



GROUPE D'ETUDES ET D'OBSERVATION
SUR LES DRAGAGES ET L'ENVIRONNEMENT

Guide méthodologique sur le dragage par injection d'eau

Décembre 2012





GEODE



Auteurs du document :

- Robin SIGWALD, ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT,
- Sébastien LEDOUX, ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT,
- Dr Kate SPENCER, QUEEN MARY UNIVERSITY.



1 - INTRODUCTION	1
1.1 - CONTEXTE.....	1
1.2 - OBJET DU GUIDE METHODOLOGIQUE.....	1
2 - PRESENTATION GENERALE DES DRAGAGES HYDRODYNAMIQUES	3
2.1 - DRAGAGE PAR AGITATION (DIT « A L'AMERICAINE »).....	3
2.2 - DRAGAGE A INJECTION D'AIR	4
2.3 - DRAGUE A CHARRUE	4
2.4 - ROTODEVASAGE	5
2.5 - DRAGAGE A INJECTION D'EAU (WATER INJECTION DREDGING)	6
3 - TECHNIQUES ET EMPLOIS DU DRAGAGE A INJECTION D'EAU	7
3.1 - PROCESSUS PHYSIQUES	7
3.1.1 - CARACTERISTIQUES DU COURANT DE DENSITE	8
3.1.2 - QUANTIFICATION DES VOLUMES DRAGUES	10
3.2 - HISTORIQUE ET PRATIQUES DU DRAGAGE A INJECTION D'EAU DANS LE MONDE	11
3.2.1 - HISTORIQUE.....	11
3.2.2 - UTILISATIONS RECENTES DU DRAGAGE A INJECTION D'EAU.....	11
3.3 - MISE EN ŒUVRE DU DRAGAGE A INJECTION D'EAU	15
3.3.1 - APPLICATIONS GENERALES DU DRAGAGE A INJECTION D'EAU	15
3.3.2 - APPLICABILITE DE LA TECHNIQUE SUR UN SITE DETERMINE	15
3.3.3 - COMPLEMENTARITE AVEC LES AUTRES TECHNIQUES DE DRAGAGE.....	18
4 - INCIDENCES POTENTIELLES DU DRAGAGE A INJECTION D'EAU	19
4.1 - DESCRIPTION GENERALE DES INCIDENCES POTENTIELLES IDENTIFIEES	19
4.2 - INCIDENCES SUR LE MILIEU PHYSIQUE	22
4.2.1 - MODIFICATION DES FONDS.....	22
4.2.2 - ÉQUILIBRE HYDROSEDIMENTAIRE	23
4.2.3 - QUALITE DE L'EAU.....	24
4.2.4 - BILAN DES INCIDENCES SUR LE MILIEU PHYSIQUE	31
4.3 - INCIDENCES SUR LE MILIEU VIVANT	32
4.3.1 - QUALITE DE L'HABITAT	32
4.3.2 - ESPECES BENTHIQUES	32
4.3.3 - ESPECES DEMERSALES	33
4.3.4 - ESPECES PELAGIQUES	33
4.3.5 - AVIFAUNE.....	33
4.3.6 - BILAN DES INCIDENCES SUR LE MILIEU VIVANT	34
4.4 - INCIDENCES SUR LES ACTIVITES HUMAINES	35
4.4.1 - RISQUE SANITAIRE	35
4.4.2 - NAVIGATION.....	35
4.4.3 - PECHE.....	35
4.4.4 - PRISES D'EAU INDUSTRIELLES.....	36
4.4.5 - BILAN DES INCIDENCES SUR LES ACTIVITES HUMAINES	36
5 - METHODES D'EVALUATIONS PREALABLES ET DE SUIVIS.....	37
5.1 - APPROCHE GENERALE	37



5.2 - ÉVALUATION DES INCIDENCES DU COURANT DE DENSITE	37
5.2.1 - ANALYSE PREALABLE DE LA TRAJECTOIRE DU COURANT DE DENSITE.....	37
5.3 - SUIVIS MIS EN PLACE SUR LES SITES AYANT PRATIQUE LE DRAGAGE A INJECTION D'EAU – SUIVIS EXPERIMENTAUX	40
5.3.1 - STRATEGIE GENERALE DES SUIVIS ETUDIES	40
5.3.2 - SUIVIS SCIENTIFIQUES OU EXPERIMENTAUX.....	41
5.4 - PROPOSITIONS D'ELEMENTS DE SUIVI OPERATIONNEL	44
6 - ÉTUDES DE CAS.....	47
6.1 - INTRODUCTION.....	47
6.2 - ÉTUDE DE CAS N°1 : DRAGAGE DANS UN PORT ESTUARIE.....	47
6.2.1 - CONTEXTE.....	47
6.2.2 - ZONES DRAGUEES.....	48
6.2.3 - MISE EN ŒUVRE DU DRAGAGE A INJECTION.....	48
6.2.4 - OBJECTIFS DE SUIVIS	48
6.3 - ÉTUDE DE CAS N°2 : DRAGAGE DANS UN PORT FLUVIAL	49
6.3.1 - CONTEXTE.....	49
6.3.2 - ZONES DRAGUEES.....	49
6.3.3 - MISE EN ŒUVRE DU DRAGAGE A INJECTION.....	49
6.3.4 - OBJECTIFS DE SUIVIS	49
6.4 - ÉTUDE DE CAS N°3 : DRAGAGE DANS UN BASSIN PORTUAIRE.....	50
6.4.1 - CONTEXTE.....	50
6.4.2 - ZONES DRAGUEES.....	50
6.4.3 - MISE EN ŒUVRE DU DRAGAGE A INJECTION.....	50
6.4.4 - OBJECTIFS DE SUIVIS	50
7 - APPROCHE REGLEMENTAIRE	51
7.1 - CONTEXTE.....	51
7.2 - EXEMPLES DE REGLEMENTATIONS EXISTANTES EN EUROPE	51
7.2.1 - ALLEMAGNE	51
7.2.2 - ROYAUME-UNI	51
7.3 - RECOMMANDATIONS SUR LES CRITERES A PRENDRE EN COMPTE	52
BIBLIOGRAPHIE.....	53
ANNEXE 1 : ENGIN DE DRAGAGE A INJECTION D'EAU REPERTORIES (2012)	57
ANNEXE 2 : UTILISATION DU DRAGAGE A INJECTION A L'ETRANGER.....	60



1 - INTRODUCTION

1.1 - Contexte

La sédimentation dans les ports est un problème de premier ordre du fait des enjeux socio-économiques et environnementaux qui en découlent. Une certaine profondeur doit être maintenue pour le bon fonctionnement des ports et la sécurité des navires et de leurs équipages, et cela en respectant le mieux possible la sensibilité de l'environnement.

Chaque année, environ 35 à 40 millions de m³ de sédiments sont dragués en France pour des opérations d'entretien, 90% de ce volume étant réalisé par les grands ports estuariens. Le dragage est par ailleurs très souvent le premier poste de dépense dans un port, quelle que soit sa taille. Face à ces enjeux économiques et environnementaux, le choix de la technique de dragage est essentiel. Il est essentiel de trouver un juste compromis entre coût, efficacité, et impact environnemental.

Le dragage par injection d'eau présente un intérêt croissant pour de nombreux ports, que ce soit pour les grands ports maritimes mais également pour les ports de taille plus modeste. Son coût est généralement faible comparé aux autres techniques, et son efficacité apparaît supérieure dans les conditions où son utilisation est recommandée.

De nombreuses opérations ou expérimentations, à l'étranger puis plus récemment en France, ont été menées dans les 20 dernières années afin de mieux étudier cette technique et d'en évaluer les impacts. Le dragage par injection d'eau, en particulier, a ainsi fait l'objet de nombreuses études et expériences, en raison de son impact limité en comparaison des autres techniques hydrodynamiques.

1.2 - Objet du guide méthodologique

Ce guide, produit par le groupe GEODE (Groupe d'Etude et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement) a pour but de collecter, compiler la bibliographie et analyser toutes les expériences menées jusqu'à présent de manière dispersée en France et dans le monde sur le dragage par injection d'eau. Chaque projet de dragage devant être étudié au cas par cas selon les caractéristiques et spécificités du site, ce guide a pour objectif de fournir des éléments d'aide à la décision et à l'analyse dans la préparation du projet, ainsi que les panels d'outils nécessaires à l'étude et au suivi d'un projet de dragage à injection d'eau.

Le contenu du document s'appuie sur les retours d'expériences étudiés par ARTELIA, en association avec Kate SPENCER, de l'Université Queen Mary de Londres.

Ce guide n'a pas pour objet d'imposer des critères stricts d'analyse, mais bien des éléments de méthodes et d'analyse, illustrés pour une meilleure compréhension des mécanismes en jeu. Il s'adresse à l'ensemble des acteurs impliqués dans la réalisation d'opérations de dragage à injection d'eau, mais également dans la réflexion sur les impacts environnementaux associés : maîtres d'ouvrage, maîtres d'oeuvre, services instructeurs, services techniques des collectivités, bureaux d'études, associations...



Constitué de six chapitres, il aborde successivement :

- une présentation générale des dragages hydrodynamiques,
- des éléments de techniques et des conditions d'emploi du dragage à injection d'eau,
- les incidences potentielles du dragage à injection d'eau,
- les méthodes d'évaluation préalable et de suivi de ces opérations,
- des recommandations en termes de suivis sur la base de cas types.
- un focus sur les aspects réglementaires.

2 - PRESENTATION GENERALE DES DRAGAGES HYDRODYNAMIQUES

Le dragage à injection d'eau fait partie de la famille des procédés de dragage hydrodynamique. Cette famille inclut toutes les techniques de dragage ayant pour principe de remettre en mobilité les sédiments, notamment en utilisant l'action des courants naturels, soit :

- le dragage par agitation,
- le dragage à injection d'air,
- le dragage à charrue,
- le rotodévasage,
- le dragage à injection d'eau, objet du présent guide.

Il convient de bien distinguer ces différentes techniques dont les utilisations, conditions d'emploi et impacts environnementaux peuvent être assez fondamentalement différents. Une étude du CETMEF (2009) détaille en particulier ces techniques et leurs usages en France.

2.1 - Dragage par agitation (dit « à l'américaine »)

L'objectif de ce procédé est de remettre en suspension les sédiments ciblés. L'agitation peut être faite par :

- brassage des sédiments dans la colonne d'eau avec un jet d'eau puissant et/ou par le raclement d'un outil sur le fond,
- élévation à l'aide d'un système de pompage. Par exemple, une drague aspiratrice en marche maintenant une surverse totale en permanence (US Army Corps of Engineers, 1983) ou refoulant les matériaux sur le côté (sidecasting).

Cette dernière technique était par exemple pratiquée sous cette forme par le Port Autonome de Nantes-Saint-Nazaire jusqu'au début des années 2000 (disparition totale de cette technique depuis 2006). Le rendement dépend alors directement du débit de pompage de la drague (qui peut monter jusqu'à 10 000 m³/h de sédiments pour les plus importantes) et non uniquement du volume des puits, contrairement à l'usage traditionnel de la drague en marche.



Figure 2-1 : La drague à agitation « Neptune » (source : terra et aqua), et la drague « Side Cast Merrit » (US Army)

Le nuage créé est repris par les courants et réinséré dans le transit sédimentaire local. Cette méthode ne peut donc être utilisée que dans des zones caractérisées par un fort courant local ou en période de vives-eaux.

Le choix de la puissance du jet est un compromis entre coût, efficacité et impact environnemental. Elle doit être suffisante par rapport au type de sédiment à agiter et à la vitesse de remise en suspension souhaitée.



Le dragage par agitation est reconnu comme étant efficace et peu coûteux. Les engins utilisés sont généralement plus petits que ceux mis en place pour des dragages hydrauliques ou mécaniques, maniables, et capables de draguer dans des zones autrement difficiles d'accès, comme par exemple à proximité d'un quai.

2.2 - Dragage à injection d'air

Ce type de dragage utilise un système d'injection d'air afin de remettre en suspension les sédiments. L'air sous pression est pulvérisée dans le sédiment afin de détruire la cohésion des sédiments et de les disperser dans la colonne d'eau.

Cette technique est peu utilisée du fait de sa moindre efficacité par rapport au dragage à injection d'eau.



Figure 2-2 : La drague Airset (Dutch Dredging)

2.3 - Drague à charrue

Le passage d'une charrue ou d'une niveleuse permet de déplacer des quantités limitées de sédiments d'un site à l'autre. La zone de destination des matériaux peut être soit conservative, en vue d'une extraction ultérieure par des techniques classiques, soit dispersive, en vue d'une érosion entraînant le retour des matériaux dans le processus sédimentaire naturel du site.



Figure 2-3 : La drague à charrue Alligator (DEME) et détail d'une niveleuse (source Anthony Bates Partnership)



La charrue se charge de matériaux au fur et à mesure qu'elle est traînée sur le fond marin. Elle laisse ensuite les sédiments accumulés à l'endroit visé, puis répète la manœuvre autant de fois que nécessaire. Elle peut éventuellement être équipée d'un jet d'eau ou d'un système d'injection d'air pour faciliter son passage.

Sa simplicité de mise en œuvre fait qu'elle est utilisée pour des petits projets d'entretien régulier, évitant ainsi l'installation d'équipements plus lourds et plus coûteux.

Il existe des dragues à charrue de différentes tailles. La largeur d'une charrue peut varier entre 3 et 35 m, et sa surface entre 1,5 et 50 m².

