4) « Sable » et « Limons » sont des terminologies précisant une taille de particules. Les sables ne se limitent pas nécessairement aux quartz mais peuvent inclure des sables calcaires, des minerais de fer, etc. de plus, le mot « limons » indique une taille de grain, non une consistance. Néanmoins les dénominations de consistance telles que « limons frais de ports, boues », etc., ne doivent pas être utilisées.

6.2. tableau 2 : classification des sols à draguer par des essais in situ et en laboratoire.

Principaux types de sol	Granulométrie	Forme des grains	Densité in situ ou spécifique apparente	Compacité (in situ)	Teneur en eau	Indice de plasticité et de liquidité	Résistance au cisaillement	Teneur en matières organiques
Blocs cailloux (2)	Examen visuel sur place	Examen visuel	P.A.	P.A.	P.A.	P.A.	P.A.	P.A.
Graviers	Essai en labo	Essai en labo	P.A.	Essai in situ	P.A.	P.A.	Essai en labo (3)	P.A.
Sables	Essai en labo	Essai en labo	Essai en labo sur des échantillons non remaniés (4)	Essai in situ	Essai en labo	P.A.	Essai en labo	Essai en labo
Limons (5)	Essai en labo	Essai en labo	Essai en labo sur des échantillons non remaniés	Essai in situ ou en labo sur des échantillons non remaniés	Essai en labo (6)	Essai en labo	Essai en labo	Essai en labo
Argiles	Essai en labo (7)	P.A.	Essai en labo sur des échantillons non remaniés	Essai in situ ou en labo sur des échantillons non remaniés	Essai en labo (6)	Essai en labo	P.A.	Essai en labo
Tourbes et terres organiques	P.A.	P.A.	Essai en labo sur des échantillons non remaniés	Essai en labo sur des échantillons non remaniés	Essai en labo	Essai en labo	P.A.	Essai en labo

- (1) Pour les méthodes d'essai, voir le tableau 3.
- (2) Testés comme des roches.
- (3) Applicable aux agrégats dragués à des fins de construction.
- (4) La détermination de la densité sèche maximale et minimale est aussi recommandée.
- (5) Les limons contiennent souvent une quantité appréciable de particules d'argile qui ont une forte influence sur les caractéristiques du sol. Dans ce cas, les essais pour les limons et pour les argiles doivent être réalisés.
- (6) Les essais doivent être effectués sur des échantillons ayant conservé les caractéristiques du terrain en place, de préférence des échantillons non remaniés.
- (7) Il peut être utile de séparer la fraction sableuse et limoneuse de l'échantillon d'argile, mais aussi d'exprimer les pourcentages relatifs à l'échantillon entier.
- (8) Les essais devraient comporter la sensibilité déterminée sur des échantillons représentatifs.

6.3. tableau 3 : mode d'exécution des essais in situ et en laboratoire .

<b>Propriétés et caractéristiques des sols</b>	<b>Essai in situ</b>	<b>Essai en laboratoire (labo des chantiers ou centrales)</b>
Granulométrie	P.A.	Tamisage pour les sols granuleux. Sédimentométrie pour les sols doués de cohésion. Combinaison des deux essais pour les sols composites tels que les argiles sableuses.
Forme des grains	P.A.	Comparaison avec des échantillons standards et des photographies.
Densité in situ ou spécif. apparente	Néant sauf pour le calibrage des blocs et des cailloux.	Poids unitaire du sol trouvé in situ exprimé sous forme de rapport entre le poids unitaire des particules solides et celui de l'eau.
Poids spécif. des particules solides	P.A.	P.S. défini comme le rapport entre le poids unitaire des particules solides et celui de l'eau
Compacité (in situ)	Il existe plusieurs essais in situ : <ul style="list-style-type: none"> <li>• standard penetration test</li> <li>• pénétromètre Hollandais</li> <li>• autres pénétromètres fondés sur les méthodes d'essais standardisés.</li> </ul>	P.A.
Teneur en eau	Méthode de mesure radioactive	Détermination de la teneur en eau
Indice de plasticité	P.A.	Détermination des limites de liquidité et de plasticité
Résistance au cisaillement	Plusieurs essais in situ peuvent être faits : <ul style="list-style-type: none"> <li>• pénétromètre à main</li> <li>• scissomètre</li> <li>• pénétromètre Hollandais</li> <li>• autres pénétromètres fondés sur les méthodes d'essais standardisés.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pénétromètre manuel</li> <li>• appareil de compression uniaxiale</li> <li>• compression triaxiale</li> <li>• appareil a cellule</li> </ul>
Teneur en matières organiques	P.A.	Détermination de la teneur en matières organiques.

6.4. tableau 4 : méthodes d'essai en laboratoire et in situ des roches à draguer

<b>Nom de l'essai</b>	<b>But de l'essai</b>	<b>Remarques</b>	<b>Lab. (L) Ou in situ (S)</b>
Examen visuel	Evaluation de la masse rocheuse	Indique l'état de la masse rocheuse in situ (1)	S ou L
Densité apparente	Rapport volume/poids	Essai humide et sec	L
porosité	Mesure des vides traduit en pourcentage des	Peut être calculé directement à partir de la densité humide et sèche	L

	vides sur le volume total		
Teneur en carbonate	Mesure de la teneur en CaCO <sub>3</sub>	Utile pour l'identification des calcaires, des craies, etc.	L
Compression uniaxiale	Résistance ultime sous contrainte uniaxiale	Essai devant être fait sur des échantillons complètement saturés. Les dimensions de l'éprouvette et le sens de stratification relatives à la direction de compression doivent être consignés, il est recommandé de prendre 1/2 pour le rapport longueur sur diamètre des échantillons cylindriques.	L
Essai de rupture brésilien	Résistance à la traction (dérivée de l'essai uniaxial)	Idem, excepté la recommandation sur le rapport longueur/diamètre	L
Essai de poinçonnement	Indication de résistance	Essai facile et rapide mais doit être allié à un essai de résistance à la compression uniaxiale	L
Standard penetration test	Indication de résistance	Application aux coraux et aux roches fortement altérées	S
Vitesse sismique	Indication de stratigraphie et de fracturation de la masse rocheuse	Utile pour extrapoler les essais en laboratoire et sur le terrain au comportement de la masse rocheuse	S
Vitesse ultrason	Vitesse longitudinale	Essai sur des carottes saturées	L
Module statique d'Elasticité	Rapport contrainte/effort	Donne une indication de la fragibilité	L
Possibilité de perforation	Evaluation de la masse rocheuse	Mesure des paramètres de forage y compris la vitesse de pénétration, pression d'alimentation en fluide, etc. et consignation de la technique et des spécification de forage.	S
angularité	Détermination de la forme des grains	Peut être une comparaison par examen visuel avec des spécimens	L

(1) des photographies en couleur peuvent être utiles à un dossier.

## **Deuxième partie : Application P.A.D.**

A la demande de Mr. Grégoire, responsable du service entretien des infrastructures et dragages au Port Autonome de Dunkerque, le laboratoire de Génie Civil de l'école des Mines de Douai a procédé à l'étude d'une grave à base de sable de dragage du port proprement dit.

Ce projet se scindera sur les points suivants :

- Identification des constituants, qui sont : le sable, ciment et des matériaux correcteurs (généralement le sable du Boulonnais).
- Recherche des performances mécaniques des différents mélanges : l'objectif de cette phase est de mesurer les déformations sous charge selon la norme NF P 98-114-2.

Les matériels utilisés sont des éprouvettes de diamètre de 16 cm, hauteur 32, avec une zone centrale réduite de manière à ce que la rupture se produise dans cette partie de l'éprouvette instrumentée.

Des séries des essais ont été faits sur des mélanges à 7 et 10% de ciment, 21% de sable correcteur ont été confectionnées et testées à 28 jours en traction directe.

- Choix et validation de la forme.
- Commentaires.

### **1. Identification des constituants :**

#### 1.1. Sable :

Le sable retenu est celui déposé à la capitainerie ouest. Il a été prélevé au cours du mois d'octobre 1997. Ses caractéristiques sont les suivantes :

* masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.41
* masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.62
* équivalent de sable visuel	93.8
* valeur au bleu de méthylène (pour 100g)	0.1
* module de finesse	0.9
* test d'alcali réaction (essai microbar)	non réactif

composite chimique et minéralogique (% massique) :

CO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	TiO <sub>2</sub>	Total
5.0	79.9	8.7	2.2	0.8	0.8	0.6	0.7	0.2	0.02	0.06	99

Calcite	Quartz	Total		CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alcalins (Na <sub>2</sub> O+ K <sub>2</sub> O)	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Total
11.4	79.9	91.3	Reste	2.3	2.2	1.4	0.8	0.7	99

Un test de lixiviation a été effectué sur le sable par le département Chimie Environnement de l'Ecole des mines ; il fait l'objet du rapport d'analyse 97280 CE en date du 11/12/1997. les conditions opératoires et les résultats de ce test sont repris ci-après :

### 1.1.1. Mode opératoire :

Le test de lixiviation a été effectué sur l'échantillon non séché, suivant la norme X 31 – 210.

La mise en contact de 100 grammes d'échantillon avec 1 litre d'eau a été effectuée à l'aide d'un agitateur va-et-vient, à une vitesse de 60 oscillation/minute.

La séparation échantillon résiduel lixivié a été réalisée par centrifugation suivie d'une filtration à 0.45µm.

### 1.1.2. Résultats – analyse quantitative de l'échantillon et des lixiviats :

	Test de lixiviation			Critères d'acceptation d'un déchet ultime en centre de stockage
	1 <sup>ère</sup> extraction de 16 heures	2 <sup>ème</sup> extraction de 16 heures	3 <sup>ème</sup> extraction de 16 heures	
	mg/Kg de matière sèche	mg/Kg de matière sèche	mg/Kg de matière sèche	
COT	90	20	30	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	770	<10	<10	
Cr	<0.2	<0.2	<0.2	<5 mg/Kg
As	0.02	0.03	<0.02	<10 mg/Kg
Cd	<0.1	0.1	<0.1	<25 mg/Kg
Hg	<0.01	<0.01	<0.01	<5 mg/Kg
Pb	<2	<2	<2	<50 mg/Kg

Tableau 2.5 : résultat du test de lixiviation

La courbe granulométrique de ce sable figure ci-après (sable prélevé en mars 1997) :

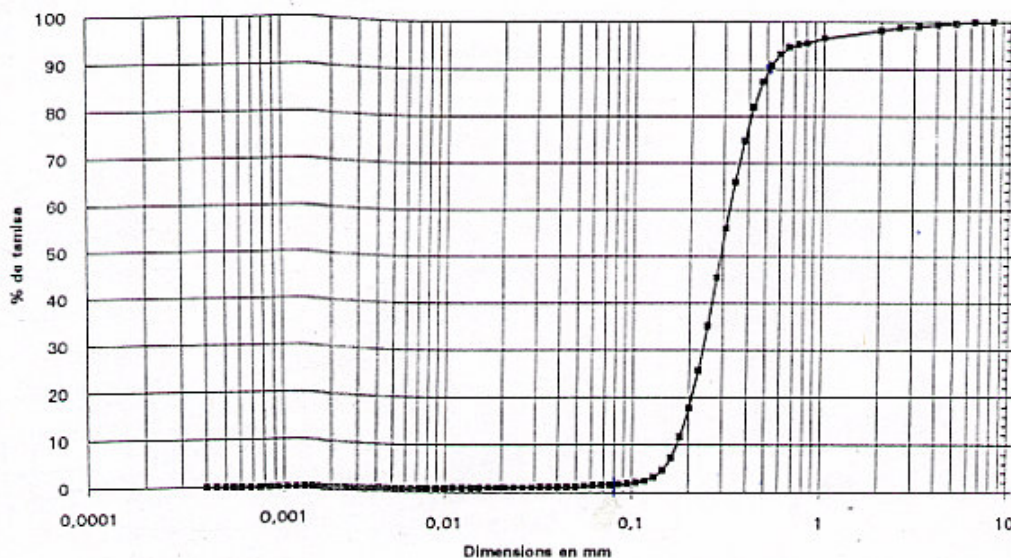


figure2.6 : courbe granulométrique du sable utilisé

Avec 2% d'éléments inférieurs à 0.08 mm et 90% inférieurs à 0.5 mm, ce sable peut être classé d'un point de vue granulaire comme un sable fin (F). Sa faible valeur de bleu, permet de la classer en sable propre (PR1) au sens de la norme NF P 98-113.