2.4 - Rotodévasage

Le dragage par rotodévasage utilise une fraise montée sur une rampe à l'avant d'un navire. La rotation de la fraise permet de remettre les sédiments en suspension, qui sont ensuite dispersés par les courants locaux.



Figure 2-4 : Rotodévaseur « Le Rochevilaine » utilisé dans l'estuaire de la Vilaine (source : CETMEF)

Cette technique est notamment utilisée sur l'estuaire de la Vilaine et en Charente-Maritime dans les chenaux ostréicoles peu profonds.

2.5 - Dragage à injection d'eau (Water Injection Dredging)

La technique de dragage par injection d'eau repose également sur un principe de remise en mobilité. Un jet d'eau sous basse pression est envoyé dans la couche sédimentaire pour créer un courant de densité. Les sédiments sont alors pris dans ce courant et emportés vers un point plus « bas » situé en aval de l'écoulement.



Figure 2-5 : Navire HAM 307

La puissance des jets doit être adaptée à la distance que doit couvrir le courant de densité, à l'hydraulique du site et à la nature des sédiments en présence.

Les débits en eau d'une drague à injection varient généralement entre 1 000 et 12 000 m³ par heure suivant les dragues. Son usage commence à se développer en France, notamment dans l'estuaire de la Loire où le GPMNSN a mis en service un engin de ce type depuis juin 2011.

Cette technique est détaillée dans les paragraphes suivants.

3 - TECHNIQUES ET EMPLOIS DU DRAGAGE A INJECTION D'EAU

Sont présentées dans ce chapitre les principales techniques du dragage à injection d'eau et processus physiques associés, ainsi que les conditions d'emploi.

3.1 - Processus physiques

L'action d'une drague à injection d'eau dans la couche de sédiments se décompose en trois phases (voir figure ci-dessous) :

- I. Injection d'eau à basse pression,
- II. Génération du courant de densité,
- III. Déplacement des sédiments.

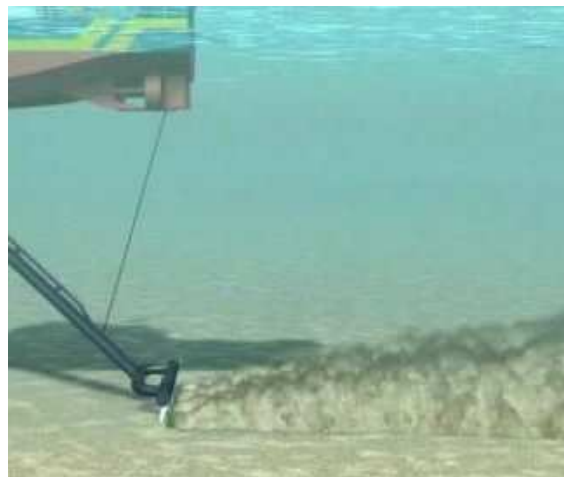
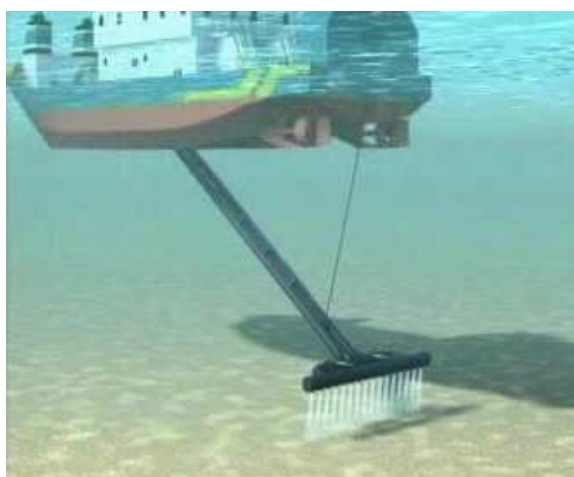
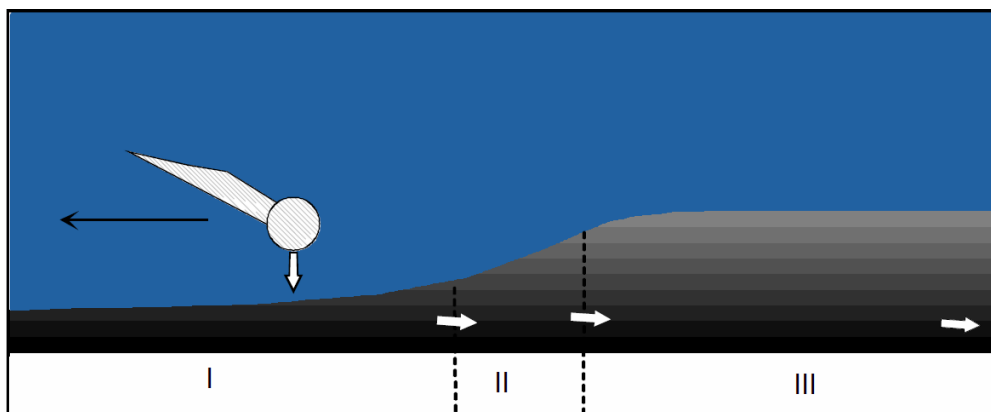


Figure 3-1 : Principe du dragage à injection d'eau (MEYER 2000) et visualisation graphique du courant de densité (DELFT-VAN OORD)

L'injection d'eau à basse pression implique l'apport de grandes quantités d'eau. Celle-ci est pompée en surface à proximité de la drague, puis est injectée localement à faible pression (d'environ 1,5 bar selon ESTOURGIE 1989) dans la couche de sédiments par le biais d'une série de buses réparties sur une barre horizontale (AIPCN, 2012). Ces jets d'eau réduisent la cohésion entre les particules de sédiment et créent un mélange turbulent d'eau et de sédiments. Ce mélange eau-sédiments a une densité plus forte que l'eau environnante et a donc des caractéristiques proches d'un liquide à très faible viscosité (Van Raalte & Bray, 1999). Le mélange est transporté horizontalement le long de l'interface sédiments-eau comme un écoulement par densité, influencé par la gravité et courants liés à la marée, la houle, ou les débits fluviaux (Commission Ospar, 2004).

Les sédiments sont ainsi remis en mobilité : un courant de densité se forme et se déplace à proximité du fond, avec des échanges très limités avec la colonne d'eau. Le principe est, en cela, opposé à celui des pratiques de dragage à agitation, qui remettent en suspension les matériaux dans l'ensemble de la colonne d'eau.

Le courant de densité est soumis à un équilibre entre la force de l'injection, l'action des courants locaux, la gravité, et les forces de frottement.

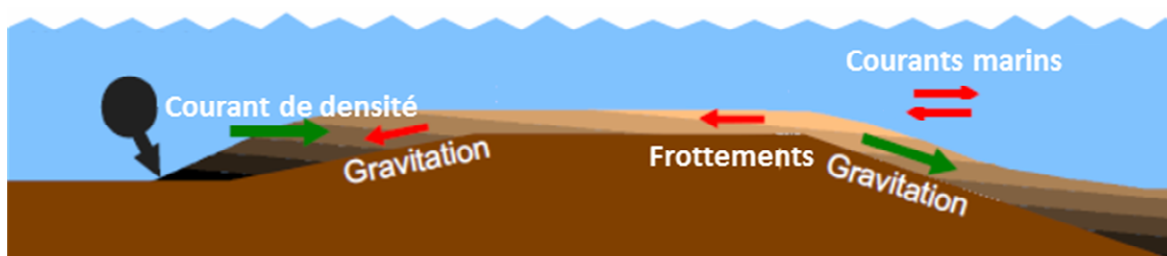


Figure 3-2 : Forces pouvant s'exercer sur le courant de densité (d'après MEYER 2000)

La distance finale de transport dépend de plusieurs facteurs, dont la densité et la composition des sédiments, la pente et la morphologie du fond (Van Raalte & Bray, 1999). À la différence d'autres techniques hydrodynamiques (par exemple le dragage par agitation), lors du dragage par injection d'eau, le mouvement vertical des sédiments est limité et les sédiments ne sont pas mis en suspension, prenant plutôt la forme d'un écoulement par densité juste au dessus du lit (AIPCN sous presse).

Il n'existe pas de zone « type » où le dragage à injection peut être pratiqué. Chaque site doit être analysé au cas par cas, selon ses caractéristiques.

3.1.1 - Caractéristiques du courant de densité

Le courant de densité se déplace sur le fond marin, sur une épaisseur de 1 à 3 m suivant les cas, et ne perturbe pas l'hydrodynamique générale du site (expérience de Port Edgar, Ecosse, MACKIE ET AL. 1994). La vitesse du courant de densité est variable suivant la morphologie de la zone et la vitesse des courants naturels, et est généralement de 0,3 à 2 m/s, (SOARES 2006, BORST 1994, MEYER 2000, GINGER 2011).

Le courant de densité est établi de manière temporaire, uniquement pendant la durée de fonctionnement de la drague. Il peut se propager à une distance allant de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres, suivant la nature des sédiments, la morphologie du site, et l'hydrodynamique locale (voir tableau 3.1) :



Tableau 3-1 : Exemples de distance de transport des sédiments

Site	Nature des sédiments	Détection des matières remises en mobilité	Source
Estuaire de l'Elbe (Kôhlfleet, Hambourg)	Vases	3 km	Meyer (2000)
Estuaire de la Gironde	Vases	300 m	Ginger (2011)
Estuaire de la Weser	Sables	50 m (écrêtage de dunes)	Stengel (2006)
Estuaire du Medway	Vases ou sables fins	200 m	HR Wallingford (2002)
Rivière Don	Vases à sables grossiers	6 km (reprise du traceur dans la dynamique sédimentaire)	Harvey et al. (2007)

Dans la plupart des cas, la distance sur laquelle le courant de densité se développe n'est estimée qu'à partir d'une mesure ponctuelle de turbidité identifiant sa présence. Sa limite précise n'est donc pas connue ; il est seulement possible de vérifier qu'il atteint une zone ou non.

Dans le cas de l'estuaire de la Gironde, une approche différente a été choisie en 2010. Le suivi du courant de densité a été réalisé à l'aide d'un ADCP embarqué à bord d'un navire pouvant suivre ainsi en temps réel son évolution. Le courant de densité a donc pu être suivi jusqu'à ce qu'il ne devienne plus détectable, donnant ainsi une indication plus précise sur son emprise réelle.

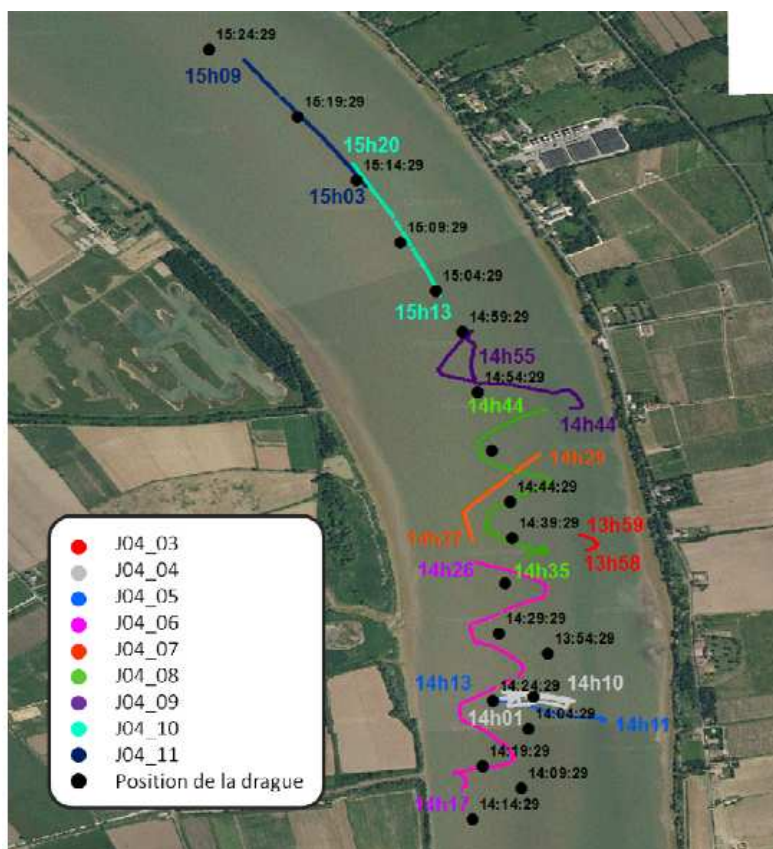


Figure 3-3 : Circulation du navire équipé de l'ADCP dans l'estuaire de la Gironde (GINGER 2011)

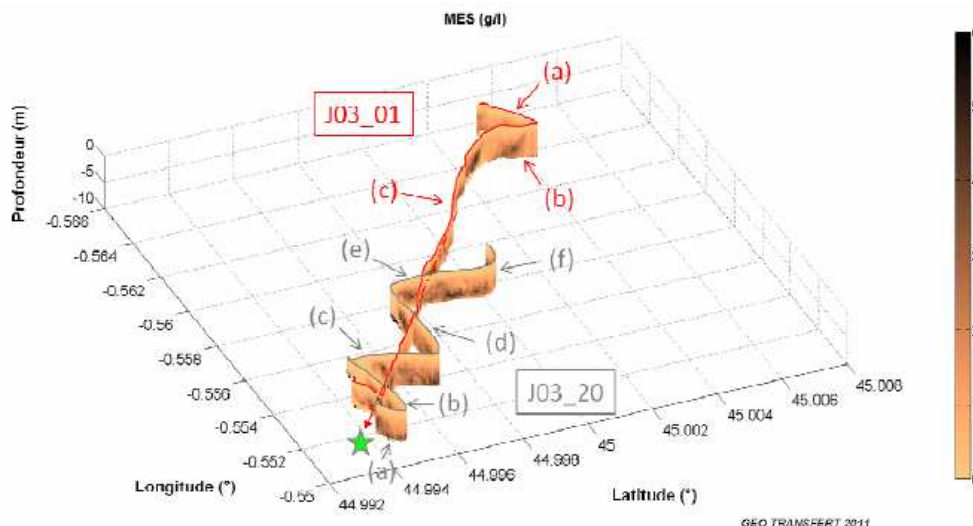


Figure 3-4 : Exemple de rendu pseudo-3D des mesures dans l'estuaire de la Gironde (GINGER 2011)

Une cartographie du courant de densité a donc pu être établie à l'issue de cette campagne de mesures, présentée sur la figure ci-dessous.

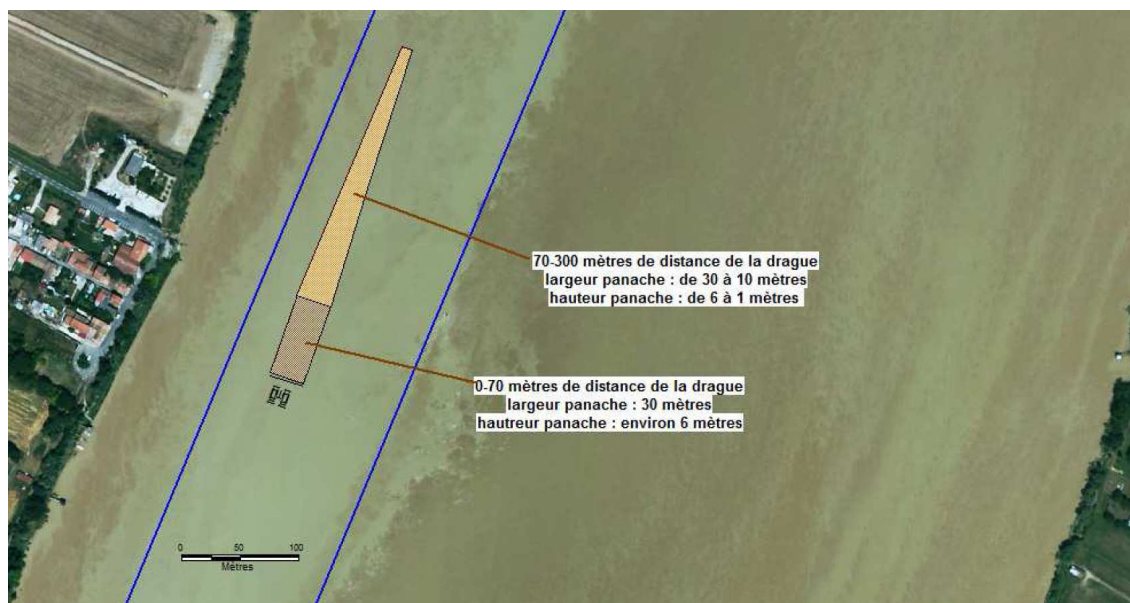


Figure 3-5 : Emprise spatiale du courant de densité dans l'estuaire de la Gironde (GINGER 2011)

3.1.2 - Quantification des volumes dragués

La quantification des volumes dragués est plus délicate avec un dragage à injection d'eau qu'avec les autres techniques plus « conventionnelles ». En effet, le processus de fluidification transforme les sédiments fins en une crème de vase peu dense, dont la limite est difficilement détectable par un levé bathymétrique classique. Cette couche se sédimente petit à petit après l'arrêt des opérations de dragage, rendant de plus la mesure de la cote atteinte variable au cours du temps, d'autant que, en milieu estuarien, l'action propre du fleuve continue dans l'intervalle, sous forme de sédimentation ou d'érosion.



Pour ces raisons, les entreprises de dragages ou les maîtres d'ouvrage privilégient les contrats forfaitaires ou de type affrètement (à l'heure ou à la journée) pour se faire rémunérer. Afin de vérifier les cotes après dragage, il est conseillé :

- de fixer préalablement la densité associée au « fond » ciblé, ainsi que la fréquence d'échantillonnage des instruments de mesure,
- de réaliser les levés quelques temps après le dragage afin de prendre en compte la sédimentation et le tassement des matériaux (1 à 2 semaines suivant les cas).

Les méthodes utilisées pour quantifier les volumes dragués sont donc très variables suivant les sites.

3.2 - Historique et pratiques du dragage à injection d'eau dans le monde

3.2.1 - Historique

Les premières théories avançant la possibilité d'utiliser des forces hydrodynamiques locales pour des opérations de dragage datent des années 1980 et ont été initiées aux Pays-Bas. Une série d'expériences, dont les résultats ont été publiés en 1986, ont confirmé l'efficacité d'un courant de densité pour transporter les sédiments. En 1987, le premier engin de dragage hydrodynamique par injection d'eau, le Jetsed (Van Oord), est construit.

Depuis, le parc d'engins s'est fortement développé. Les engins en activité sont listés en annexe 1.

3.2.2 - Utilisations récentes du dragage à injection d'eau

3.2.2.1 - Utilisations en France

La technique du dragage à injection d'eau est utilisée à titre expérimental en France depuis les années 1990, et de manière plus répandue sur ces dernières années. Le tableau en page suivante résume succinctement les opérations réalisées :



Tableau 3-2 : Utilisation du dragage à injection en France

NR : Non renseigné X : suivi réalisé 0 : suivi non réalisé

Site	Régime	Date	Durée (jours ou heures)	Volume (m ³)	Sédiment	Contaminant	Suivi		
							Phy	Chim	Bio
Dunkerque Gravelines	Côtier	1989 1991	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
Rouen	Fluvial	2001 à 2011	400h par an	50 000 à 150 000 m ³ par an	Vaseux et sableux	NR	X	X	0
Boulogne Calais	Côtier	2002	4 j	NR	Vases	NR	X	0	0
Nantes	Estuaire	2006 à 2011	2009: 749h 2010: 650h 2011: 437h	1 à 2 millions de m ³ / an	Vases	Faibles < N1	X	X	0
Bordeaux	Estuaire	2009 2011	2009 : 10,5j 2011 : 30 j	420 000m ³ en 2009	Vases	Faibles < N1	X	X	X
Bayonne	Estuaire	2010 2011	2010 : 5j 2011 : 9j	60 000 m ³ en 2010	Vases et sables	Faibles <N1	X	X	X
Le Havre	Estuaire	2002 à 2007	10 jours par campagne (2-3 fois par an)	20 000 à 30 000 m ³ par campagne	NR	NR	X	0	0

3.2.2.2 - Utilisations à l'étranger

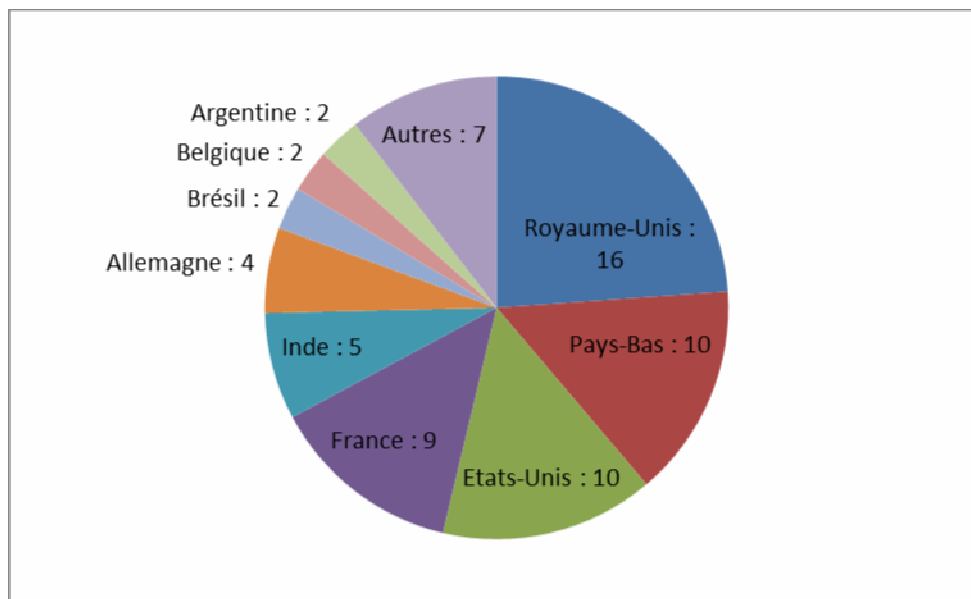
Le dragage à injection d'eau est aujourd'hui couramment utilisé dans de nombreux pays et notamment en Europe.

Le Royaume-Uni, les Pays-Bas, l'Allemagne et les Etats-Unis sont les 4 pays où l'utilisation du dragage à injection est historiquement la plus répandue. Les premières opérations datent de la fin des années 1980 ou du début des années 1990. Le dragage à injection est utilisé tout particulièrement en milieu fluvial ou estuarien.

Dans la plupart des sites, un suivi expérimental a été mis en place avant que le dragage à injection ne soit utilisé à grande échelle, afin de bien identifier les incidences potentielles locales de la technique. Suivant les conclusions de ces études, le dragage à injection pouvait être pratiqué ou non sur le site, avec un protocole de suivi plus allégé.

Les suivis mis en place visaient initialement à déterminer l'efficacité et la rentabilité de la technique, notamment vis-à-vis des autres équipements de dragage existants. Ce n'est qu'au milieu des années 1990 et dans les années 2000 que les suivis environnementaux et les premières modélisations se sont développés, dans un souci de bien identifier les incidences potentielles du dragage.

Aujourd'hui, le dragage à injection est couramment utilisé sur des opérations d'entretien et même d'approfondissement (Kakinda en Inde), parfois échelonnées sur plusieurs années (Mississippi), sur toute la surface du globe (voir figure ci-après).



Autres = Chine, Nouvelle-zélande, Bangladesh, Yemen, Irlande, Italie, Tanzanie

Figure 3-6 : Répartition des projets de dragage à injection recensés

La carte suivante (complétée d'après MEYER 2000, ATHMER 2004, WILSON 2008 et AIPCN 2012) décrit la situation des différentes opérations ou expériences de dragage par injection d'eau qui ont pu être recensées jusqu'à présent (voir tableau en Annexe 2 pour plus de détails).

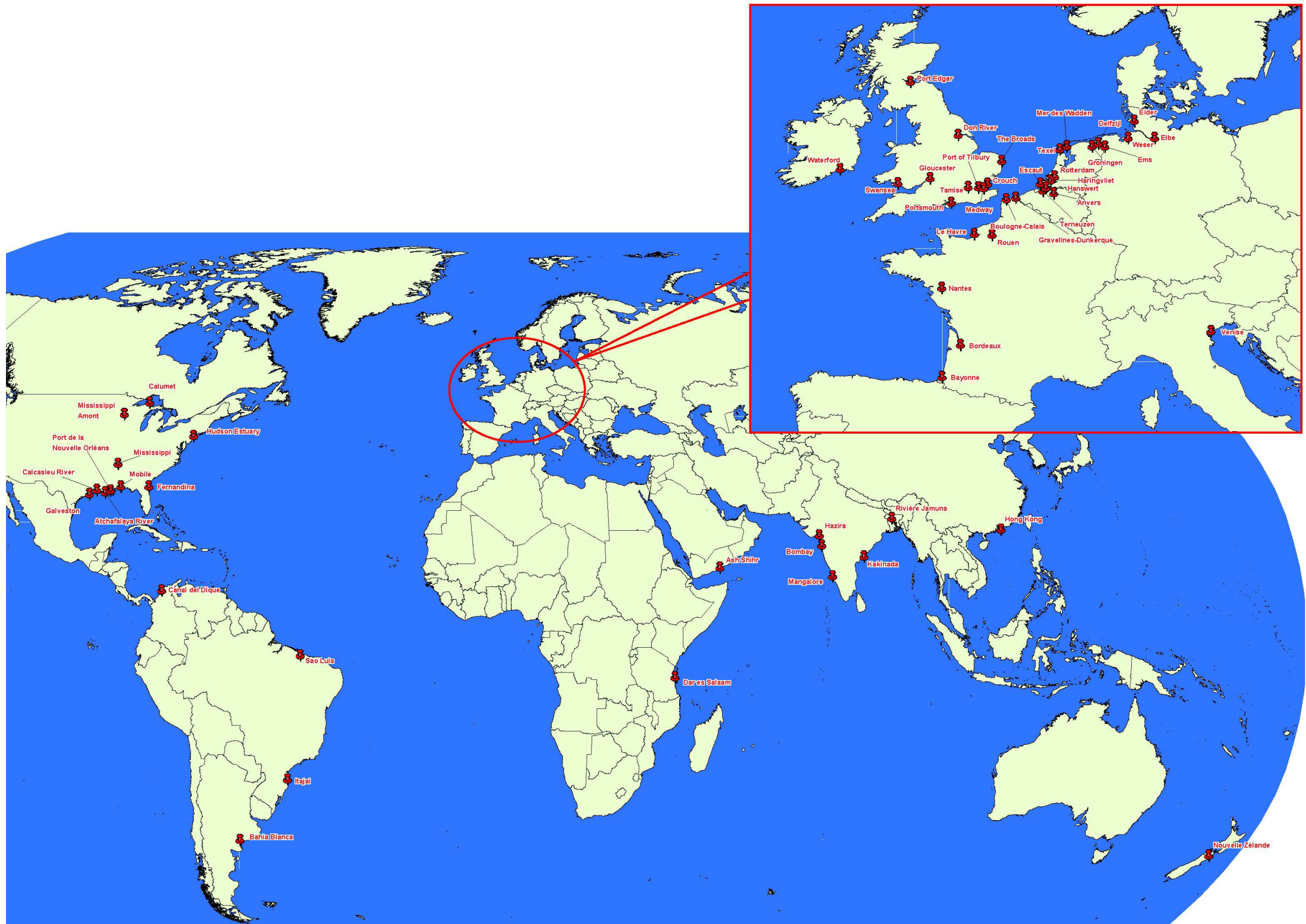


Figure 3-7 : Situation des projets de dragage à injection recensés



3.2.2.3 - Caractéristiques des sites

L'utilisation du dragage à injection sur un site particulier est principalement conditionnée par :

- la nature des sédiments,
- la morphologie du site (pentes, bathymétrie),
- l'hydrodynamique (débits fluviaux, marée).