La teneur en eau de ce sable sur stock était de 5.5% à l'époque du prélèvement.

### 1.2. ciment :

Le choix du type de ciment était en fonction du délai de maniabilité des graves ; pour cela, le ciment CLK CEM III/C 32.5 PMES (à prise lente) a été considéré pour cette étude.

Ses caractéristiques mécaniques à 28 jours sont les suivantes :

- Résistance à la traction par flexion : 9.1 Mpa
- Résistance à la compression : 34.3 Mpa

### 1.3. Matériaux correcteurs :

Les essais proctor effectués sur le sable de dragage seul, nous ont donnés une insuffisance notable en densité sèche et en indice portant immédiat (I.P.I.).

- Densité sèche (gamma d) : 1.63 t/m<sup>3</sup> à l'optimum de 15% d'eau,
- I.P.I. maximum : 3.

C'est pourquoi des appels à différents correcteurs granulométriques ont été faits, dont le sable des carrières du Boulonnais. Il s'agit d'un sable concassé 0/4 mm, chargé de 11.4 % de filler calcaire, la masse volumique réelle est de 2.69 ; son module de finesse de 3.3.

D'un point de vue classification selon la granularité, ce sable peut être appelé sable de carrière grossier, riche en fines. Sa valeur de bleu permet de le classer en sable propre PR1.

Des tentatives d'ajout de fillers tels que cendres volantes, fillers calcaires...n'ayant pas amélioré de façon notable la portance du matériau, leur caractérisation n'a pas été entreprise.

## **2. Recherche des performances mécaniques des différents mélanges :**

Les essais sont déjà d'une grande complexité pour des graves constituées de gravillons de 20 mm ; dans le cas de cette grave à base de sable, la rupture des éprouvettes en traction s'est majoritairement produite près des casques de tirages.

### 2.1. Formule 72/21/7 (sable de dragage/sable 0/4 Boulonnais/ ciment CLK 32.5) :

Les valeurs caractéristiques de cette formulation sont les suivantes :

Rt à 360 jours MPa	Module à 360 jours Mpa
0.7	12600
0.68	14700
0.76	11800

Le positionnement de ces points sur l'abaque relatif aux graves à base de sable situe le matériau en classe S2 :

**Classement des sables traités aux liants hydrauliques (S.T.L.H.)  
suivant les performances mécaniques à 360 j  
NFP 98-113**

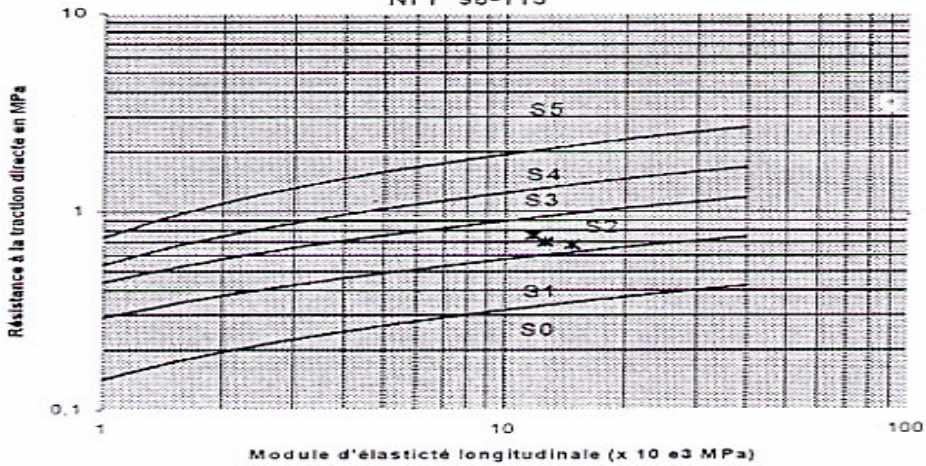


figure 2.7 : classement des sables traités aux liants hydrauliques

2.2. Formule 70/20/10 (sable de dragage/sable 0/4 Boulonnais/ciment CLK 32.5) :  
De la même manière, la formulation à 10% de ciment donne les caractéristiques ci-après permettant une classification en classe S3 :

Rt à 360 jours MPa	Module à 360 jours Mpa
1.13	21200
1.06	19700
1.24	22900

**Classement des graves-ciments suivant les performances mécaniques à 360 j**

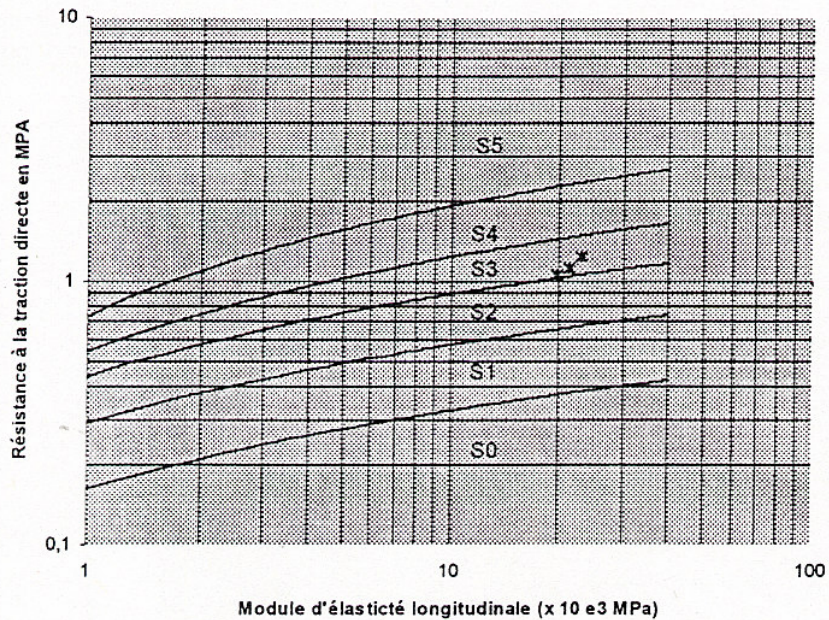


figure 2.8 : classement des graves-ciments à 360 Mpa

### **3. Choix et validation de la formule :**

Les indications de la norme NF P 98-113 précisent les dosages en liants selon leur nature applicables aux graves à base de sable. Pour les liants hydrauliques, le dosage généralement préconisé est compris entre 3.5 et 8%. Pour des raisons d'ordre économique, nous pensons qu'un dosage de 7% de ciment correspondant à la classe de résistance S2 devrait être suffisant ; la situation des valeurs de la formulation de référence au centre de la classe S2 n'impose pas, avant étude de l'influence des paramètres, d'adopter un dosage de 8%. Quant au dosage à 10% de ciment, on sait qu'il permet d'atteindre la classe de résistance S3, mais d'un double point de vue économie et sensibilité à la fissuration, il est sans doute préférable de majorer l'épaisseur de la couche de fondation de cette grave plutôt que d'augmenter son dosage en ciment.

Pour valider une formulation de grave routière, l'étude complète comprend une détermination de la sensibilité des performances mécaniques aux dispersions des paramètres constitutifs suivants :

- masse volumique apparente,
- teneur en liant,
- teneur en eau de compactage.

Cependant, on avait récupéré un nouveau échantillon du sable de dragage (en mois d'octobre 1998). Des nouveaux tests ont eu lieu : on a remarqué que la densité sèche et la mesure d'I .P.I. est beaucoup plus faible qu'avec l'ancien sable ; la grave descend d'une classe (S1 au lieu de S2).

Il fallait donc compenser ce changement par des proportions de sable du Boulonnais. Les éventails de ces essais (tableaux et figures) sont présentés dans l'annexe).

### **4. Commentaires :**

Les commentaires notés sur ce projet que pour certains moulages des difficultés à obtenir la bonne compacité en laboratoire sur la machine de vibrocompression (consommation :2 m<sup>3</sup> d'air par minute avec chute importante de pression à la fin du moulage) en raison du foisonnement des sables humides en particulier lorsqu'ils sont fins. Sur chantier, on devrait obtenir de meilleurs résultats à condition de choisir les matériels de mise en œuvre adaptés.

Par ailleurs, l'essai de traction directe avec mesure du module d'élasticité sur éprouvettes de graves 16\*32 cm est très délicat à mettre en œuvre et, a fortiori, sur une grave uniquement constituée de sable (rupture des éprouvettes près des casques de traction, rupture hors de la zone centrale de l'éprouvette...).

Malgré ces difficultés, les résultats significatifs montrent une tendance à rester dans un parallélogramme qui ne déborde pas de la classe visée (S2).

Une seconde validation pourrait être entreprise en utilisant un ciment de meilleure qualité (on pourrait se situer vers 42 Mpa), et des éprouvettes de 10\*20 cm.

## **C) VALORISATION EN SOLIDIFICATION/STABILISATION :**

### **1. INTRODUCTION :**

Les différents procédés de traitement des boues de dragage visent à améliorer sa manutention, son transport, son stockage et à réduire le degré de contamination et la surface active par laquelle le transfert des contaminants peut se faire, ceci afin de bien exploiter ces matériaux.

Parmi les techniques de traitements disponibles, on peut citer le traitement par immobilisation qui est basé sur deux technologies : la solidification et la stabilisation qui impliquent respectivement :

- un processus pour convertir une substance liquide ou semi-solide en une substance solide par l'ajout d'agents de solidification tels le ciment, les silicates, les pouzzolanes et d'autres minéraux.
- un processus chimique qui altère la forme chimique des contaminants par association avec divers agents chimiques tels les polymères.

D'après [USEPA, 1991b] dans [Environnement Canada] ; la figure suivante présente les intrants et les extrants des procédés d'immobilisation.

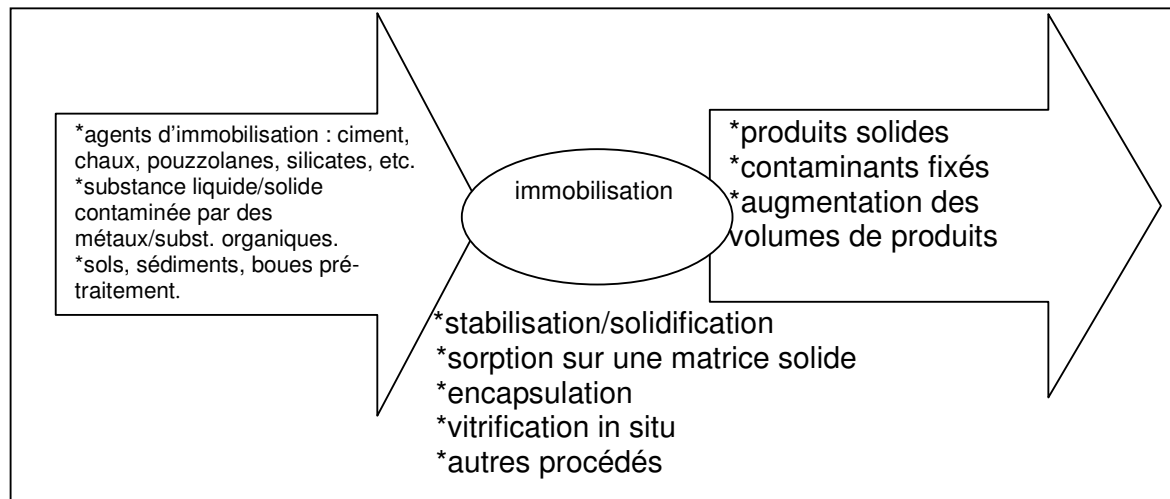


figure 2.9 : intrants et extrants des procédés d'immobilisation

### **2. OBJECTIFS :**

L'étude expérimentale de ce procédé commence par la mise au point d'une méthodologie expérimentale appliquée au traitement des vases par le ciment. L'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques des vases de dragage par solidification est ensuite examinée en fonction de plusieurs facteurs : teneurs en eau initiales, type de ciment, dosage en ciment, condition et durées de stockage. La résistance à la compression associée à des mesures de porosité, de vitesse des ultrasons et des teneurs en eau après solidification, constituent les indicateurs de performances des vases solidifiés.

### **3. TECHNOLOGIES DISPONIBLES :**

Les processus S/S incluent un large éventail de liants : ciment, chaux, polymère, avec l'ajout d'additifs tels que : cendres volantes, laitiers...