Ces paramètres étant indépendants et très variables suivant les sites, il n'existe pas de « profil type » de zone où le dragage à injection peut être pratiqué. L'évaluation de la possibilité de pratiquer le dragage à injection se fait donc au cas par cas (voir partie suivante).

3.3 - Mise en œuvre du dragage à injection d'eau

3.3.1 - Applications générales du dragage à injection d'eau

Les différents retours d'expériences disponibles permettent de lister les applications générales du dragage à injection :

- entretien général des chenaux (Loire, Gironde, Seine, Tamise, Elbe...),
- dragage des souilles ou d'une zone d'évitage et de mouillage (Medway, Loire, Gironde, Bayonne, Rouen...),
- entretien d'écluse / porte à flot (Anvers, Londres...),
- écrêtages de dunes / rides / sillons de Drague Aspiratrice en Marche (Rouen, estuaire de la Weser) : opérations courtes et localisées sur des sédiments fins à grossiers,
- entretien des conditions hydrauliques locales (Rouen),
- rechargement d'estran / zone intertidale / marais (Medway) : dragage de sédiments très fins vers l'estran, en profitant du flot pour renforcer le courant de densité,
- soutien à autres techniques de dragage (Boulogne/Calais, Kakinda, Mangalore...) : relocalisation pour reprise à la Drague Aspiratrice en Marche,
- dragage sur des zones où passent des câbles sous-marins ou des conduites (Rouen, Terneuzen).

Ces éléments sont décrits dans les paragraphes suivants.

3.3.2 - Applicabilité de la technique sur un site déterminé

3.3.2.1 - Type et nature des sédiments dragués

La distance du transport de matériaux dépend de l'épaisseur initiale du courant de densité, de la vitesse de sa propagation, et de la vitesse de sédimentation des matériaux dragués, ces paramètres étant influencés par la profondeur de pénétration de l'injection d'eau dans le sédiment (AIPCN 2012). Les applications sont donc différentes suivant la nature des sédiments de la zone à draguer et fortement dépendantes de celle-ci.



3.3.2.1.1 - Sédiments vaseux à fins

Le dragage à injection est le plus généralement utilisé sur des sédiments fins ou des vases, susceptibles d'être fluidifiés et remis en mobilité facilement. Cependant, des matériaux trop cohésifs risquent de se réagréger (floculation) durant le processus et de diminuer ainsi l'efficacité de la technique en accroissant la vitesse de dépôt des sédiments. La détermination de la contrainte de cisaillement des matériaux présents est donc essentielle pour déterminer la faisabilité du dragage à injection dans ce cas et son efficacité potentielle.

Le dragage à injection d'eau est tout particulièrement efficace dans le cadre d'opérations d'entretien, la pénétration du jet étant plus facile dans les matériaux peu consolidés (AIPCN 2012).

La propagation du courant de densité peut se faire sur plusieurs centaines de mètres ou plusieurs kilomètres (AIPCN 2012) dans des conditions favorables sur le plan hydrodynamique. Les sédiments sont envoyés soit vers une sur-profondeur pour dépôt, soit vers une zone dynamique pour réinjection dans le cycle sédimentaire.

Il est d'usage de commencer les opérations de dragage à partir du site de destination pour faciliter la circulation du courant de densité.

3.3.2.1.2 - Sédiments moyens à grossiers

Pour les sédiments plus grossiers, non cohésifs, le diamètre moyen des matériaux influe directement sur leur vitesse de dépôt une fois fluidifiés (AIPCN 2012). Pour des sédiments de plus de 0,2 mm de diamètre, la morphologie du site et l'hydrodynamique sont particulièrement importantes pour permettre l'usage du dragage à injection d'eau (Knox et al. 1994). Les sédiments trop grossiers sédimentent trop rapidement pour que le courant les transporte de manière satisfaisante.

Le courant de densité ne peut s'établir que sur de faibles distances (< 50 m). Dans le cas d'un écrêtage de dunes, les sédiments se déposent de part et d'autre des crêtes, dans les sillons. L'opération peut être renouvelée plusieurs fois (généralement pas plus de deux ou trois fois) pour transporter les matériaux à l'endroit ciblé.

3.3.2.2 - Contexte hydro-morphologique

L'utilisation du dragage à injection sur un site particulier est principalement conditionnée par :

- la morphologie du site (pente, bathymétrie), permettant un déplacement du courant de densité par gravité,
- l'hydrodynamique (débits fluviaux, marée) qui favorise ou au contraire ralentit la progression du courant de densité.

L'entretien et la propagation du courant de densité sont ainsi fortement favorisés par :

- la présence d'un chenal de transport canalisant les écoulements,
- des pentes importantes dirigées vers le site de destination (certains projets de dragage par injection d'eau ont été réalisés sur des pentes faibles de 1 : 1000, dans un chenal ou avec un canal de transport, Borst 1994, Wilson 2008),
- des courants locaux (fluviaux ou de marée) dans le même sens que le courant de densité (généralement un maximum de l'ordre du mètre par seconde pendant le dragage dans les différents projets étudiés).

3.3.2.3 - Check-list du projet de dragage à injection d'eau

Le diagramme ci-dessous récapitule les éléments techniques fondamentaux à prendre en compte, au cas par cas, dans la mise en œuvre d'un dragage à injection d'eau.

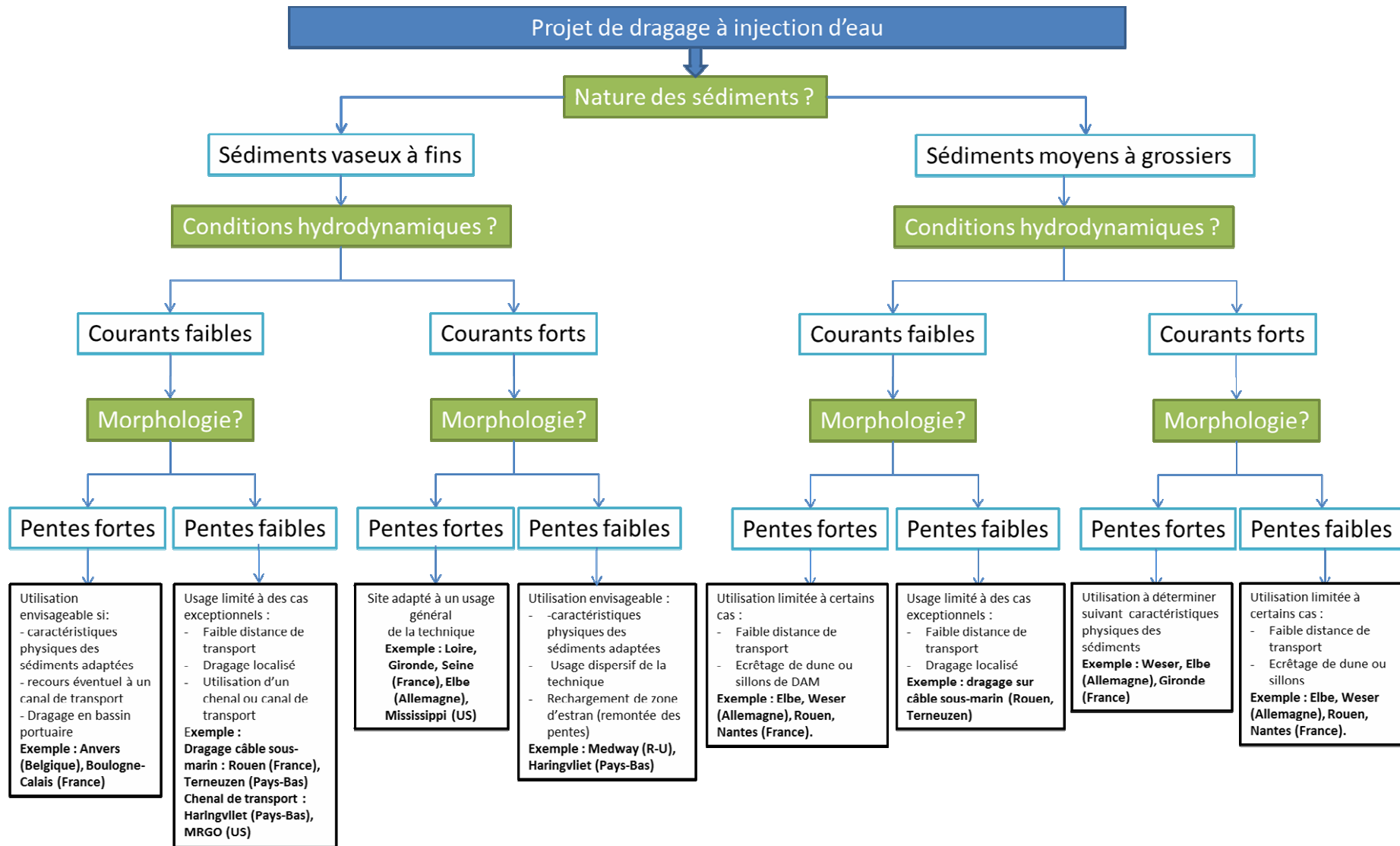


Figure 3-8 : Éléments techniques élémentaires à prendre en compte pour une opération de dragage à injection d'eau

3.3.3 - Complémentarité avec les autres techniques de dragage

Le dragage à injection d'eau est principalement utilisé en milieu fluvial ou estuarien, où les conditions lui sont le plus souvent favorables grâce aux forts courants générés par la marée et les débits fluviaux combinés. Dans des conditions le permettant (cf. chapitre précédent), sa mise en oeuvre a souvent permis de réduire considérablement l'utilisation des autres techniques de dragage pour l'entretien général des chenaux de navigation, où l'engin le plus couramment utilisé était la drague aspiratrice en marche ou la drague stationnaire (Loire, Elbe...). L'efficacité du dragage à injection n'a, de plus, pas d'équivalent pour les opérations d'écrêtage de dunes ou de rides, comme démontré par les expériences menées en Allemagne sur l'Elbe.

Les spécificités de la drague à injection d'eau permettent de l'utiliser avec une grande efficacité de manière complémentaire avec les autres techniques de dragage (hydrauliques ou mécaniques) :

- le dragage par injection d'eau peut être utilisé en complément d'une Drague Aspiratrice en Marche afin d'écrêter les sillons laissés par celle-ci (voir figure ci-après) (Weser, Elbe, Loire, Gironde...),
- le dragage par injection d'eau peut déplacer les matériaux vers une zone accessible à d'autres techniques de dragage (déplacement des matériaux depuis les bords de quais vers le centre d'un bassin portuaire pour être repris à la DAM, comme utilisé à Anvers ou à Boulogne-Calais).
- utilisation préventive du dragage par injection d'eau pour entretenir les conditions hydrauliques locales. Les phénomènes d'érosion naturelle des matériaux récemment déposés sont favorisés, réduisant ainsi l'effort de dragage imposé aux autres techniques (Rouen).

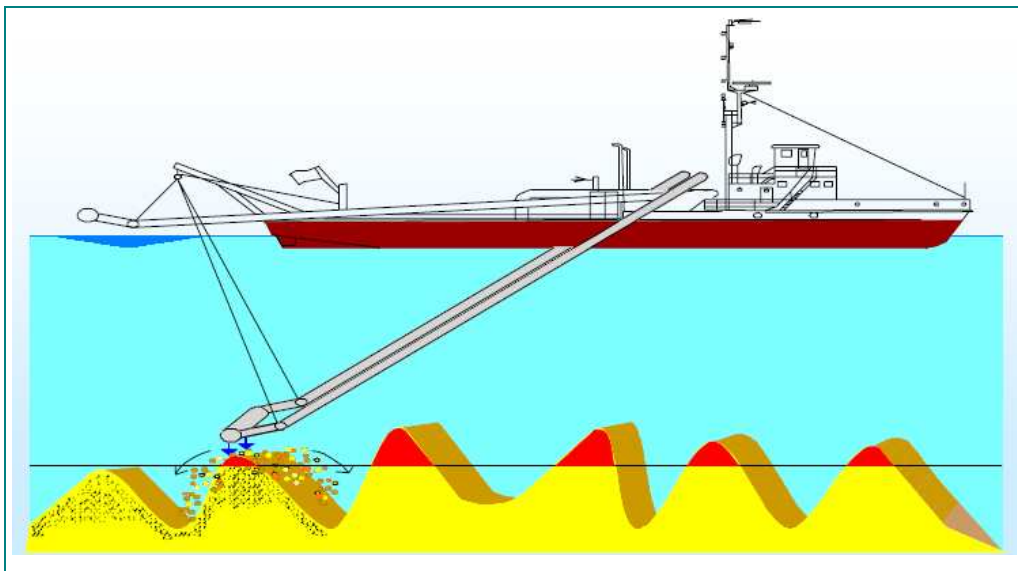


Figure 3-9 : Ecrêtage de dunes ou de sillons de DAM (STENGEL 2006)

Ainsi, cette technique, généralement plus simple à mettre en oeuvre, doit être considérée comme complémentaire ou de substitution des pratiques dites conventionnelles (hydraulique ou mécanique) sur les sites adaptés.

4 - INCIDENCES POTENTIELLES DU DRAGAGE A INJECTION D'EAU

L'objectif de ce paragraphe est de présenter de manière générale les incidences potentielles spécifiques du dragage à injection d'eau.

4.1 - Description générale des incidences potentielles identifiées

Généralement, les activités de dragage ont plusieurs impacts sur le milieu aquatique et ont déjà été étudiées de manière assez précise (par ex : OSPAR 2008).

Ces préoccupations environnementales sont aussi importantes avec le dragage par injection d'eau et, globalement, elles comprennent (d'après SPENCER 2012) :

- destruction ou perturbation des milieux et des espèces benthiques, comprenant notamment des impacts directs sur le comportement des organismes, dus par exemple au blocage des ouïes par les sédiments en suspension (Nightingale & Simenstad 2001) ;
- modifications de la bathymétrie, de l'hydrodynamique et des régimes sédimentaires ;
- diminution de la qualité de l'eau à cause d'une augmentation de la turbidité, à une réduction des concentrations en oxygène dissous (OD), de la libération de contaminants contenus dans les sédiments ou présents dans les eaux interstitielles des sédiments (par ex : métaux, contaminants organiques, substances nutritives, pathogènes) ou enfin la dispersion de sédiments contaminés.

Les impacts environnementaux associés spécifiquement aux techniques hydrodynamiques comme le dragage par injection d'eau n'ont pas été étudiés en détail dans la bibliographie scientifique.

Ainsi, il est justifié de comparer les conditions de fonctionnement du dragage par injection d'eau avec des techniques conventionnelles de dragage et d'étudier l'impact environnemental du dragage par injection d'eau.

Ces éléments sont détaillés ci-après.

Pour rappel, le principe du dragage à injection repose sur trois éléments fondamentaux, desquels découle l'ensemble des incidences potentielles :

- modification des fonds dragués (selon le principe même du dragage),
- génération d'un courant de densité (par principe de la technique),
- remise en mobilité des sédiments, générant des matières en suspensions principalement concentrées à proximité du fond.

Ces trois effets directs du dragage à injection d'eau peuvent générer un impact potentiel sur la qualité de l'eau (turbidité, contaminants...), le milieu physique (nature des fonds, équilibre hydrosédimentaire) ou l'habitat (frayères et nourriceries). Ces impacts directs ou indirects peuvent ensuite avoir des effets sur le milieu vivant ou les activités humaines.

Un schéma de principe est fourni ci-dessous pour illustrer les principales composantes du milieu pouvant être affectées.

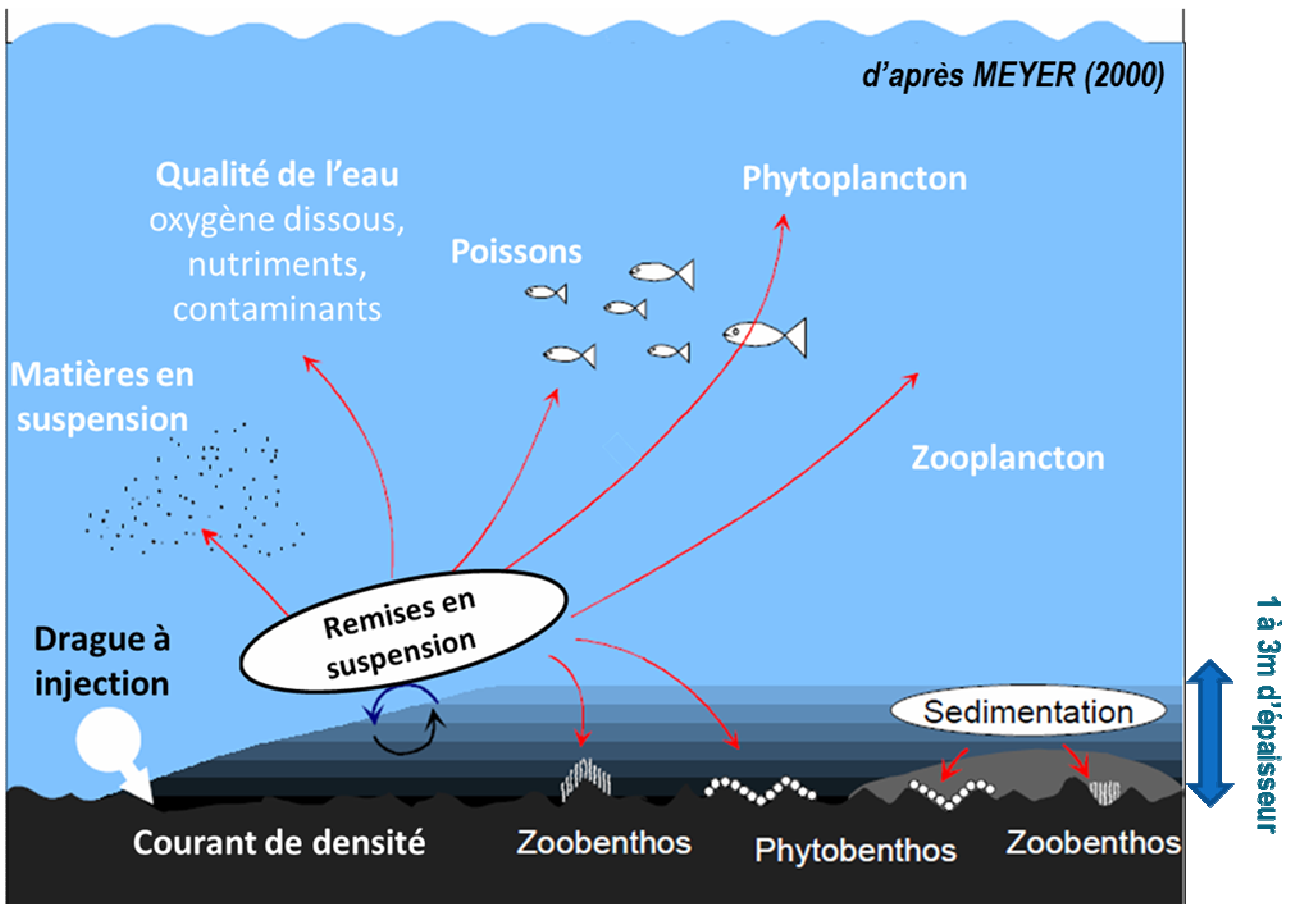


Figure 4-1 : Incidences potentielles du dragage à injection
(d'après MEYER 2000)

La différence principale entre le dragage par injection d'eau et les autres techniques est que pour le dragage par injection d'eau, le transport sédimentaire horizontal est maintenu dans le bas de la colonne d'eau, les plus fortes concentrations de sédiments restant dans les couches inférieures (près du fond) de la colonne d'eau (AIPCN, 2012).

Afin de lister et d'évaluer de manière précise l'ensemble des impacts potentiels relatifs au dragage à injection d'eau, une matrice des impacts potentiels a été élaborée. Cette matrice détaille les différentes incidences, directes ou indirectes, de cette technique et est présentée sur le graphique page suivante (figure 4-2).

Chacun de ces éléments est détaillé dans la suite du document et comparé notamment aux incidences générées par les autres techniques de dragage dites conventionnelles.

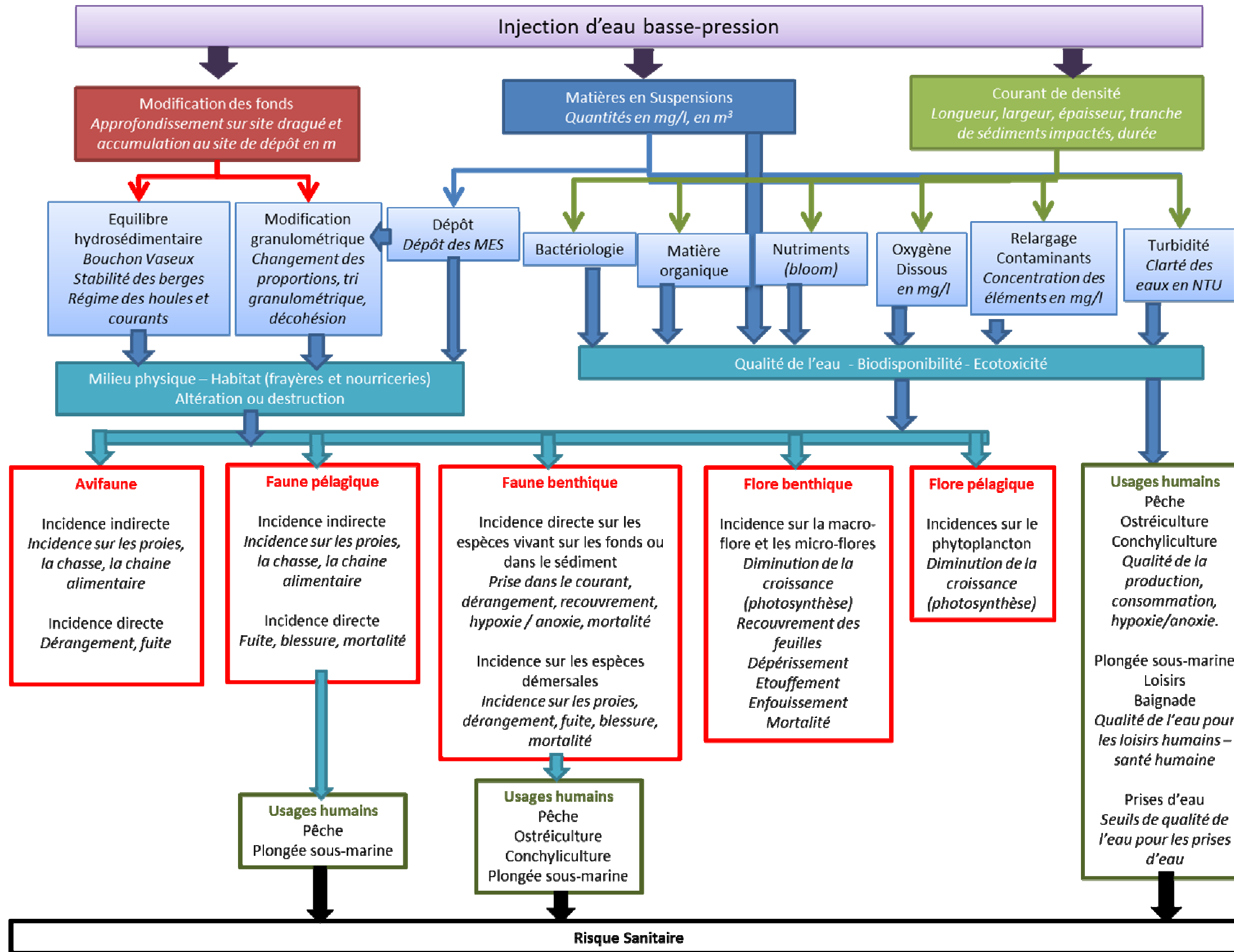


Figure 4-2 : Matrice des impacts potentiels du dragage à injection



4.2 - Incidences sur le milieu physique

Cette partie a pour objectif de décrire les incidences générales que le dragage à injection d'eau peut avoir sur l'environnement physique.

4.2.1 - Modification des fonds

4.2.1.1 - Bathymétrie

Le dragage à injection d'eau implique une relocalisation des matériaux dragués. Certaines zones à proximité du projet peuvent ainsi connaître une sédimentation accrue si les sédiments ne sont pas rapidement dispersés :

- en aval de la zone draguée, si le courant de densité est dirigé vers une sur-profondeur (Rivière Don, Royaume-Uni),
- dans les sillons des dunes, pour des opérations d'écrêtage (Weser, Allemagne),
- sur l'estran, si la technique est utilisée pour du réengraissement de zone intertidale (Estuaire du Medway, Royaume-Uni).

L'utilisation du dragage à injection d'eau implique une désolidarisation des matériaux et une diminution de leur densité. Les levés bathymétriques réagissent fortement aux variations de densité. Leur précision peut donc être temporairement perturbée par cette variation, ainsi que la détermination du volume déplacé au cours d'une opération.

4.2.1.2 - Qualité des sédiments

4.2.1.2.1 - Granulométrie

➤ Zone de déblais

Le courant de densité remet en mobilité les sédiments et peut donc tendre à une modification de la nature des matériaux en place. L'effet sur la granulométrie est variable suivant l'homogénéité ou l'hétérogénéité des sédiments :

- pour des sédiments hétérogènes, le courant de densité réalise généralement un tri granulométrique : la zone draguée est débarrassée de la majeure partie de sa fraction fine,
- pour des sédiments homogènes, le déplacement des sédiments n'a pas d'effet sur la granulométrie.