Néanmoins le ciment reste le liant le plus utilisé dans la technique de solidification/stabilisation comme l'indique la figure ci-contre, ces procédés comportent généralement les étapes suivantes :

1. prétraitement des sédiments pour enlever les gros objets ;
2. lavage et enlèvement ou concassage des gros objets et ajout des sédiments.  
Si le lavage est réalisé, une unité de traitement des eaux peut être requise ;
3. mélange des sols contaminés avec des produits chimiques, à base de ciment, de pouzzolanes ou autres additifs et de l'eau.
4. dépôts du mélange dans des moules pour solidification ;
5. élimination des produits résultants dans des décharges contrôlées ou des cellules de confinement approuvées [INTERA KENTING, 1990]

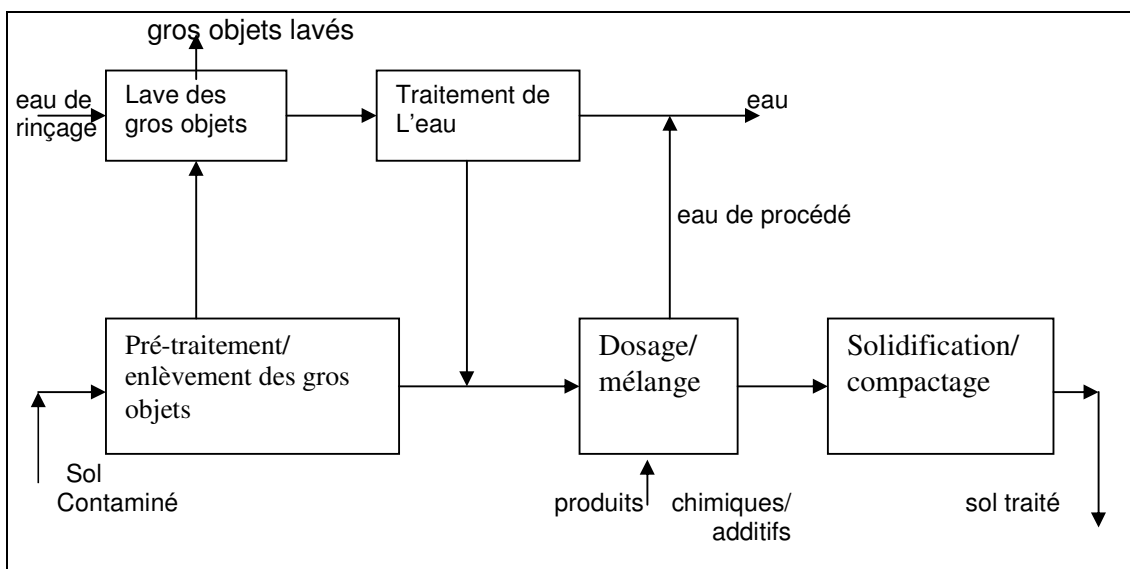


Figure 2.10 : schéma de principe des procédés de stabilisation/solidification

### 3.1. La S/S à base de ciments portland :

Grâce à la capacité d'hydratation des constituants du ciment, une pâte se forme issue d'un mélange de ciment anhydre, d'eau et d'autres additifs comme agents d'immobilisation pour les sols contaminés (l'eau pourrait être l'eau de gâchage issue du produit à traiter).

Les hydrates formés se précipitent en prenant une forme mécaniquement résistante. Cependant, ces caractéristiques mécaniques sont améliorées en présence de produits pouzzolaniques (cendres volantes ou volcaniques) qui réagissent avec l'hydroxyde de calcium libre.

Les procédés à base de ciment réduisent la mobilité des métaux lourds, convertissant ces derniers en hydroxydes insolubles ou en carbonates en raison du pH élevé du ciment.

Des sorbants et autres additifs tels les silicates solubles, des argiles, des émulsifiants, du charbon, des zéolites et de la chaux sont souvent mélangés avec du ciment pour améliorer la performance du traitement [AVERETT *et al.*, 1990] dans [Centre ST. Laurent, 1993].

L'utilisation du ciment portland comme liant principal dans les procédés de solidification/stabilisation a de nombreux avantages : [DIET, 1996 ; THEVENIN, 1996]

- La bonne connaissance des mécanismes d'hydratation et de prise grâce à son utilisation dans le Génie Civil et aux nombreuses recherches dont il a fait l'objet,
- La constance de sa composition ainsi que sa disponibilité,
- Son comportement : le ciment hydraté présente une bonne résistance face aux diverses agressions et une bonne durabilité, il est également sans grand danger ni pour l'homme ni pour l'environnement,
- Sa capacité d'absorption d'eau (la masse d'eau nécessaire à l'hydratation complète du clinker est égale à 42 % de la masse totale ajoutée) : ce phénomène est intéressant notamment pour les produits à fortes teneurs en eau, ce qui est le cas de la vase à traiter,
- La matrice alcaline obtenue assure une faible solubilité de la majorité des métaux lourds et grâce à sa faible perméabilité, elle limite la lixiviation des contaminants vers le milieu environnant.

La figure suivante illustre les principes du procédé : [Centre ST. Laurent, 1993]

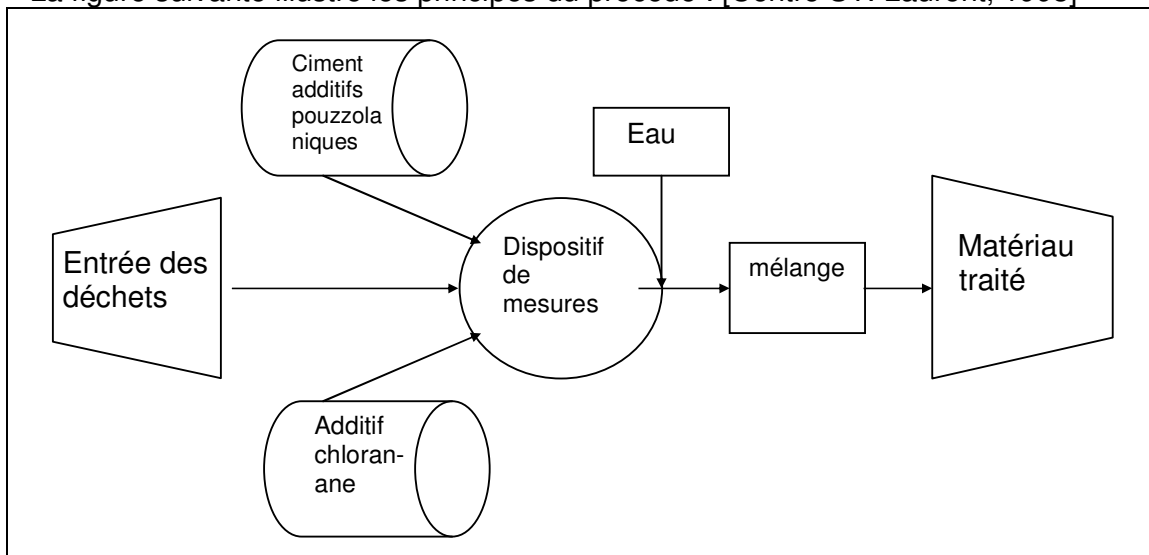


Figure 2.11: schéma de principe simplifié des procédés de stabilisation/solidification à base de ciment portland

Ce procédé est un des procédés de stabilisation/solidification qui présentent le plus de possibilités et il est facilement adaptable pour retenir très efficacement les contaminants dans un produit d'une grande durabilité. [AVERETT *et al.*, 1990]

### 3.2. La S/S à la chaux :

Avec les procédés à base de pouzzolanes, une masse solide s'est produite, les matrices contaminées sont mélangées avec de la chaux hydratée. Les pouzzolanes contiennent toutes de l'acide silicique et fréquemment de l'oxyde d'aluminium. Les substances habituellement utilisées sont les cendres volantes et les cendres de charbon bitumineux ou de charbon subbitumineux.

Le procédé est moins rigoureux mais produit une matrice moins durable et plus facile à lixivier, comparativement aux procédés de solidification/stabilisation à base de ciments. [AVERETT *et al.*, 1990] dans (Centre ST. Laurent, 1993).

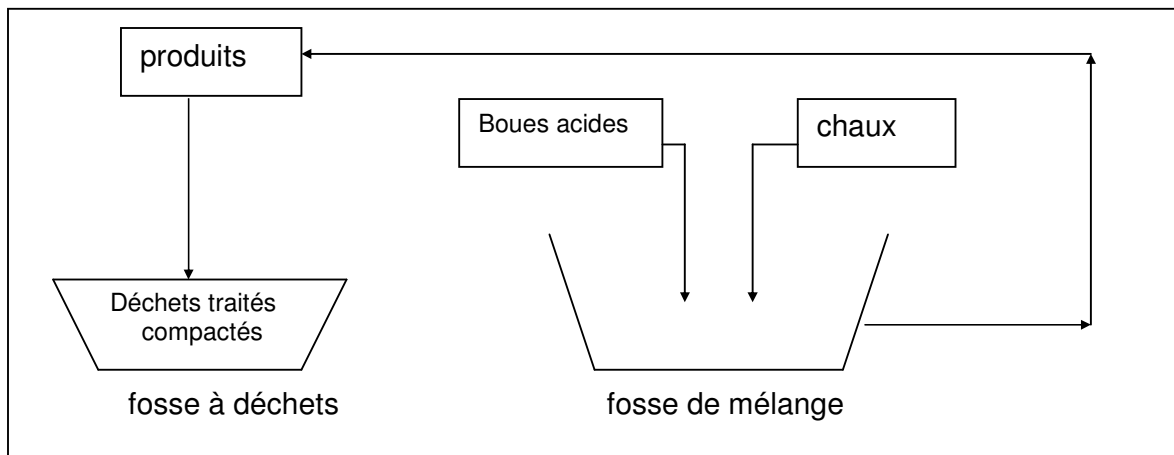


figure 2.12 .schéma de principe simplifié des procédés de stabilisation/solidification à la chaux

L'intérêt de la chaux est double: d'une part, comme c'est le cas dans le traitement des sols, diminuer la teneur en eau des produits traités, et d'autre part, fournir de l'hydroxyde de chaux afin d'activer les pouzzolanes éventuellement ajoutées ou présentes dans les produits à traiter.

### 3.3. Les mécanismes de fixation des métaux lourds :

Deux voies sont associées dans cette technique : physique et chimique.

3.3.1. Par voie physique : Appelée aussi « encapsulation » ou « enfermement », ce mécanisme peut se produire à l'échelle micro et macroscopique. Une molécule déchet est enfermée (à l'échelle micro) quand elle est piégée dans un réseau cristallin et polymérisé sans être liée chimiquement [TSENG, 1998].

La qualité de l'immobilisation physique dépend donc de l'intégrité structurelle du produit final, qui est liée à la résistance mécanique, la perméabilité et la durabilité. [BOUTOUIL, 1998].

La S/S par voie physique peut s'effectuer selon plusieurs procédés :

- Encapsulation thermoplastique : cette technologie est un procédé de S/S en lots où de l'asphalte bitumineux, de la paraffine ou du polyéthylène sont injectés dans un déchet chauffé et asséché pour former une matrice solide et stable qui devient rigide mais déformable.

Dans ce procédé, les contaminants sont physiquement incorporés dans des matériaux thermoplastiques mais sans être liés chimiquement. [INTERA KENTING, 1990] dans [Environnement Canada, 1993].

- Encapsulation aux chlorananes : ce procédé consiste à injecter le ciment, l'eau et les chlorananes (additifs) dans les boues contaminés, par des composés organiques, des métaux lourds, des huiles ou des graisses.

Ces additifs servent à encapsuler les contaminants organiques pour prévenir les interférences avec les procédés de solidification.[Environnement Canada ; 1993].

- Macro-encapsulation : [INTERA KENTING, 1990 ; AVERETT et al., 1990] résumant ce procédé par le fait de déposer les matériaux contaminés dans des enceintes munies d'un revêtement imperméable, par exemple, des barils spéciaux (en polyéthylène ou garnis de polyéthylène) avec couvercle soudé ou

fusionné avec le baril pour former un contenant qui isole complètement les déchets de l'environnement.

Bien que la macro-encapsulation soit certainement l'un des procédés les plus efficaces de solidification, cette solution est forcément peu pratique pour de grands volumes de déchets ou de matrices à traiter, ce qui est souvent le cas avec les sédiments contaminés.