➤ Zone de destination

La zone de « destination » reçoit les matériaux les plus fins délocalisés de la zone de déblais. Suivant la nature des sédiments en place, sa propre proportion de fines aura tendance à augmenter.

4.2.1.2.2 - Propriétés chimiques

La technique du dragage par injection d'eau ne modifie pas les propriétés chimiques des sédiments. Le courant de densité conduit localement cependant, à un mélange des matériaux



présents, pouvant ainsi modifier la qualité globale de certaines zones, de manière positive ou négative.

4.2.2 - Équilibre hydrosédimentaire

4.2.2.1 - Courantologie et dynamique sédimentaire

Les courants et le transport sédimentaire sont modifiés très localement sur l'emprise du courant de densité. Son épaisseur limitée fait qu'il n'a généralement pas d'influence directe sur les courants généraux du site.

Le courant de densité est établi de manière temporaire, uniquement pendant la durée de fonctionnement de la drague.

4.2.2.2 - Bouchon vaseux

Plusieurs expériences ont été réalisées alors que le bouchon vaseux se situait au niveau des sites dragués (estuaires de la Loire ou de l'Elbe). Si le bouchon vaseux peut affecter les dragages (forts taux naturels de matières en suspension et de sédimentation), l'impact des dragages sur celui-ci n'est pas toujours mesurable :

- difficultés d'établir un protocole de mesure (complexité des mesures, atteinte des limites de mesure des instruments),
- difficultés d'isoler spécifiquement les incidences potentielles du dragage au regard des variations naturelles du milieu ambiant,
- probable effet négligeable du dragage face aux phénomènes naturels en présence.

Les experts s'interrogent actuellement sur l'impact à court ou long terme du dragage à injection d'eau sur le bouchon vaseux :

- à court terme, il est envisageable que le dragage par injection d'eau puisse augmenter la masse de vase « liquide » remobilisée par le bouchon vaseux. Celui-ci pourrait donc se retrouver renforcé par les matériaux désolidarisés et fluidifiés préalablement par le dragage par injection d'eau,
- à long terme, sur une échelle annuelle, il peut être supposé que l'impact potentiel du dragage par injection d'eau est pondéré par le renouvellement permanent du bouchon vaseux : lorsque celui-ci est expulsé de l'estuaire, lors par exemple d'une forte crue, les stocks de matériaux remobilisables sont "remis à zéro". L'impact du dragage par injection d'eau pourrait donc être considéré comme nul sur le long terme, d'une saison hydrologique à l'autre.



4.2.3 - Qualité de l'eau

De nombreuses études ont montré que les paramètres de la qualité de l'eau in situ sont modifiés pendant et/ou après les travaux de dragage conventionnel (Van den Berg et al. 2001; Lohrer & Wetz 2003; Semmes et al. 2003; Sturve et al. 2005; Nayer et al. 2007; Sundberg et al. 2007; Knott et al. 2009; Urban et al. 2010). Cependant, il y a peu d'études qui se rapportent spécifiquement au dragage par injection d'eau et les impacts mis en évidence dépendent des conditions biogéochimiques locales telles que le niveau de contamination des sédiments.

Les paramètres relatifs à la qualité des eaux sont ceux qui sont suivis le plus fréquemment dans les retours d'expérience analysés. Ils concernent :

- la turbidité et les matières en suspensions (MES),
- l'oxygène dissous,
- les contaminants chimiques, les nutriments et les micro-organismes quand il existe un risque ou des enjeux spécifiques sur le site.

4.2.3.1 - Matières en suspension – Turbidité

De fortes concentrations de matières en suspension dans la colonne d'eau peuvent avoir un effet négatif sur la qualité de l'eau, dégradant son aspect et la pénétration de la lumière dans l'eau et ayant un impact direct sur le comportement des poissons et des organismes benthiques (Nightingale & Simenstad 2001).

La remise en mobilité des matériaux génère des remises en suspension de matières. Ces MES restent concentrées principalement à proximité du fond ou dans le voisinage proche du courant de densité. Elles peuvent dans certains cas se disperser, dans de moindres concentrations, dans la colonne d'eau.

Le tableau ci-après présente des exemples d'augmentation de MES mesurées lors des différents projets de dragage à injection répertoriés. Ces résultats permettent de distinguer notamment :

- les augmentations des matières en suspension au sein du courant de densité, de l'ordre de quelques grammes par litre,
- les augmentations des matières en suspension dans la colonne d'eau, le plus souvent proches des valeurs naturelles, mais pouvant atteindre quelques centaines de milligrammes par litre dans certains cas.

D'une manière générale, il peut être considéré que l'impact du dragage à injection d'eau est concentré sur le fond, dans et aux abords du courant de densité. Les impacts sur le reste de la colonne d'eau restent limités.

D'ailleurs, les différents suivis réalisés mettent en évidence que dans les zones d'estuaire à forte turbidité naturelle, il est très délicat de distinguer le courant de densité, du fait des très fortes variabilités naturelles de MES atteintes dans le milieu ambiant.



Tableau 4-1 : Exemples de remises en suspension pendant un dragage à injection

Site	Nature des sédiments	Profondeur de mesure	Distance drague	Bruit de fond	Matières en suspension	Source
Estuaire de l'Elbe	Sables (Rhinplatte)	/	/	25 mg/l	Pas d'augmentation mesurée	Meyer (2000)
	Vases (Köhlfleet)	Colonne d'eau	Moyenne sur zone de dragage	25 mg/l	100 mg/l max	
		Fond			3 g/l max	
Estuaire de la Loire	Vases	Surface Mi-profondeur	100 m 1 km 2 km	1-4 g/l	Pas d'augmentation mesurée	CREOCEAN (2006-2009) HOCER (2010-2011)
Bayonne	Sables et vases	Surface	Moyenne sur zone de dragage	32-47 mg/l	28-200 mg/l	Ginger (2011)
		Mi-profondeur		38-58 mg/l	32-190 mg/l	
		Fond		38-65 mg/l	32-580 mg/l	
Estuaire de la Gironde	Vases	Colonne d'eau	< 70 m	1-2 g/l	4 g/l	Ginger (2011)
		Fond	Entre 70 et 300 m		4 g/l	
		Colonne d'eau et fond	> 300 m		Pas d'augmentation mesurée	
Estuaire de la Weser	Sables	/	/	50 à 200 NTU (hivers-été)	Pas d'augmentation mesurée	Stengel (2006)
Estuaire de l'Ems	Vases et fines	Surface	Limite aval de la zone draguée	50mg/l	300 mg/l	BFG (2011)
		2,50 m au-dessus du fond		100 mg/l	500 mg/l	
		Au niveau du fond		150 mg/l	800 mg/l	
Anvers (Escaut)	Vase	-10 m	5 m	25 mg/l	60 mg/l	Port d'Anvers 2011
		-16 m (fond)	5 m	50 mg/l	1 500 mg/l	
		-10 m	40 m	5 mg/l	30 mg/l	
		-16 m (fond)	40 m	50 mg/l	200 mg/l	



4.2.3.2 - Oxygène dissous

La teneur de l'eau en oxygène dissous est déterminée par la respiration des organismes aquatiques, l'oxydation et la dégradation des polluants, l'activité photosynthétique de la flore et les échanges avec l'atmosphère.

L'oxygène dissous dans l'eau est en fait le bilan des activités de production (par photosynthèse et réaération) et de consommation (par biodégradation et respiration).

Il y a déficit en oxygène lorsque la consommation est supérieure à la production. Ce phénomène est essentiellement provoqué par l'oxydation des matières organiques. Une remise en suspension de sédiments peut être à l'origine de cette oxydation (Spencer 2012).

Il existe en milieu estuarien des processus spécifiques agissant sur la concentration en oxygène dissous. Il s'agit de :

- l'intrusion saline qui contrôle fortement la désoxygénation des eaux dans l'estuaire amont à chaque marée montante (l'eau de l'aval, en provenance de la zone du bouchon vaseux, étant moins oxygénée),
- la compétition entre l'amplitude de la marée et le débit, qui détermine l'extension de l'intrusion saline,
- les variations de température et de salinité de l'eau, limitant la dissolution de l'oxygène dans l'eau,
- la production primaire dans l'estuaire, qui augmente suite aux apports de nutriments par le fleuve lors des pics de débits, à la faveur de conditions ensoleillées, de faible turbidité et de stabilité de la colonne d'eau,
- la dégradation par les bactéries de la matière organique générée dans l'estuaire, suite à ces périodes de production qui augmente ponctuellement la consommation d'oxygène et qui peut générer des épisodes d'anoxie.

Tous ces processus se combinent et il est alors difficile d'isoler les effets des dragages.

De nombreuses études ont examiné les impacts d'opérations de dragage conventionnelles sur les concentrations en oxygène dissous et ont déterminé que les concentrations dans la colonne d'eau sus-jacente diminuent pendant le dragage mais que cette réduction est brève, les concentrations en oxygène dissous retrouvant leur niveau naturel rapidement (en 15 minutes) (Lohrer & Wetz 2003, Semmes et al. 2003, Jones-Lee et Lee 2005).

Dans le cadre du dragage à injection d'eau, cette baisse de la concentration en oxygène dissous se manifeste également de manière temporaire, pendant la durée du dragage (principalement en milieu estuarien) :

- les diminutions mesurées au cours des divers projets de dragage à injection restent faibles ou nulles (baisse très rarement supérieure à 30%, voir tableau ci-après, Meyer 2000, Creoccean 2006-2009, BFG 2011),
- le retour à la normale est très rapide (Meyer 2000, Port d'Anvers 2011),
- les effets sont principalement concentrés sur le fond. Les baisses d'oxygène potentiellement induites par cette technique concernent donc la partie la plus profonde (1 à 3 m d'épaisseur) des eaux concernées (Port d'Anvers 2011, Ginger 2011).



Tableau 4-2 : Exemples de variations de l'oxygène dissous pendant un dragage à injection

Site	Nature des sédiments	Profondeur de mesure	Distance par rapport à la drague	Bruit de fond	Oxygène dissous	Source
Estuaire de l'Elbe	Vases	Surface	/	84% saturation	50%	Meyer (2000)
	Cuxhaven	3,5 m du fond			42 %	
	Vases (Köhlfleet)	1 m du fond	Moyenne sur zone de dragage	82% saturation	70 %	
Estuaire de la Loire	Vases	/	/	3-9 mg/l	Pas de diminution	Creocean (2006-2009)
Estuaire de la Gironde	Vases	Colonne d'eau	/	6 – 9,6 mg/l	Pas de diminution	Ginger (2011)
Estuaire de la Weser	Sables	/	/	5,5 à 12,5 mg/l	Pas de diminution	BFG (2011)
Estuaire de l'Ems	Vases et fines	Surface	Limite aval de la zone draguée	12 mg/l	7 mg/l	BFG (2011)
Anvers (Escaut)	Vase	-10 m	5 m	87%	84%	Port d'Anvers 2011
		-16 m (fonds)	5 m	87%	60%	



4.2.3.3 - Relargage de contaminants et de substances nutritives

4.2.3.3.1 - Impacts généraux observés sur la qualité de l'eau

Les contaminants et substances nutritives ont généralement tendance à se fixer sur les sédiments à granulométrie fine. Dans le substrat, à cause des faibles concentrations d'oxygène libre, ces sédiments deviennent rapidement anoxiques. Les contaminants et substances nutritives éventuellement présents dans les sédiments peuvent donc être relâchés dans la colonne d'eau en cas de brassage des matériaux.

Les substances chimiques sont présentes sous forme particulaire dans les sédiments (associées aux MES par des phénomènes d'adsorption sur les colloïdes) et peuvent, en fonction des conditions physico-chimiques du milieu (en particulier salinité, pH, potentiel d'oxydo-réduction) passer sous la forme dissoute. Cette forme de contamination est la plus biodisponible dans l'environnement marin.

En effet, lors du passage eau douce / eau salée dans les estuaires (salinité variable suivant les sites), les sédiments rencontrent des modifications des conditions physico-chimiques du milieu (salinité, pH,...) propices à la solubilisation des métaux fixés. Les particules en suspension ont ainsi déjà libéré de façon naturelle une grande partie de la fraction mobilisable des substances métalliques adsorbées lors du passage du front de salinité, avant de sédimenter dans l'estuaire.

Ce phénomène de solubilisation, notamment des métaux particuliers, est très fréquent dans le milieu estuarien. Il est dû en particulier à la salinité, mais également à la minéralisation de la matière organique particulaire au sein du bouchon vaseux et aux apports sédimentaires après érosion des horizons supérieurs des sédiments induite par les courants de marée et par l'action de l'agitation (cas de l'érosion des vasières).

Des études effectuées pour évaluer la libération de contaminants liés à des sédiments dans la colonne d'eau sus-jacente pendant des opérations de dragage sont rares, dans la mesure où d'autres filières de destination sont envisagées si des risques significatifs de libération de contaminants sont identifiés.

Des études sur le dragage conventionnel ont été effectuées : il ressort que les concentrations d'éléments nutritifs, d'ammoniac et de contaminants dissous dans la colonne d'eau augmentent pendant les opérations de dragage. Cependant, cette détérioration de la qualité de l'eau est brève, localisée et souvent comprise dans la variabilité naturelle observée dans l'environnement (Lohrer & Wetz 2003; Semmes et al. 2003 ; Urban et al. 2010). Si aucune augmentation de la concentration des métaux dans la colonne d'eau n'a été remarquée, on attribue cela à la forte capacité de fixation des sédiments (Van den Berg et al. 2001). Les mécanismes de fixation des contaminants sur les sédiments sont détaillés au paragraphe suivant.

Tout d'abord, il est d'usage de ne pas utiliser le dragage à injection pour draguer des sédiments contaminés. Il existe cependant certains cas d'exceptions dans la littérature scientifique (Don, Limehouse basin, Haringvliet...).

Les contaminants ne sont généralement pas suivis lorsque la zone draguée est jugée non polluée.

Dans certains cas cependant, la qualité de l'eau a fait l'objet d'un suivi détaillé pour des niveaux de contaminants largement inférieurs à la réglementation en vigueur (exemple seuils GEODE en France). Aucun impact sur la qualité de l'eau n'a été détecté.



4.2.3.3.2 - Analyse des mécanismes spécifiques au dragage à injection d'eau

Bien qu'il n'existe pas ou peu de données sur le suivi de la libération de contaminants sur site pendant des opérations de dragage à injection d'eau, des tests d'élutriation en laboratoire et des mesures d'autres activités de dragage indiquent que des contaminants peuvent être libérés dans la colonne d'eau.

L'essence même du dragage à injection implique que le mélange advectif (et donc la dilution) des sédiments et contaminants libérés dans la colonne d'eau sus-jacente est limité (les matériaux étant concentrés sur le fond). Ainsi (voir figures-bilan ci-après), les concentrations de contaminants solubles dans la zone proche du lit (i.e. : les sédiments pris dans le courant de densité) peuvent être bien plus élevées que celles observées lors d'opérations de dragage conventionnel.

Les sédiments organiques riches à granulométrie fine sont d'importants pièges à contaminants organiques et non-organiques et à substances nutritives dans des environnements estuariens et fluviaux (par ex : Bianchi 2007). De nombreuses espèces particulières ou de « sites de fixation » sont importants pour l'élimination des oligo-minéraux dissous dans l'environnement aquatique, notamment les particules de matière organique, les carbonates et les oxydes hydratés (Turner et al., 2004), et sont encore plus importants dans des environnements anoxiques, en présence de sulfures (Simpson et al., 2000). Beaucoup de contaminants tels que les PCBs et les HAPs sont hydrophobes, se fixent fortement aux matières organiques et sont stables chimiquement, ce qui veut dire qu'ils sont persistants dans l'environnement.

La forte concentration de sédiments en suspension dans cet écoulement par densité fournit de nombreux supports pour la ré-adsorption des contaminants libérés. Les contaminants sont donc moins dispersés sous forme dissoute car réabsorbés rapidement dans le courant de densité.

Il convient cependant de rappeler que ces mécanismes sont générés de manière naturelle dans les estuaires, à la limite eaux douces / eaux salées. L'impact potentiel du dragage à injection sur l'équilibre désorption / absorption des contaminants dans les sédiments est de ce fait faible comparé aux phénomènes naturels en jeu sur ces sites.

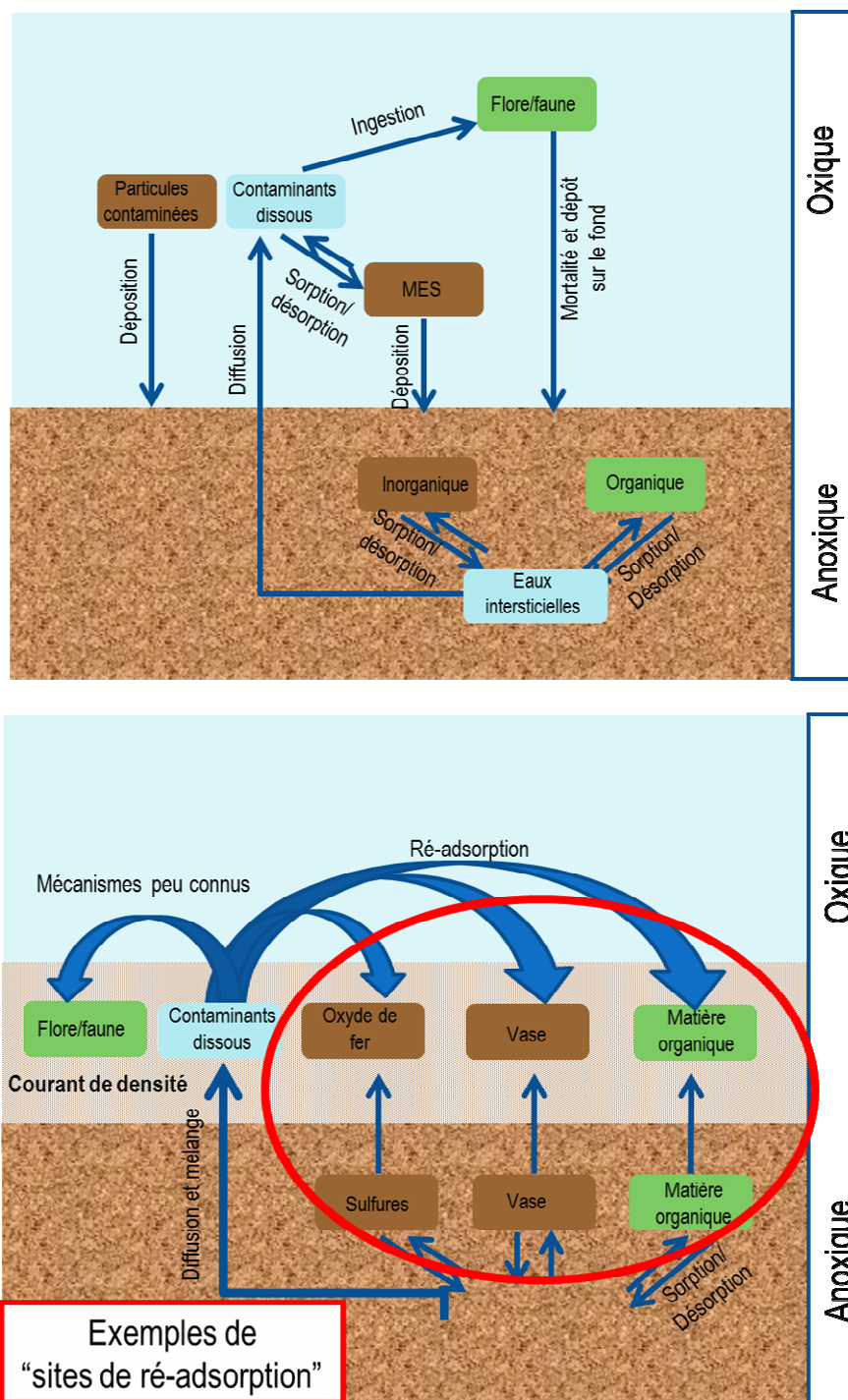


Figure 4-3 : Hypothèses d'équilibres chimiques des contaminants à l'état naturel (en haut) et dans le courant de densité (en bas), Spencer (2012), Queen Mary University



4.2.3.4 - Bactériologie

Peu de mesures bactériologiques ont été réalisées au cours des projets de dragage à injection d'eau.

La dispersion de bactéries (*Escherichia Coli* ou Enterocoques intestinaux) suit généralement celle des matières en suspension dans les opérations de dragage. Dans le cas du dragage par injection d'eau, les MES se concentrent principalement dans le courant de densité. Les incidences potentielles associées à la bactériologie sont donc principalement localisées à proximité du fond.

4.2.4 - Bilan des incidences sur le milieu physique

Le tableau ci-après reprend de manière synthétique les incidences potentielles du dragage à injection d'eau sur l'environnement physique.

Tableau 4-3 : Bilan des incidences potentielles du Dragage à Injection d'Eau sur le milieu physique

Type d'incidence	Incidences potentielles	Caractéristiques spécifiques au dragage à injection
Modification des fonds	Bathymétrie	Exhaussement des fonds du site de destination
	Densité	Impact de la fluidification : baisse de densité de la crème de vase
Equilibre hydro-sédimentaire	Courants	Courant de densité localisé
	Dynamique sédimentaire	Pas d'incidence mesurable
	Bouchon vaseux	Pas d'incidence mesurable
Qualité de l'eau	MES / turbidité	Matières en suspension au sein du courant de densité de l'ordre du g/l
	Oxygène dissous	Chutes plus importantes au voisinage du fond Retour rapide à situation normale
	Relargage contaminants	Avis d'expert indiquant l'existence de mécanismes spécifiques de réabsorption des contaminants dans le courant de densité (Spencer 2012) Impacts concentrés sur le fond
	Bactériologie	Fonction de la dispersion des MES
	Nutriments	Mécanismes spécifiques de désorption/réabsorption a priori générés par le courant de densité



4.3 - Incidences sur le milieu vivant

Les impacts biologiques du dragage hydraulique et mécanique ont souvent fait l'objet d'études approfondies. La plupart de ces études traitent de l'impact sur les communautés benthiques et la diversité en utilisant une approche BACI¹.

Cependant, il existe peu d'évaluations « en temps réel » des impacts écologiques pendant des opérations de remise en suspension (Knott et al. 2009) et encore moins sur les impacts pendant des dragage par injection d'eau (Field 2009).

4.3.1 - Qualité de l'habitat

L'impact du dragage sur le milieu physique peut modifier la nature ou la qualité des habitats en présence sur la zone :

- la modification de la granulométrie peut affecter les espèces qui vivent et déposent leurs œufs dans les sédiments... Par exemple, la qualité d'un habitat constitué de sédiments grossiers ou graveleux peut potentiellement être altérée en cas de recouvrement par une couche de fines suite à un dragage à injection,
- l'approfondissement de la zone peut modifier le régime de courants auquel est exposé l'habitat (incidence commune à toutes les techniques de dragage). Une zone plus ou moins énergétique peut modifier la qualité de l'habitat.

La mesure de l'incidence du dragage à injection sur l'habitat reste peu mesurée dans les différents projets réalisés.

4.3.2 - Espèces benthiques

Les espèces benthiques sont, de manière générale, directement impactées par toute opération de dragage. L'extraction des matériaux conduit à la destruction éventuellement temporaire de la majorité des espèces benthiques sur l'emprise du dragage. Le dragage à injection ne fait pas exception et provoque sur l'emprise de la zone draguée et du passage du courant de densité (suivant l'épaisseur et la fréquence des dépôts) :

- une défaunation locale des fonds,
- la destruction ou l'altération de la macroflore benthique.

L'impact du dragage à injection d'eau sur les espèces benthiques est variable suivant les sites où il a été suivi et les zones de dépôt utilisées. Il est à nuancer suivant la richesse de la zone (les chenaux de navigation étant souvent pauvres en espèces benthiques), les processus de recolonisation en jeu localement et les variations naturelles des populations présentes.

L'impact sur les espèces benthiques (faune et flore) n'est pas différent de celui généré par les autres techniques de dragage. Dans le cas du dragage par injection d'eau, la zone d'impact potentielle est cependant élargie car elle inclut l'emprise du courant de densité.

¹ BACI : Before After Control Impact = Contrôle des impacts par réalisation d'un état initial et d'un suivi après travaux.



4.3.3 - Espèces démersales

Les poissons démersaux, fortement mobiles, ne sont généralement pas directement impactés (pas de mortalité). En revanche, ce compartiment se nourrissant du macrobenthos, les poissons démersaux désertent temporairement la zone la plus impactée.

Il n'existe que peu de données de suivis sur les espèces démersales lors des opérations de dragage à injection d'eau.

On évoque généralement dans les dragages conventionnels, la destruction ou la blessure d'individus par action mécanique des dragues.

Le dragage par injection d'eau ne créant pas d'aspiration, les effets mécaniques des dragages par cette technique sont moins nocifs de ce point de vue.

4.3.4 - Espèces pélagiques

Il n'y a pas de données spécifiques à l'impact du dragage à injection d'eau sur la flore pélagique dans la littérature scientifique. L'approche généralement retenue correspond à celle privilégiée dans les autres techniques de dragage (baisse temporaire de la photosynthèse due à l'accroissement de la turbidité sur l'emprise du courant de densité).

Le dragage à injection n'a que peu d'incidences directes sur la faune pélagique :

- le courant de densité se maintient à proximité du fond, soit sur une zone non spécifique aux espèces pélagiques. Celles-ci peuvent éviter le danger éventuel, sans en subir les nuisances,
- les remises en suspension transmises dans la colonne d'eau, de concentrations moindres que dans le courant de densité, peuvent présenter une gêne pour les poissons (visibilité, respiration...). Ceux-ci étant très mobiles et le panache localisé (en zone ouverte), ils peuvent facilement éviter la zone potentiellement dangereuse et reviendront après dispersion du panache.

Les protocoles et techniques d'échantillonnages ne permettent pas d'avoir une vision précise des peuplements d'une zone. Il est ainsi délicat de réaliser une interprétation et une analyse des résultats des mesures. Il est difficile de mesurer concrètement les impacts que peuvent avoir les dragages en général, incluant le dragage à injection d'eau, sur les espèces pélagiques.