### 3.3.2 Par voie chimique :

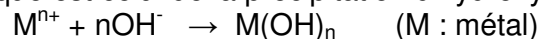
Les matériaux ne réagissent pas chimiquement avec les milieux extérieurs, ils sont liés à l'intérieur du réseau cristallin. [TSENG, 1988]

L'action neutralisante vis-à-vis des acides due à la réserve alcaline importante est aussi un phénomène connu.

Les trois phases des réactions chimiques entre les hydrates de ciment et les métaux lourds sont : [BOUCHELAGHEM *et al.* ;1998]

- *La précipitation :*

Dans le cas des métaux lourds sous forme de cation, le mécanisme de stabilisation le plus souvent évoqué est celui de la précipitation d'hydroxydes :

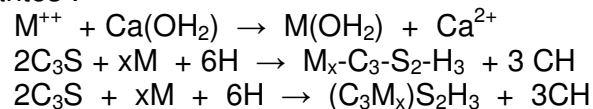


Les ions  $OH^-$  sont apportés par la réserve alcaline des liants hydrauliques. La solubilité de ces hydroxydes est dépendante du pH. (figure ci-contre)

Certains hydroxydes de métaux sont susceptibles de se redissoudre quand le pH devient supérieur à une certaine valeur.

C'est le cas notamment du plomb, qui pour des valeurs de  $pH > 12$ , peut repasser en solution sous forme de plumbate.

Les métaux lourds cationiques peuvent aussi se substituer au calcium lors de la formation des CSH. Ils sont alors intégrés aux constituants de la matrice. Selon les équations suivantes :



- *L'adsorption:*

Grâce à sa microstructure très fine et ses surfaces actives, le ciment hydraté constitue un support pour l'adsorption des produits précipités.

- *La complexation :*

Les aluminates de calcium provenant de l'hydratation des liants hydrauliques forment de nombreux sels complexes très peu solubles. Les plus connus sont ceux obtenus à partir des sulfates : le trisulfoaluminate de calcium (étringite) et le monosulfoaluminate de calcium.

Ces phases sont très intéressantes car elles se forment rapidement et mobilisent une grande quantité d'eau. Mais leur grand intérêt pour la stabilisation réside dans le fait que des composés complexes analogues peuvent se former avec d'autres anions que les sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) : chlorures, carbonates, chromates, nitrates.

La capacité d'immobilisation des métaux lourds dépend fortement de leurs propriétés chimiques (valence, forme de l'élément, solubilité...) et du milieu dans lequel ils sont stabilisés, ainsi, que le pH joue un rôle dans la solubilisation ou l'insolubilisation des métaux lourds.

[CAMAS *et coll.*;1994], illustrent dans la figure suivante la variation de la solubilisation de certains métaux lourds en fonction du pH.

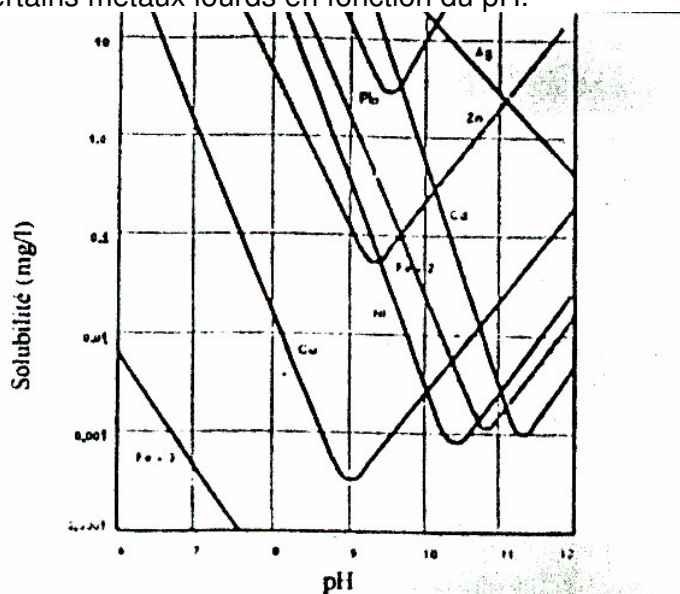


figure 2.13 :courbes de variation de la solubilité de certains métaux lourds en fonction du pH. [CAPMAS *et coll.*, 1994]

### 3.4. Mise au point et évolution du procédé :

Le choix des agents de stabilisation et des liants hydrauliques et la mise au point d'une formulation adaptée à un déchet obéit à quelques grands principes généraux qui peuvent être déclinés selon les problématiques rencontrées : [BOUCHELAGHEM *et al.* ;1998]

- Déchets à fraction soluble importante,
- Déchets à forte teneur en organiques,
- Déchets contenant des micro polluants organiques : phénols et autres aromatiques, HAP,...
- Déchets contenant des métaux lourds : plomb, zinc, cadmium, chrome, mercure,...
- Déchets contenant du chrome VI,
- Déchets contenant de l'arsenic,
- Déchets contenant des cyanures.

Pour chacune de ces problématiques, une section existe, basée, soit sur le rôle particulier des liants hydrauliques décrit plus haut, soit sur le choix d'agents de stabilisation spécifiques. Plusieurs de ces problématiques sont généralement couplées au sein d'un même déchet. Pour aboutir à une solution satisfaisante, il faut donc adapter la formulation au déchet.

L'évaluation des déchets stabilisés et solidifiés est basée sur des essais de tenue mécanique et des tests de lixiviation. Ces tests diffèrent selon les pays, en fonction de la réglementation en vigueur.

Après plusieurs ajustements successifs, le travail de laboratoire aboutit à des formulations optimisées en fonction du déchet et des contraintes réglementaires à respecter.

Cette possibilité d'adaptation à la nature du déchet est une des forces du procédé car elle permet d'optimiser économiquement et techniquement le traitement d'un déchet. Elle nécessite d'exploiter constamment l'acquis pratique sur les déchets déjà étudiés, tout en menant une recherche fondamentale sur la compréhension des mécanismes et l'utilisation de nouveaux agents de stabilisation.

### 3.5. Autres procédés du S/S :

- Avec des polymères organiques.
- Avec des argiles modifiés.
- Avec des silicates.

Ces technologies de stabilisation/solidification utilisent des matériaux à base de : silice, de chaux, du ciment, des polymères organiques, les poussières de fours ou les cendres volantes... et qui conduisent à la formation d'une masse stable et peu lixiviable et pour améliorer la stabilisation des déchets organiques dangereux.

### 3.6. Procédés brevetés :

Plusieurs compagnies offrent des procédés de stabilisation/solidification avec des produits brevetés, notamment : Soliditech Inc. (Injection de URRICHEM, un mélange de déchets et de cendres volantes, de poussières des fours rotatifs et de ciment portland) ; Delaware Custom Matériel Inc. ; Silicate Technology Corporation (procédé à base de silicates) ; Chemfix (procédé à base de ciment ou de pouzzolanes) ; Envirosafe (un mélange de cendres volantes et de chaux) ; PQ Corporation (Silicate de sodium) ; Silca Bonding (Sil-B) (neutralisation) du silicate de sodium par ajout d'acide pour former un liquide d'acide Silicique) ;

Wastech Inc. (agents brevetés à base de ciment).

New Environment, Inc. Harbord, OH (chlorananes). [AVERETT *et al.* ; 1990]

## **4. AVANTAGES, LIMITES ET APPLICATION DE CHAQUE TECHNOLOGIE :**

Le tableau suivant présente les principaux avantages, désavantages, et application et démonstration des procédés de stabilisation/solidification. [source : Environnement Canada, 1993]



TECHNOLOGIES	AVANTAGES	DESAVANTAGES	APPLICATIONS/DEMONSTRATION
<i>Solidification/Stabilisation</i> * <i>Ciment/pouzzolanes</i>	-Produit est structurellement sécuritaire. -Réduction de la perméabilité du produit. -Tests réussis pour le Gel/dégel.	-Faible efficacité pour les substances organiques et la stabilité à long terme est inconnue. -Produits peuvent empêcher la solidification : sulfate de calcium, borate et carbohydrates. -Acides réagissent avec les carbonates et les hydroxydes pour affaiblir le béton. -Nécessite un prétraitement des déchets (sédiments).	-Procédé au stade expérimental pour le traitement sur place. -Procédé démontré pour le traitement de matériel excavé (sols) et liquides contaminés par des substances inorganiques.
<i>Solidification/Stabilisation</i> * <i>chaux</i>	-Produit non dommageable pour l'environnement. -Sels formés à un pH neutre sont insolubles après précipitation.	-Sulfate de calcium, chromate et carbonate de potassium interfèrent avec la réaction. -Huiles et graisses à haute concentration interfèrent avec la réaction. -Chaux vive est corrosive pour la peau. -Problèmes de manutention de la chaux hydratés, une poudre fine.	-Utilisé en Allemagne depuis 1975. -Technologie démontrée pour les métaux.
<i>Solidification/Stabilisation</i> * <i>Argiles modifiées</i>	-Argiles modifiées doivent être homogénéisées pour une interaction optimale avec des déchets particules.	Testée à l'échelle laboratoire seulement	Testée en laboratoire seulement
<i>Solidification/Stabilisation</i> * <i>Thermoplastique</i>	-Produits solidifiés présentent de bonnes propriétés structurelles et une faible perméabilité. -Potentiel d'utilisation du produit dans la construction.	-Nécessite des mélangeurs spéciaux.	-Technologie largement utilisée dans l'industrie nucléaire
<i>Solidification/Stabilisation</i> * <i>Macro-encapsulation</i>	-Contaminants isolés de l'environnement. -Produits structurellement sécuritaires et imperméables.	-Produits traités doivent être enfouis. -Emissions des COV doivent être suivies durant la chauffage initial.	-Technologie testée en banc d'essai pour les déchets organiques et inorganiques et déchets hautement toxiques.
<i>Solidification/Stabilisation</i> * <i>Polymérisation</i>	-Produits solidifiés sont très stables.	-Produits traités doivent être enfouis. -Possibilités de lixiviation si les déchets sont encapsulés dans le polymère.	-Technologies utilisées dans les déversements, dans l'industrie nucléaire et pour les déchets inorganiques.
<i>Solidification/Stabilisation</i> * <i>Silicates</i>	-Produits rencontrent les tests de lixiviation standard. -Variété de déchets peuvent être traités.	-Vitesse de solidification très lente. -Pré-traitement des déchets par des émulsifiants ou des surfactants peut être requis.	-Application démontrée à l'échelle laboratoire pour plusieurs types de sol.

Tableau 2.6 : Avantages, désavantages et applications des technologies d'immobilisation pour le traitement des sols contaminés.

## **5. SOLIDIFICATION/STABILISATION APPLIQUEE AUX BOUES :**

[BOUTOUIL , 1998]

La solidification/stabilisation est largement utilisée dans le domaine du traitement des boues industrielles et municipales contaminées par les métaux lourds. D'ailleurs plusieurs brevets sont déposés dans ce secteur, chacun est destiné à traiter une pollution bien déterminée (déchet, métal).

Les résultats des recherches menées sur la solidification/stabilisation appliquée aux boues sont assez difficiles à comparer. Il apparaît notamment une diversité des procédures de préparation des mélanges boues-ciments (et additifs), ajouté à cela une variété des méthodologies globales qui vont du stockage des échantillons solidifiés/stabilisés à la caractérisation de l'immobilisation.

D'un autre côté, ces recherches permettent de dégager plusieurs points concernant essentiellement la gêne qu'occasionnent les polluants dans le processus d'hydratation ainsi que le degré d'immobilisation (stabilisation) des différents métaux lourds par le ciment portland.

On admet que le cuivre, le plomb et le zinc entravent le durcissement initial du ciment, alors que le cadmium, le chrome et le mercure n'ont qu'un effet négligeable sur les propriétés de durcissement du ciment. Ils suggèrent que l'effet de gêne des métaux cités pourrait être en rapport avec la formation d'une enveloppe gélatineuse autour des grains anhydres du ciment, agissant ainsi comme une barrière entre les composés et l'eau. Récemment, suite à des travaux sur les perturbations de l'hydratation du ciment par les substances contenues dans les boues d'hydroxydes métalliques, a conclu que le zinc engendrait soit une inhibition complète de la prise, soit une fausse prise provoquant l'arrêt des réactions d'hydratation. En revanche, le chrome aurait un effet accélérateur de prise.

En s'intéressant à l'efficacité de la solidification/stabilisation vis-à-vis de différents métaux lourds, le zinc, le plomb et le cadmium semblent effectivement stabilisés dans la matrice du ciment portland hydraté. Ils s'y retrouvent sous forme d'hydroxydes de métal. En revanche, le cuivre et le nickel se sont facilement extraits sous l'action lixivante de l'eau. Un relargage important de ces deux métaux a notamment été observé lorsque le pH chute en dessous de 7. Par ailleurs, on note que la caractérisation des déchets solidifiés/stabilisés est effectuée principalement à l'aide de deux essais. La résistance à la compression pour s'assurer de l'intégrité physique du produit solidifié/stabilisé et l'essai de lixiviation qui concerne l'échantillon monolithique ou broyé. Ce dernier essai a pour but de mesurer le degré d'immobilisation (stabilisation) des métaux lourds. Un facteur de corrélation entre ces deux essais est que plus la résistance à la compression est grande, plus la concentration en métaux lourds dans les lixiviats est faible.

Le rôle des additifs est souligné comme considérable. L'ajout de cendres volantes aboutirait à une diminution du pH due à la baisse de la quantité de chaux (CaO). Alors que la chaux a pour effet une accélération de la prise (et donc de sa résistance). Ceci permettra de minimiser la lixivabilité du produit solidifié/stabilisé durant l'étape critique de prise initiale.

## D) VALORISATION : FABRICATION DES BRIQUES DES BOUES DU DRAGAGE :

### Partie 1 :

On ne trouve pas les études et les données nécessaires en ce qui concernent la fabrication des briques des boues du dragage dans ce projet, à cause de la grande difficulté de communiquer ou de partager ce mode de fabrication d'une part et la rareté des études menées sur ce sujet d'autre part.

Actuellement, l'application a lieu au port de « HAMBOURG » en Allemagne.

Après avoir cherché le mode opératoire de formation des briques ; seul ce site Internet ([www.lebailly.com](http://www.lebailly.com)) nous a permis de récupérer quelques informations nécessaires. Voilà ci-dessous un exemplaire, et les autres détails se trouvent dans l'annexe.

Brique de poche LY (Brique surcomprimée à sec)

<u>Caractéristiques physiques</u>					
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )					2,6
Résistance à l'écrasement à froid (N/mm <sup>2</sup> )					34,2
Perte au feu (%)					1,88
<u>Composition chimique (%)</u>					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
79,34	2,9	12,98	1,32	0,25	0,07
Tout format et BRIQUES de forme : sur demande					
<u>Utilisations</u>					
Poche					

Tableau 2.7 : exemplaire de fabrication des briques des boues du dragage

Les différents articles et thèse que nous avons pu avoir sont:

L'I.F.T.S. dans son rapport « déshydratation des boues » détermine un indice important : lorsque leur teneur en sable n'excède pas 30% et pourvu que les essais adéquats le permettent, les produits de dragage peuvent constituer une matière première pour la fabrication de briques.

Alors que [BOUTOUIL, 1998] mentionne que la fabrication des briques comporte deux étapes essentielles : la première consiste à évacuer l'eau qui a permis d'obtenir la plasticité de la pâte, par une opération de séchage. La seconde étape est la cuisson. Ce traitement thermique à haute température (environ 900 à 1100°C) modifie fondamentalement la composition initiale en provoquant, d'une part la destruction des minéraux argileux constituant la matière première, et d'autre part la recristallisation et la formation de nouveaux composés qui densifient la matière lui conférant une structure à très haute stabilité physico-chimique [BERBESSON, 1980].

Ces transformations concernent l'argile, matière première de base pour la fabrication des briques (voir tableau ci-contre).

Les proportions des principaux composants des argiles les plus couramment utilisés varient dans les limites indiquées sur le tableau suivant :

Constituants	Pourcentage (%)
Silice : SiO <sub>2</sub>	35 à 80
Alumine : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8 à 25
Oxyde de titane : TiO <sub>2</sub>	0.3 à 2
Oxyde de fer : Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 à 10
Chaux : CaO	0 à 18
Magnésie : MgO	0 à 5
Soude : Na <sub>2</sub> O	0.1 à 1
Potasse : K <sub>2</sub> O	0.5 à 4.5
Anhydrite de carbone : CO <sub>2</sub>	0 à 15
Perte au feu	3 à 18

Tableau 2.8 : Différents constituants d'une argile destinée à la fabrication de briques [BOUTOUIL,1998]

Ces argiles diffèrent entre elles, principalement par leurs compositions minéralogiques. Ainsi, il est possible de remplacer l'argile, matière première, par d'autres matériaux contenant les mêmes composants de base.

Partant de ce principe, [DIELTJENS *et coll.*, 1993] dans (Boutouil, 1998) ont testé les propriétés d'un mélange de boue (issue de station d'eau potable) et d'argile. Deux boues ont été choisies : l'une riche en aluminium et l'autre sans fer. D'après les résultats des essais de résistance à la compression et de porosité, la boue sans fer, avec un dosage de 5% (par rapport à la matière sèche) semble être la plus adaptée comme additif à l'argile. Un dosage de 10% aboutit à des résultats semblables et comparables à ceux de l'argile pure. On note que peu d'informations sont données sur la composition exacte ainsi que la procédure de fabrication.

Enfin, une conférence se déroulera au port autonome du Dunkerque le « 9 octobre 2002 », sur la « VALORISATION DES BOUES DE DRAGAGE » avec la participation des représentant des ports d'Allemagne (HAMBOURG), d'Angleterre, de Danemark, et de France.

L'article du port de « HAMBOURG » sur ce sujet est encore pas arrivé..

## **Partie 2 :**

Cette partie illustre la fabrication des briques telles qu'elle s'est faite en Europe pendant des siècles.

### **1. Introduction :**

Les fours à briques traditionnels ont disparu du paysage occidental au début du vingtième siècle. Toutefois, la technique ancienne utilisée pour fabriquer et cuire les briques est toujours utilisée en Afrique. C'est de là, et plus précisément du Rwanda, que proviennent les photos de ce reportage.

### **2. Les types de briques :**

Il existe deux sortes de briques : les briques crues et les briques cuites. Les briques crues sont encore couramment utilisées en Afrique et constituent un excellent matériau, bon marché et facile à préparer. Il s'agit d'un travail familial. Certains constructeurs de maisons utilisent des fils de fer barbelés entre deux rangées successives de briques. Ceci confère à la maison une résistance au craquellement inévitable quand les briques continuent à sécher après la construction.

Les briques cuites, plus solides et plus durables, coûtent plus cher et sont le résultat d'un travail collectif. Au Rwanda, par exemple, la fabrication de ces briques n'est pas si courante que cela en raison de son prix : elle demande une importante consommation de bois, soumise à une autorisation officielle dans un pays en proie à la déforestation.

### 2.1. Les briques crues :

Pour fabriquer ces briques, on mélange de la terre, de l'eau et de la paille. Cette boue compacte est mise en forme au moyen de cadres de bois de 20 cm sur 10 cm sur 10 cm.

Les briques sont simplement mises à sécher au soleil.

Une fois sèches, elles sont assemblées au moyen d'un mortier de terre humide. Une armature de bois est parfois utilisée en renforcement.

Quand les murs sont bien secs, on peut encore les recouvrir d'une sorte de crépi de boue. Sec, ce crépi peut être peint.

### 2.2. Les briques cuites :

#### **La préparation des briques :**

Pour fabriquer les briques à cuire, on utilise de l'eau et une terre argileuse, légèrement collante. Un trou est creusé dans le sol et de l'eau y est déversée.

La boue est comprimée dans un cadre de bois, comme pour les briques crues, mais de dimension plus petite.

Les briques sont tassées au fond de la forme avec un petit patin en bois. Elles sont ensuite démoulées et mises à sécher au soleil et au vent pendant une semaine environ.

Relativement sèches, les briques sont empilées par piles de 1000 briques et stockées jusqu'au moment de la cuisson.

#### **La construction du four :**

Le four est constitué par les briques elles-mêmes, empilées d'une façon précise. Un four compte 100.000 briques.

#### **La cuisson :**

Des troncs entiers sont glissés dans les bouches à feu.

Le feu est allumé et surveillé en permanence. Il va brûler jour et nuit pendant environ une semaine.

Pendant les 3 premiers jours, la vapeur d'eau encore contenue dans les briques s'échappe en volutes blanches.

Après une semaine environ, les flammes sont montées jusqu'au sommet du four qui rougeoie dans la nuit.

Le four est alors entièrement recouvert d'une couche de boue pour conserver la chaleur.

Le feu est alors éteint et le four va refroidir pendant une semaine

K ; Les briques cuites, d'un rouge éclatant, sont prêtes à l'emploi

## CHAPITRE 3 : LES PROPOSITIONS

## (ANALYSE MULTICRITERE – AIDE A LA DECISION)

Ce chapitre se décompose en deux parties complémentaires :

- La première partie concerne la mise en évidence des techniques de traitement et de valorisation les plus adaptés aux sédiments du Port Autonome de Dunkerque à partir de l'analyse des échantillons à notre disposition, dont on a défini les caractéristiques physiques propres.
- La deuxième partie, concerne l'établissement d'une méthodologie pour le traitement des boues de dragage en se basant sur une Analyse Multicritère d'aide à la décision.

### **Première partie :**

D'après l'analyse des courbes et des histogrammes, on constate que les contaminants rencontrés dans notre échantillon sont des métaux lourds, et que la grande proportion des sols sont des sables.

Le choix de la méthode et la faisabilité de la technique seront plus facile à étudier en l'absence d'argile et de polluants plus complexes.

A partir de ces données, on pourrait se concentrer sur la première famille de traitement, c'est à dire les traitements par concentration de polluants :

- Traitements physiques et physico-chimiques
- Traitements chimiques
- Traitements biologiques
- Traitements thermiques.

Le choix de la méthode de traitement et d'élimination aura lieu dans la deuxième partie de ce chapitre.

On ne considérera que les deux premiers procédés, et cela pour des raisons : économiques, et environnementales (voir chapitre 2, partie 1).

Cette famille de traitement consiste à séparer les sédiments et les polluants.

Pour les traitements physiques, on peut envisager deux procédés :

- un hydrocyclone peut-être utiliser, il permet la séparation granulométrique jusqu'à dix microns. L'utilisation d'un hydrocyclone a montré une grande efficacité sur les sédiments de dragage dans plusieurs pays (Allemagne : HAMBOURG...).
- Un autre procédé pourrait aussi être appliqué : la séparation magnétique, utilisé sur des sédiments contaminés par des particules solides métalliques.

Mais, ce procédé n'est pas satisfaisant au point de vue économique, et faisabilité.

- Pour les traitements chimiques, l'extraction par lixiviation permet de traiter les pollutions métalliques. Il existe plusieurs étapes à suivre :
  - la dissolution des polluants par l'utilisation des acides même des bases,
  - la solution ionique est ensuite récupérée par filtration ou centrifugation,
  - les polluants qu'elle contient sont précipités.

L'application d'un des procédés cités ci-dessus permet de récupérer les différents éléments qui forment l'échantillon.

Ces éléments sont des fractions sableuses, grosses et fines. Leur voie de valorisation est celle des graves routières (projet en cours d'étude entre l'école des mines de Douai et le P.A.D.).

Ces propositions ne sont pas valables pour toutes les zones du port, car en considérant une autre zone (la zone De Gaulle), le niveau de contamination de l'échantillon n'atteint pas le risque imposé par les réglementations, et les types de sols ne sont pas exclusivement du sable (on contient une proportion d'argile non négligeable).

Sous l'action des contraintes (économiques, techniques et environnementales), l'immersion en mer est la solution la plus convenable.

Récemment, une technique de dégradation in-situ de polluants hydrocarbonés spécifiques (traitement bactériologique) est appliquée sur différents sédiments de plusieurs ports. Elle se distingue des méthodes traditionnelles par quatre caractéristiques principales :

- la possibilité de traiter directement sur place les pollutions (intervention in-situ), par opposition à l'excavation et au déplacement qui obligent à d'importantes opérations de génie civil et de transport,
- une modification chimique structurelle du polluant en composés inertes, ce qui le distingue des processus de dilution, d'enfouissement ou de dispersion qui ne font que déplacer le problème,
- une solution écologique globale et cohérente dans la mesure où ni le site géographique environnant, ni la flore ni la faune ne sont perturbés. (Maîtrise des rejets dans l'atmosphère, aucune modification géophysique du site, aucune adjonction de solvants ou dispersants souvent plus toxiques que le polluant lui-même, préservation des constructions et bâtiments.),
- une solution économiquement intéressante par la possibilité de poursuivre l'activité industrielle pendant le traitement, conjuguée à des frais de traitement souvent moindres.

## **Deuxième partie :**

Dans notre problématique, nous avons croisé plusieurs types de solutions de traitement et de valorisation qui peuvent être appliquées sur différents genres de sédiments. Ces solutions, dont leurs sens varient entre supplémentaires et contradictoires avec les sédiments étudiés, nécessitent l'utilisation d'une Analyse Multicritère d'aide à la décision.

### **1. Définition – Synthèse bibliographique :**

D'après [LAARIBI, 2000] quatre étapes constituent la tâche « analyse multicritère » :

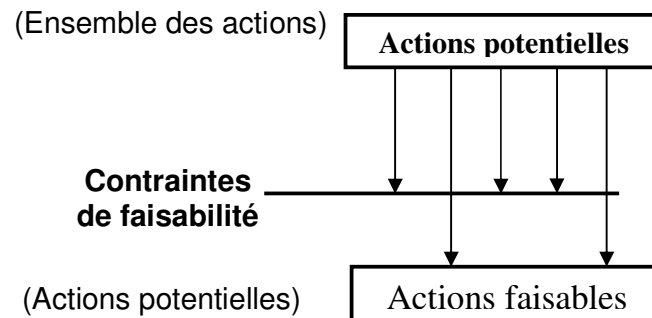
- Actions faisables (solutions possibles ou envisageables) : il s'agit d'un inventaire d'actions potentielles où l'ensemble est aussi complet que possible,
- Groupe de critères : son objectif est de définir les critères à prendre en considération, c'est le choix de la famille cohérente de critères,
- Evaluation : juger chacune des solutions aux yeux de chacun des critères,
- Agrégation : agréger ces jugements pour désigner la solution qui jouit globalement des meilleures évaluations.

→ L'action potentielle : c'est une action provisoirement jugée possible par un des intervenants au moins ou présumée telle par l'homme d'étude en vue de l'aide à la décision [MAY, 94].

→ L'élimination d'actions non-faisables de structure et de fondation de premier niveau.

### 1.1. Principe :

Une aide au maître d'ouvrage à décider de la faisabilité, la non faisabilité ou l'évolution vers un moindre impact du projet initial constitue une démarche itérative qu'il est possible de représenter par le schéma suivant :



### 1.2. Définition des solutions faisables :

La définition des solutions faisables nécessite dans un premier temps la définition des solutions potentielles, et les contraintes de faisabilité. Ensuite, nous procédons à l'annulation des solutions qui ne satisfont pas ces contraintes. La faisabilité sera vérifiée à deux niveaux : le premier niveau, qui se présente dans le premier nœud de décision, se caractérise par la vérification des contraintes dite " absolues" ( la contrainte absolue est une contrainte qui juge la faisabilité ou la non-faisabilité d'une solution quel que soit le scénario). Par contre, avec les contraintes de deuxième niveau "relatives", qui se manifestent plus tard dans la décision, le jugement de faisabilité ou non d'une solution proposée dépend du scénario qui se présente.

### 1.3. Les contraintes de la faisabilité :

La faisabilité, c'est-à-dire la possibilité de réaliser l'opération, doit être vérifiée sous plusieurs aspects : les délais, les possibilités et les contraintes des boues (volume, ..) et ses polluants, les aspects financiers, environnementaux et techniques.

→ La faisabilité dans le temps : les délais. L'étude de faisabilité dans le temps met en regard les impératifs des techniques relatifs à la date de mise en service, avec le planning prévisible de l'ensemble de l'opération. Nous intéressons au délai de la réalisation et le bon déroulement du chantier..

→ La faisabilité technique :

Le maître d'ouvrage ou son mandataire devra réfléchir sur la possibilité de fonder l'ouvrage et d'assurer des impacts de traitements et de valorisations acceptables, compte tenu des premiers renseignements sur la nature du sédiment et du polluant.

Il faudra aussi engager une réflexion sur le savoir-faire local pour l'exécution des travaux, mais également pour tous les problèmes de maintenance, de manière à adapter le mieux possible la technique retenue à ces diverses constatations.

Les contraintes particulières pour l'installation du chantier et pour son approvisionnement doivent aussi être prises en compte .

→ La faisabilité économique :

Etablir la faisabilité économique et financière d'un projet de traitement et de valorisation des boues consiste, d'une part, à évaluer l'ensemble des dépenses nécessaires à sa réalisation et à son exploitation ultérieure ; d'autre part, à vérifier la capacité réelle de financement du maître d'ouvrage. Pour des raisons économiques, certaines solutions peuvent être refusées par le maître d'ouvrage (coût excessif des matériaux à traiter ou de leur mise en œuvre).

## 2. L'ensemble des solutions (Actions) :

- I) Procédés de traitement par concentration des polluants
  - a. Traitements physiques et physico-chimiques
    - i. Le cyclonage
    - ii. L'attrition
    - iii. La gravimétrie
    - iv. La séparation magnétique
    - v. La flottation
    - vi. L'électromigration
  - b. Traitements chimiques
    - i. Extraction par lixiviation
    - ii. Extraction par complexation
    - iii. Extraction par solvant
    - iv. Procédés d'échange cationique
  - c. Traitements biologiques
    - i. Biolixiviation
    - ii. Bioaccumulation
  - d. Traitements thermiques
    - i. La désorption
- II) Procédés de traitement par dégradation des polluants
  - a. Oxydation à l'air humide
  - b. Oxydation au peroxyde d'hydrogène
  - c. Biodégradation
- III) Procédés de traitement par neutralisation des polluants
  - a. Procédés préliminaires de séparation solide-liquide
    - i. La floculation-coagulation
    - ii. Les traitements mécaniques
    - iii. Le séchage
  - b. Procédés de neutralisation des polluants
    - i. Procédés d'immobilisation
    - ii. La vitrification
    - iii. L'incinération

## 3. Application :

Dans l'application, on tient à remplacer les paramètres d'aide à la décision par ceux des boues, on note :

- Actions (solutions potentielles) se sont les différentes méthodes de traitements des boues.
- Contraintes : caractéristiques physiques, physico-chimiques, chimiques et biologiques des sédiments.

- Critères : les raisons économiques, environnementales, techniques, et sociales.

Afin d'obtenir la matrice sur note, on écrit les critères en lignes et les actions en colonnes :

	C1	C2	C3. ..	Cn
A1 (trait. 1)	N11	N12	N13	N1n
A2 (trait. 2)	N21			...
A3	N31			...
A4..	...			
An		...	...	Nnn

## CONCLUSION

L'étude que nous avons réalisé dans le cadre de ce mémoire comporte une synthèse bibliographique concernant la Valorisation des boues de dragage qui peuvent être contaminés par divers types de polluants (métaux lourds, matières organiques,...). A partir de cette étude, nous avons recherché les voies de valorisation des boues de dragage du Port Autonome du Dunkerque (P.A.D.). les résultats obtenus se résument à :

Concernant les caractéristiques des matériaux et des contaminants, l'étude bibliographique révèle que :

- les sédiments de dragage sont classés dans les catégories des matériaux fins. Ainsi, les échantillons analysés montrent que les boues contiennent plus de 80% d'éléments de diamètre < 200µm.
- les grains sont formés essentiellement d'une grande proportion de limon, de sable, et d'argile.
- les polluants rencontrés ont diverses formes, sources, et comportements chimiques, il y a une insuffisance de réglementations sur leurs contrôles et leur comportement qui les rendent difficiles à comprendre et à étudier.

*Concernant sur les techniques de traitement, elles peuvent être classées en trois familles :*

- les procédés de traitement par concentration des polluants qui permettent d'isoler et séparer les polluants de la matrice sédimentaire, le sédiment est décontaminé en tout ou partie ;
- les procédés de traitements par dégradation des polluants qui sont applicables qu'à certaines contaminations organiques, ces polluants sont détruits par voie chimique ou biologique ;
- les procédés de traitement par neutralisation des polluants qui permettent soit de stabiliser le matériau contaminé, soit de le détruire.

A partir de ces deux constats, et en particulier sur le fait que les polluants du P.A.D. sont localisés sur la fraction fine, nous avons choisi l'application suivante :

La séparation granulométrique par hydrocyclone, car elle s'avère très efficace. Nous avons montré que sur ces produits hétérogènes, ces appareils permettent non seulement d'isoler les particules fines (argiles, micro sulfures..), mais aussi celles de faibles densités telles que les matières organiques, dont les affinités avec les métaux sont très fortes. Une étape préliminaire de décapage des surfaces minérales en cellule d'attrition peut s'avérer nécessaire, et permet d'améliorer la libération des fines argileuses présentes en enrobage sur les particules grenues.

Le choix d'un hydrocyclone ou de méthodes semblables (séparations gravimétriques) ont un rôle important dans leur valorisation future car le 2<sup>ème</sup> chapitre de la partie 2, nous a montré que la plupart des méthodes de valorisation nécessitent de séparer les divers types des sédiments, après avoir décontaminer, afin de choisir la solution de traitement et valorisation la plus appropriée.

En outre, nous présentons dans l'ANNEXE 2 une nouvelle procédure de décontamination de sols par voie thermique (procédé TPS), qu'elle a donné des résultats importants aux 2 niveaux économiques et environnementaux. Alors que son application aux boues de dragage n'a pas été encore faite.

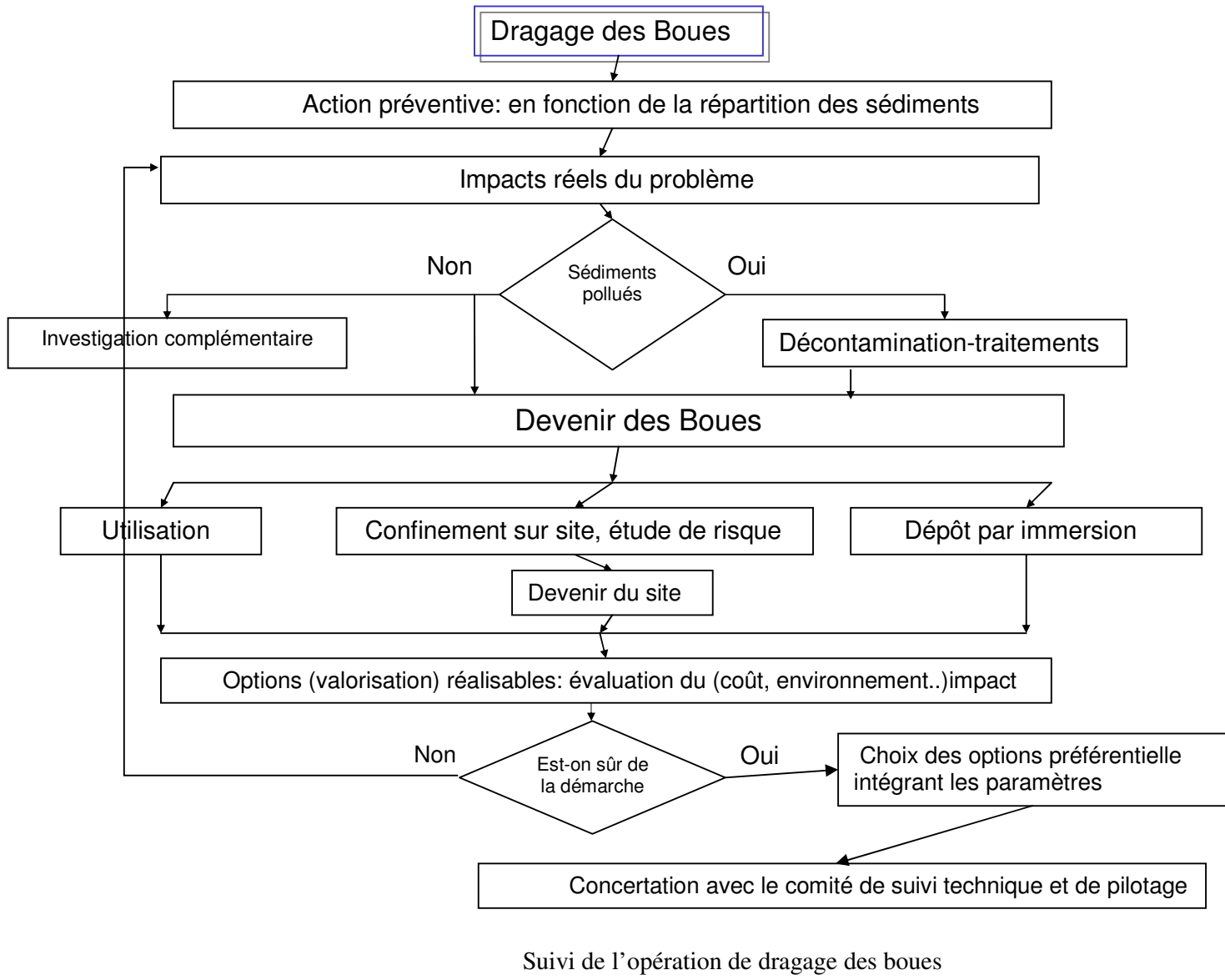
L'épandage des boues en agriculture est une pratique, en usage depuis plus de 30 ans, constitue une solution favorable à l'environnement, car elle offre l'opportunité de recycler la matière organique nécessaire au sol.

De plus, les boues représentent un fertilisant peu onéreux, qui permet à l'agriculteur de réduire ses charges en engrais fertilisants classiques.

Ainsi que dans l'ANNEXE 4, nous avons élaboré un tableau récapitulatif par les coûts de traitement, évacuation et valorisation des tous les types des boues.

Néanmoins l'ensemble des résultats présentés dans ce rapport repose sur une étude bibliographique. Il convient de les valider par des essais pilotes (essais qui donnent les caractéristiques physiques et chimiques des boues, application des méthodes de traitement citées au-dessus...), ce qui permettra en outre d'obtenir des données nécessaires aux études de coût, voire application plus pratique donnant une base de travail très précieuse.

Cependant, à partir de cet ouvrage et le [Guide réalisé par le Groupe de Travail Opérationnel de la Thématique Sédiments Toxiques, 1998], on pourrait synthétiser l'organigramme suivant qui résume l'opération de dragage. Il s'entend de besoin de dragage, aux caractérisations du matériau et leur action préventive, pour accéder à la décontamination et le devenir de cette boue, afin de respecter les réglementations imposées.





## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [A. BOUCHELAGHEM – M. C. MAGNIE – H. BILLARD]  
Traitement par stabilisation/solidification de résidus dangereux (1995).
- [AIPCN] Classification des sols et des roches à draguer (1984).
- [AIPCN] Gestion des produits de dragage en provenance des voies de navigation intérieures. (1990)
- [AIPCN] : Rapport du groupe de travail (1986)  
Déversement en mer des produits de dragage.
- [AIPCN] : Rapport du groupe de travail (1990)  
Méthodes économiques d'entretien des chenaux
- [AIPCN] : Rapport du groupe de travail (2000)  
Gestion du dépôt des matériaux de dragage en milieu aquatique
- [AIPCN] : Rapport du groupe de travail (????)  
La valorisation des produits de dragage (guide pratique).
- [AMOR LAARIBI, 2000] ; Paris : Hermès Science, 2000  
SIG et analyse multicritère.
- [BOUTOUIL MOHAMED LEVACHER DANIEL , 1998]  
Traitement vases dragage solidification base ciment et additifs
- [Centre Saint-Laurent] ; Environnement Canada (1993).  
Guide pour l'évaluation et le choix des technologies de traitement des sédiments contaminés.
- [CLAUDE ALZIEU] «Etat des connaissances».  
DRAGAGE ET ENVIRONNEMENT MARIN  
(comportement des polluants) (1999).
- [CLAUDE ALZIEU et LAETITIA TARBOURIECH]  
[Ifremer / Sète] ; Réunion Géode-Bordeaux 14 mai 2002  
Tributylétain et Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques dans les sédiments portuaires : Proposition de niveaux de référence.
- [DERIE RENE ; BOUCHIKI ABDEL ; 2001]  
Nouvelles applications du procédé d'inertage Phosphorique  
(PNUE: Athènes, 2000 )
- [DURAND GERARD, JACQUINOT BERNARD]  
Les boues industrielles : traitements, valorisation ( ????).
- [EPA, October 2001]; United States, Environmental Protection
- UNIVERSITE D'ARTOIS – LAMH – équipe HSE (D.E.A. I.U.)

Agency.  
Methods for collection, Storage and Manipulation of Sediments for  
Chemical and Toxicological Analyses: Technical Manual

[FATIMA-ZAHRA KADIRI, Mai 1999]

Technologies de dépollution des boues contaminées.

Faut-il curer ? pour une aide à la prise de décision (1998).

[Guide réalisé par le Groupe de Travail Opérationnel de la  
Thématique Sédiments Toxiques.]

[FRANCOIS SCHLOSSER] Cours de l'école nationale des ponts et  
chaussées. Eléments de Mécanique des Sols (1997).

[GEODE ; SEPTEMBRE 2000]

Opération de dragage (Guide méthodologique d'établissement  
d'un document d'incidences)

[H.D. DETZNER]; International conference on contaminated  
sediments (1993).

New technologies for treatment and utilization possibilities of  
dredged material .

[IFTS] Déshydratation des boues résiduelles industrielles et  
urbaines (1995).

[JESSE R. CORNER ; STEVE L. HOEFFNER]

Critical Reviews in Environmental Science and Technology  
The history of stabilization/solidification technology.

La Norme française du ciment

[1981 – 1994]

[LUCIEN YVES MAYSTRE ; JACQUES PICTET ; JEAN SIMOS]

Méthodes multicritères ELECTRE (1994).

[MAROT, 1997] FRANCK MAROT (1997)

Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants  
métalliques. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle

[M. GERARD MIQUEL, et M. SERGE POIGNANT]

Les techniques de recyclage et de valorisation des déchets  
ménagers et assimilés .

[Nicole Dhainaut - Courtois, 2001]

Vers une évaluation plus performante de l'écotoxicité des boues de  
dragage des ports maritimes grâce à l'utilisation combinée  
d'indices biotiques et de scores de risque.

Exemple de « Boulogne-sur-mer » et de « Dunkerque »

[OTV, 1997] Ouvrage Collectif  
Traiter et Valoriser les Boues.

[Programme des Nations Unies pour l'environnement]  
Lignes directrices pour la gestion de matériaux de dragage (2001).

[RAMADAN A., JACQUINOT B.] : GROUPE FRANÇAIS DE GENIE  
DES PROCEDES.  
Traitement et valorisation des effluents liquides industriels ( ????)

[SOGREAH ] : Rapport d'étude (2001)  
Etude de faisabilité pour le curage et l'aménagement de la Scarpe  
moyenne dans l'agglomération de DOUAI : phase 2.

#### Sites d'internet :

- [www.otei.fr](http://www.otei.fr) - [www.dessgp.unice.fr](http://www.dessgp.unice.fr) - [www.ifts-sls.com](http://www.ifts-sls.com)
- [www.satrod.com](http://www.satrod.com) - [www.batitel.com](http://www.batitel.com)
- [www.cum.qc.ca](http://www.cum.qc.ca) - [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr) - [www.terca.be/fr/fr](http://www.terca.be/fr/fr)
- [www.dechetcom.com](http://www.dechetcom.com) - [www.sandwell.com](http://www.sandwell.com)
- [www.honet.be](http://www.honet.be) - [www.metacrawler.com](http://www.metacrawler.com)
- [www.ups-tlse.fr](http://www.ups-tlse.fr) - [www.cipm-icbm.be](http://www.cipm-icbm.be)
- [www.hautes-pyrenees.pref.j\(g\)our.fr](http://www.hautes-pyrenees.pref.j(g)our.fr)
- [www.insa-lyon.fr/DEA/std/profils.html](http://www.insa-lyon.fr/DEA/std/profils.html)
- [www.sturm.fr](http://www.sturm.fr) - [www.brique.net](http://www.brique.net)
- [www.clebat.com](http://www.clebat.com) - [www.nrc.ca](http://www.nrc.ca)

## GLOSSAIRE

**Absorption** : pénétration intime d'une substance dans un corps solide ou liquide.

**Acide** : espèce chimique hydrogénée, dont la dissolution dans l'eau fournit des ions H<sup>+</sup>, et qui ce fait possède un ensemble de propriétés caractérisant la fraction acide (PH inférieur à 7).

**Acidification** : adhésion ou concentration de substances dissoutes ou dispersées à la surface d'un corps.

**Aérobie** : se dit des microorganismes qui ont besoin, pour leur développement, de l'air atmosphérique ou d'air dissous naturellement ou artificiellement dans l'eau.

**Affluent** : se dit d'un cours d'eau qui se jette dans un autre

**Anion** : ion de charge négative

**Argile** : type de sol de forte cohésion, composé de particules inférieures à 0.002mm.

**Bactérie** : organisme primitif unicellulaire généralement sans chlorophylle qui se produit par division. Les bactéries se présentent comme des cellules individuelles, des groupements, des chaînes ou des filaments de cellules.

**Base** : composé qui se dissocie en solution aqueuse de façon à libérer des ions hydroxydes.

**Bioaccumulation** : rétention sans cesse croissante d'une substance dans les tissus d'un organisme tout au long de son existence (le facteur de bioconcentration augmentant sans cesse).

**Biochimique** : se dit d'un changement chimique résultant d'une action biologique mesurée ou exprimée en fonction du changement qui s'ensuit.

**Bioconcentration** : rétention d'une substance dans les tissus d'un organisme Au point que la teneur des tissus en cette substance dépasse la teneur du milieu ambiant en cette substance, à un moment donné de la vie de cet organisme.

**Biodégradable** : se dit d'une substance ou d'un produit susceptible d'être intégralement décomposé par des organismes vivants.

**Bioessai** : technique de l'effet biologique d'une substance contenue dans l'eau par l'observation des modifications d'une activité biologique.

**Boues activées** : boues floculantes ou floculées produites par aération prolongée des eaux d'égouts. Par les microorganismes qu'elles contiennent, ces boues sont capables de transformer les matières organiques en produits stables.

**Boues** : terme général désignant les résidus de l'épuration ou du traitement des eaux, se présentant sous forme de boue ou de vase à forte teneur en eau, déposées sur le fond des bassins de décantation.

**Cancérogène (ou carcinogène)** : désigne les substances provoquant l'apparition d'un cancer chez un organisme vivant.

**Caractérisation** : identification précise des éléments distinctifs d'une substance, d'un milieu ou d'un processus.

**Carbone Organique Total (COT)** : mesure de la quantité de carbone dans un échantillon provenant de matières organiques seulement. Cet essai est effectué par la combustion de l'échantillonnage et le dosage du dioxyde de carbone produit.

**Cation** : ion de charge positive.

**Centrifugeur ou centrifugeuse** : dispositif mécanique utilisant la force centrifuge pour séparer les solides des liquides ou pour séparer des liquides de densités différentes.

**Chaîne de traitement** : procédé de traitement complet qui inclut le prétraitement, le traitement primaire, le traitement des résidus et des autres rejets (atmosphériques, effluents liquides et solides) des procédés de traitement et incluant le post-traitement. Dans certain cas, ces chaînes de traitement incluent des technologies capables de traiter efficacement aussi bien les contaminants inorganiques que les contaminants organiques.

**Charbon actif** : charbon végétal auquel un traitement a donné une surface spécifique considérable. Utilisé pour l'adsorption des matières communiquant à l'eau un goût, une odeur ou une couleur, il est aussi employé pour absorber l'excès de chlore dans les eaux désinfectées. Le produit commercial est soit granulaire, soit pulvérulent.

**Chaux** : produit obtenu par la calcination du carbonate de calcium.

**Clarificateur** : (voir décanteur).

**Classificateur granulométrique** : appareil servant à séparer les matières particulaires selon leur diamètre dimensionnel par exemple les hydrocyclones, les classificateurs sur lit fluidisé et les collecteurs de sable à air.

**CO (monoxyde de carbone)** : gaz inodore, incolore et insipide provenant de la combustion incomplète de composés carbonés (p. ex. Gaz d'échappement des automobiles). Dans l'organisme, il se lie solidement à l'hémoglobine du sang rendant ainsi le transport de l'oxygène des poumons vers les tissus moins efficace.

**Coagulation** : agglomération des particules fines (colloïdales) en suspension dans un liquide.

**Combustion** : réaction thermique par laquelle un élément se lie à l'oxygène, et les éléments constitutifs combustibles et volatils (comme les matières organiques et l'eau) s'évaporent.

**Composé Organique Volatil (COV)** : Tout composé de carbone à l'exception des oxydes de carbone, des carbures métalliques, des carbonates et des cyanures, susceptibles d'être retrouvé dans l'atmosphère à pression et température ambiante (p. ex. Solvants organiques, hydrocarbures légers. La définition d'un composé organique volatil fait souvent référence à des méthodes d'échantillonnage et d'analyse particulière (p. ex. CUM, U.S. Environmental Protection Agency).

**Conditionnement:** traitement d'un produit ou matériel jusqu'à ce qu'il acquiert les propriétés physiques, chimiques et/ou mécaniques voulues.

**Contaminant :** corps contenu dans l'eau, l'air ou tout autre milieu, qui ne fait pas partie de la composition normale du milieu et qui lui donne un caractère de nocivité.

**Décantation :** opération consistant à laisser déposer les matières en suspension dans un liquide, en vue de les éliminer ou de recueillir le liquide clarifié.

**Décanteur (clarificateur) :** bassin dans lequel la vitesse de l'eau est réduite de façon à permettre la décantation des matières en suspension.

**Eau interstitielle :** expression générique désignant l'eau contenue dans les pores d'un sol de surface ou d'un sédiment dans le fond d'un cours d'eau.

**Eaux souterraines :** terme générique désignant les eaux qui se trouvent au-dessous de la surface du sol. Elles représentent la plus grande partie des réserves d'eau douce.

**Ecologie :** science ayant pour objet l'étude des rapports des organismes vivants entre eux et avec le milieu qu'ils habitent.

**Ecosystème :** unité écologique, appartenant à la biosphère, composée d'éléments vivants, animaux et végétaux (biocénose) et d'éléments inertes (biotope). Les écosystèmes sont donc les systèmes dynamiques fonctionnels de la biosphère à l'intérieur desquels les espèces vivantes sont à la fois productrices et consommatrices dans le cadre des chaînes alimentaires.

**Ecotoxicité :** capacité d'une substance à provoquer des effets toxiques non seulement sur les espèces vivantes mais aussi sur leurs organisations, leurs rapports avec la matière inanimée, et leurs rapports entre elles (déséquilibres biologiques). L'écotoxicité d'une substance est plus particulièrement liée à ses effets toxiques à long terme.

**Effluent industriel :** ensemble des eaux à évacuer de l'usine et des matières qu'elles sont susceptibles d'entraîner.

**Environnement :** ensemble des conditions naturelles (physiques, chimiques, biologiques) et culturelles (sociologiques) susceptibles d'agir sur les organismes vivants et les activités humaines.

**Evaporation :** passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux, à partir de la surface libre d'une eau ou du sol.

**Filtre-presse :** filtre à travers lequel la séparation des matières solides et du liquide se fait sous une certaine pression, au moyen d'un tissu ou d'un autre matériau filtrant .

**Fixation :** fixation de composés ou d'éléments.

**Floculation :** phénomène d'agglomération des colloïdes déchargés. Les flocons ainsi formés sont plus faciles à éliminer par décantation.

**Flottation :** extraction sous forme d'air des matières solides en suspensions dans l'eau ou l'eau usée en les amenant à la surface, généralement par insufflation d'air.

**Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)** : hydrocarbures dont les atomes de carbone sont disposés en deux ou plusieurs cycles.

**Hydrocyclone** : dispositif pour calibrer, par voie centrifuge, des particules fines en suspension dans l'eau.

**Incinération** : destruction par combustion des déchets organiques des ordures ménagères, des boues des stations d'épuration, des déchets industriels, etc.

**Inflammable** : qui s'enflamme facilement.

**Inorganique** : terme générique qui désigne certaines composantes chimiques. En général, elles sont non incinérables et ne contiennent le carbone que sous forme non combustible. Qui n'est pas constitué de matière vivante.

**Ion** : atome ou molécule qui a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons, par ionisation. Il devient chargé électriquement.

**Lagune** : bassin destiné à recueillir en plein air les eaux ou les boues afin d'en faciliter le traitement.

**Limon ou silt** : type de sol aux propriétés cohésives, composé de grains d'un diamètre compris entre 0.002 mm et 0.006mm.

**Lixiviation** :

a) Entraînement par solubilisation de certains contaminants dans une substance lorsque celle-ci est mise en contact avec un liquide agissant comme solvant (souvent l'eau). Dans une décharge, les déchets sont principalement lixiviés par les eaux de pluie.

b) Phénomène d'entraînement des éléments, ts solubles d'un déchet par un solvant. Sur un site d'enfouissement, les déchets sont principalement lixiviés par les eaux de pluie.

**Matières en suspension** : matières pouvant être soit déposées, soit retenues par filtrage.

**Matières Organiques** : substances chimiques d'origine animale ou végétale, ou plus correctement, à structure de base carbonée. Cette catégorie inclut la plupart des composés du carbone ; la plupart des matières organiques sont combustibles et un grand nombre est volatile.

**Matières Solides** : ensemble des matières dissoutes ou non, volatiles ou non, présentes dans les eaux d'égouts ou les eaux des circuits d'alimentation.

**Métaux Lourds** : terme qui désigne des métaux à poids atomique relativement lourd tels que le chrome, le nickel, le cadmium, le plomb ; l'argent, l'or, le mercure, le cuivre, etc., et qui peuvent être précipités par l'acide sulfhydrique. A l'état soluble, ils sont souvent toxiques. Les métaux lourds peuvent s'accumuler le long de la chaîne alimentaire.

**Microorganisme** : organisme très petit, végétal ou animal, invisible ou à peine visible à l'œil nu.

**Minéralisation** : décomposition de la matière organique en composés minéraux.

**Neutralisation** : réaction chimique entre les ions  $H^+$  et les  $OH^-$ , accompagné de la formation de molécules d'eau.

**NO<sub>x</sub> (oxydes d'azote)** : les oxydes d'azote sont une famille de contaminants que l'on retrouve fréquemment dans l'air présentant une pollution photochimique (par ex. smog de LOS ANGELES). Le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) est une irritante pulmonaire.

**Nuisance** : désigne à la fois une cause (agent polluant, bruit, odeur) et un effet (pollution, gêne).

**Organique** : terme qui désigne des composantes chimiques à base de carbone ; en général combustible, relatif aux êtres vivants.

**Oxydation biochimique** : oxydation résultant de l'activité biologique qui entraîne la combinaison chimique de l'oxygène avec la matière organique.

**Oxydation** : processus chimique pouvant consister dans la fixation d'oxygène (combustion), la perte d'hydrogène (H<sub>2</sub>S en S) ou le relèvement de la valence (transformation d'un corps ferreux en corps ferrique).

**Pesticides** : terme générique désignant les composés synthétisés industriellement pour servir de produits de lutte antiparasitaire, notamment les pesticides et surtout les composés organochlorés : herbicides, fongicides et insecticides).

**PH** : mesure de degré d'acidité ou d'alcalinité d'une solution, d'un sol. Il s'agit du logarithme décimal inverse de la concentration en ions  $H^+$ .

**Polluant** : se dit d'une substance, d'un corps qui contamine un milieu. Agent physique, chimique ou biologique qui modifie de façon nuisible l'équilibre naturel.

**Polymères** : composés chimiques complexes dont les éléments constitutifs sont eux-mêmes des molécules toutes identiques. Les polymères sont à la base constituante des matières plastiques.

**Pouzzolane** : roche d'origine volcanique alvéolaire et scoriacée, de couleur rougeâtre ou noirâtre, utilisée comme granulats pour la confection de bétons légers ou comme constituant secondaire des ciments.

**Précipitation** : action chimique par laquelle un corps en solution s'isole de son solvant et se dépose au fond.

**Pré-traitement** : première étape de l'épuration des eaux d'égout, des sédiments, etc., comportant le dégrillage, le broyage ou dans certains cas le dessablage, et destiné à préparer ces eaux et sédiments pour un traitement plus élaboré.

**Récupération** : séparation de certains produits ou matériaux des déchets à des fins de réemploi, de réutilisation ou de recyclage.

**Recyclage** : réintroduction d'un matériau récupéré dans le cycle de production dont il est issu.

**Réduction** : l'application de techniques plus efficaces qui gaspillent moins de matières premières et l'amélioration de mesures internes pour éliminer les déversements (ex. Remplacement du verre de styromousse ou de papier par la tasse à café en porcelaine).

**Régénération** : traitement visant à rendre à un produit souillé ou usé, son état et ses qualités premières, le rendant propre à la même utilisation (par ex. Régénération des huiles et des solvants).

**Résidu** : matière qui reste après une opération chimique ou physique, une transformation. Sous-produit d'un procédé industriel qui ne sert pas à des fins commerciales, mais qui peut servir à d'autres fins (énergie, matériau de remplissage, matière première pour une autre industrie, ..etc.).

**Sable** : type de sol non cohésif, composé de grains d'un diamètre compris entre 0.06 mm et 2 mm.

**Sédiments** : couche de matériaux provenant de n'importe quelle source, roche, matière organique ou volcanique, et transportés par l'eau depuis le lieu d'origine jusqu'au lieu de dépôt. Dans les cours d'eau, les sédiments sont des matériaux alluvionnaires transportés en suspension ou par charriage.

**Sels** : se dit d'un composé d'un ion positif, autre que  $H^+$ , avec un ion négatif autre que  $OH^-$ . Les sels peuvent être formés de diverses manières, notamment par l'action d'un acide sur un métal, une base, un oxyde ou sur un autre sel.

**Site orpheline** : se dit d'un site contaminé dont le propriétaire est non identifiable ou non solvable.

**Solidification** : procédé pour convertir les sols, les boues, les sédiments, ou les déchets liquides dans un produit solide monolithique qui peut être plus facilement manipulé et qui réduit également la valorisation et la lixiviation des contaminants des déchets ou matrices traités.

**Stabilisation** : procédé pour réduire physiquement ou chimiquement le potentiel dangereux des déchets en convertissant les contaminants toxiques en une forme moins mobile ou réactive.

**Substance toxique** : substance pouvant causer la mort, la maladie, des anomalies du comportement, le cancer, des mutations génétiques, des anomalies de la physiologie ou de la reproduction, des déformations physiques....

**Sulfates** : terme générique pour les sels dont l'anion est du sulfate. Les sulfates sont des produits naturels ou sont formés par l'action de l'acide sulfurique.

**Technologies d'assainissement** : technologies visant l'épuration des rejets d'un procédé, soit au niveau des émissions atmosphériques, soit au niveau des eaux usées ou au niveau des déchets. Comparativement aux technologies propres, ce sont des technologies qui sont insérées à la toute fin du procédé.

**Traitement biologique** : procédé de traitement qui utilise les microorganismes pour briser les contaminants toxiques des déchets en composés moins toxiques..

**Traitement chimique** : procédé de traitement qui modifie la structure chimique des contaminants toxiques des déchets pour réduire la toxicité, la mobilité ou le volume des déchets.

**Traitement des déchets** : ensemble d'opérations effectuées sur les déchets, en vue de réduire leur nocivité éventuelle pour l'environnement, de faciliter leur manipulation ou leur transport ou de les valoriser.

**Traitement in situ** : procédé qui traite les matrices contaminées (sols, boues, eaux souterraines, sédiments) en place sans excavation des matrices. Les procédés in situ peuvent être physiques, biologiques, thermiques ou chimiques.

**Traitement physique** : procédé de traitement qui modifie la structure physique des contaminants des déchets pour en réduire la toxicité, la mobilité ou le volume.

**Traitement thermique** : procédé de traitement qui est conçu pour oxyder les substances organiques dangereuses en dioxyde de carbone et en eau.

**Valorisation des déchets** : qualifie tout traitement des déchets qui permet de leur trouver une utilisation ayant une valeur économique positive, soit sur le plan énergétique soit sur le plan de la récupération de matières premières.

**Zone non saturée** : zone sous la surface où l'eau est présente à des pressions inférieures à la pression atmosphérique et les gaz, aux pressions atmosphériques. Cette zone est aussi connue comme la zone vadose.

**Zone saturée** : zone sous la surface des sols où l'eau remplit les interstices sous des pressions plus grandes ou égales à la pression atmosphérique.

**Zone humide** (habitat humide): les terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hydrophiles pendant au moins une partie de l'année.