Les œufs et larves des poissons, non mobiles, sont plus vulnérables aux opérations de dragage et à leurs impacts. Les œufs et larves sont généralement moins tolérants aux variations de turbidité qu'à leur stade adulte. Une connaissance des lieux et périodes où sont susceptibles de se développer les œufs et les larves est donc souhaitable pour adapter les travaux afin de limiter les impacts.

4.3.5 - Avifaune

Il n'y a pas de données spécifiques à l'impact du dragage à injection d'eau sur l'avifaune dans la littérature scientifique. De manière générale, l'impact principal des dragages sur les oiseaux marins est de deux types :

- modification de la ressource alimentaire des oiseaux :
 - l'incidence potentielle est indirecte car elle se fait au travers de la chaîne trophique,
 - il est très difficile de quantifier l'impact (méthodes de suivis des oiseaux et interprétation des observations),



- dérangement, perturbation des individus, par exemple a proximité d'un reposoir ou d'une zone d'alimentation :
 - l'incidence potentielle est directe car la drague influe directement sur le milieu de vie des oiseaux,
 - elle peut être observée pendant le chantier mais difficilement quantifiable.

Le dragage à injection d'eau n'impacte pas de manière spécifique la chaîne trophique, par rapport aux autres techniques de dragages hydrauliques ou mécaniques (cf paragraphes 4.3.1 à 4.3.4). Sa présence prolongée sur une zone à enjeux pour l'avifaune peut potentiellement provoquer une gêne, au même titre que les autres engins de dragages.

4.3.6 - Bilan des incidences sur le milieu vivant

Les incidences du dragage à injection sur le milieu vivant sont résumées ci-dessous.

Tableau 4-4 : Bilan des incidences potentielles du Dragage à Injection d'eau sur le milieu vivant

Type d'incidence	Incidences potentielles	Caractéristiques spécifiques au dragage à injection
Qualité de l'habitat	Altération de la qualité de l'habitat	Pas d'approche spécifique dans la littérature. Réduction de la proportion de fines sur la zone draguée
Ecotoxicité	Bio-accumulation des contaminants dans les organismes vivants	Mécanismes de bioaccumulations associés aux phénomènes de désorption/réabsorption pendant le dragage à injection encore peu connus. Avis d'expert indiquant l'existence de mécanismes spécifiques de réabsorption des contaminants dans le courant de densité (Spencer 2012) Incidences potentielles concentrées sur le fond.
Espèces benthiques	Défaunation totale ou partielle	Peu mesurée, a priori pas d'impact spécifique de cette technique.
	Altération ou destruction de la flore	Pas de mesures spécifiques, généralement pas ou peu de flore benthique sur les zones draguées
Espèces démersales	Fuite ou blessures, incidence sur les proies	Pas d'études spécifiques sur les espèces démersales.
Espèces pélagiques	Fuite ou blessures, incidence sur les proies	Peu mesurée, pas d'approche spécifique dans la littérature. Incidences potentielles concentrées sur le fond
	Diminution de la photosynthèse	Pas d'études spécifiques sur la flore pélagique Incidences potentielles concentrées sur le fond
Avifaune	Fuite ou dérangement, incidence sur les proies	Pas d'études spécifiques sur l'avifaune. A priori pas d'impact spécifique de cette technique.

4.4 - Incidences sur les activités humaines

4.4.1 - Risque sanitaire

De manière générale, les risques sanitaires en milieu marin portent sur :

- la qualité des zones de baignade,
- la qualité des zones de cultures marines (ostréiculture),
- la qualité des zones de pêche.

L'approche retenue dans les différentes études réalisées dans le cadre des projets de dragage à injection d'eau reste dans la lignée des analyses réalisées dans le cadre des autres techniques de dragage, l'impact étant directement lié à la dispersion des matières en suspension et à la qualité du milieu.

À l'instar des autres techniques de dragage, le risque sanitaire associé au dragage à injection dépend donc de la destination des matériaux dragués, de leur positionnement par rapport aux zones potentiellement sensibles, de la maîtrise exercée sur le courant de densité, et de la qualité générale du milieu.

Un « *Guide pour l'évaluation des risques sanitaires (ERS) liés aux opérations de dragage et de rejet en mer de matériaux marins et estuariens* » est en cours de réalisation par le groupe GEODE et permettra de détailler ces points.

4.4.2 - Navigation

Durant les opérations de dragage, les dragues se mêlent au trafic maritime. Elles doivent alors respecter les usages ordinaires de navigation pour assurer une cohabitation harmonieuse avec les autres navires utilisant le chenal ou les zones portuaires concernées. La technique d'injection d'eau ne génère pas d'incidences spécifiques sur la pêche ou la navigation.

L'impact potentiel sur la navigation et la progression des engins de pêche est souvent présenté comme réduit du fait que les dragues à injection d'eau sont généralement plus petites que les autres engins de dragage et travaillent rapidement.

4.4.3 - Pêche

En dehors de la gêne à la navigation, l'impact potentiel du dragage à injection sur la pêche est lié à celui que pourrait avoir la technique sur les ressources halieutiques.

Le dragage à injection pouvant seulement faire fuir les poissons adulte de la zone draguée de manière temporaire, il n'affecte pas la ressource sur ce point. L'impact potentiel du courant de densité sur les œufs ou larves reste néanmoins à considérer au cas par cas suivant les particularités des sites.



4.4.4 - Prises d'eau industrielles

Certaines usines ou installations électriques peuvent avoir recours à une prise d'eau dans leur fonctionnement ou pour un système de refroidissement. Ces installations sont généralement dimensionnées pour être capables d'utiliser une eau chargée d'une teneur maximum en matières en suspension, en ayant recours par exemple à des bassins de décantation.

Il convient, dans le cadre des opérations de dragage à injection d'eau, de s'assurer que le courant de densité n'a pas d'incidences sur ces installations.

4.4.5 - Bilan des incidences sur les activités humaines

Les incidences du dragage à injection sur les activités humaines sont résumées ci-dessous.

Tableau 4-5 : Bilan des incidences sur les activités humaines

Type d'incidence	Caractéristiques spécifiques au dragage à injection
Risque sanitaire (baignade, cultures marines...)	Pas d'approche spécifique dans la littérature. Dépend de la distance et du cheminement du courant de densité.
Navigation	Pas d'approche spécifique dans la littérature. Equipements moins encombrants que pour les autres techniques.
Pêche	Pas d'approche spécifique dans la littérature. Pas d'incidence spécifique sur la ressource halieutique.
Prises d'eau industrielles	Dépend de la distance et du cheminement du courant de densité.



5 - METHODES D'EVALUATIONS PREALABLES ET DE SUIVIS

5.1 - Approche générale

Pour les considérations d'ordre général sur les suivis relatifs aux opérations de dragage, le « *Guide méthodologique relatif aux suivis environnementaux des opérations de dragage et d'immersion* » et ses annexes pourront être consultés.

L'objectif de cette partie est de fournir des éléments spécifiques au Dragage à Injection d'Eau qui seront autant d'outils d'aide à la décision, à l'usage d'un maître d'ouvrage ou de son représentant impliqué dans un projet de dragage à injection d'eau ; ceci afin de mieux cibler et d'adapter les suivis ou études à mettre en place suivant les caractéristiques du projet.

Comme précisé dans le « *Guide méthodologique sur les suivis environnementaux des opérations de dragage et d'immersion* » (GEODE 2012), ces suivis doivent être :

- établis sur mesure par rapport aux spécificités du site et du projet,
- efficaces et pertinents par rapport aux résultats de l'analyse des incidences, des enjeux identifiés et des objectifs fixés,
- adaptables et évolutifs pour pouvoir prendre en compte les retours d'expériences apportés par les premières campagnes sur un site,
- proportionnés aux enjeux.

5.2 - Évaluation des incidences du courant de densité

5.2.1 - Analyse préalable de la trajectoire du courant de densité

5.2.1.1 - Expertise

Les forces s'exerçant sur le courant de densité et influençant sa trajectoire sont principalement dues à :

- l'action de l'injection d'eau,
- l'action des courants locaux,
- l'action du sol (friction),
- la gravité (pentes),

Une connaissance précise de la morphologie du site et des courants locaux permet d'anticiper le comportement global du courant de densité suivant la stratégie d'utilisation de la drague à injection d'eau. Le courant de densité n'a que peu de chances, par exemple, de se déplacer vers des fonds plus élevés.

Dans le cas de la Tamise, où le dragage à injection est utilisé de manière localisée sur plusieurs sites, la trajectoire du courant de densité est anticipée jusqu'à ce que celui-ci atteigne des zones suffisamment énergétiques (agitées) pour qu'il soit dispersé.

Cette expertise repose sur une bonne connaissance des données morphologiques (bathymétrie, pente, granulométrie) et hydrodynamiques (résultante des courants, débits) de la zone considérée pour les opérations.



5.2.1.2 - Modélisation numérique

En général, dans les opérations de dragage et d'immersion, la réalisation de modélisations numériques permet, en complément de l'expertise, de s'assurer des conditions de dispersion du panache turbide généré par l'opération et d'analyser la trajectoire des particules de manière plus précise.

Dans le cas des dragages à injection d'eau, l'exercice est beaucoup plus complexe.

La réalisation de modèles numériques pour le dragage à injection d'eau en est encore actuellement au stade expérimental et à l'état de recherche, et les résultats doivent être exploités avec précaution (AIPCN 2012).

Deux procédés de modélisation numérique sont aujourd'hui utilisés de manière combinée :

- le courant de densité et l'eau de mer sont considérés comme deux fluides distincts, interagissant par des forces de cisaillement ou d'érosion (WINTERWERP et al. 2008). La fiabilité de ce type de modèle est cependant réduite dans des environnements plus énergétiques, où les échanges dans la colonne d'eau sont plus importants et le maintien du courant de densité plus difficile (AIPCN 2012). Il n'est pas applicable dans des environnements complexes avec stratification, comme les estuaires ;
- modélisation de la dispersion des sédiments (à partir d'un modèle courantologique en 3D), à partir d'une estimation des volumes remis en suspension par le dragage. Cette technique est utilisée principalement dans des milieux plus énergétiques, où l'action des courants locaux aura une influence prépondérante sur la dispersion des sédiments, comme par exemple dans l'estuaire du Medway (HR WALLINGFORD 2002). Elle ne prend pas en compte la notion de courant de densité.

La modélisation de ces phénomènes complexes en milieu estuarien reste à développer. Elle n'est pas, à ce stade, en mesure de représenter correctement les différents processus en jeu et leurs interactions dans des milieux déjà bien souvent très complexes naturellement (stratification haline, gradients de turbidité et de densité des vases déposées sur le fond, crème de vase, bouchon vaseux).

5.2.1.3 - Modélisation physique

La réalisation d'un modèle physique peut permettre de reconstituer les éléments ayant une action sur le courant de densité à plus petite échelle :

- forces de frottement, cohésion des sédiments,
- forces de gravité, pente des fonds,
- courants locaux.

Le comportement du courant de densité peut être recréé dans un canal d'essais, permettant ainsi d'évaluer les quantités draguées et les caractéristiques de sa propagation (voir figure ci-après).



Figure 5-1 : Modélisation physique d'un courant de densité (BORST 1994)

Là encore, si la modélisation physique permet de « mieux » reproduire les processus en jeu dans le courant de densité, elle ne permet pas de « replacer » ce courant de densité dans son environnement naturel.

5.3 - Suivis mis en place sur les sites ayant pratiqué le dragage à injection d'eau – suivis expérimentaux

5.3.1 - Stratégie générale des suivis étudiés

Une part importante des documents disponibles traitant du dragage à injection fait état de suivis de type « scientifique ». Ces suivis sont réalisés à titre exceptionnel au cours d'un projet ou d'une expérimentation dédiée afin d'enrichir les connaissances générales sur le dragage à injection et ses impacts. Les différents organismes qui ont pratiqué ces essais ont par ailleurs mis en place des stratégies de suivis spécifiques aux opérations régulières.

Les objectifs des suivis scientifiques ou expérimentaux sont :

- étudier en détail les impacts du dragage à injection sur le site étudié et vérifier la validité de leur évaluation préalable,
- définir le cadre d'une utilisation future régulière du dragage à injection,
- permettre la mise en place d'un suivi « allégé » (dit de routine) dans ces utilisations futures.

Il n'existe pas de suivi « type » à mettre en place pour un dragage à injection. Comme pour les autres techniques de dragage, les suivis doivent être mis en place :

- à la bonne appréciation du maître d'ouvrage ou de son représentant (bureau d'études), en connaissance des caractéristiques du projet, des enjeux, et de l'histoire de la zone d'étude (pollution éventuelle sur certains types particuliers de contaminants),
- ou par un groupe de pilotage créé à cet effet,
- ou par arrêté préfectoral.

Le tableau présenté à la page suivante détaille les types de suivis mis en place sur les sites ayant fait l'objet d'opérations ou d'expérimentations du dragage à injection d'eau (et où les données disponibles sont suffisamment détaillées pour être exploitées).

D'une manière générale, et comme le montre la figure ci-après, les différents paramètres sont suivis de manière inégale dans la littérature :

- les suivis physiques (MES, bathymétrie, courants, granulométrie) sont largement privilégiés dans la plupart des projets,
- les suivis chimiques les plus répandus sont ceux ciblant l'oxygène dissous ou les nutriments,
- les suivis microbiologiques ont très rarement été mis en place,
- les suivis du milieu vivant n'ont généralement pas été considérés comme pertinents dans les projets expérimentaux.

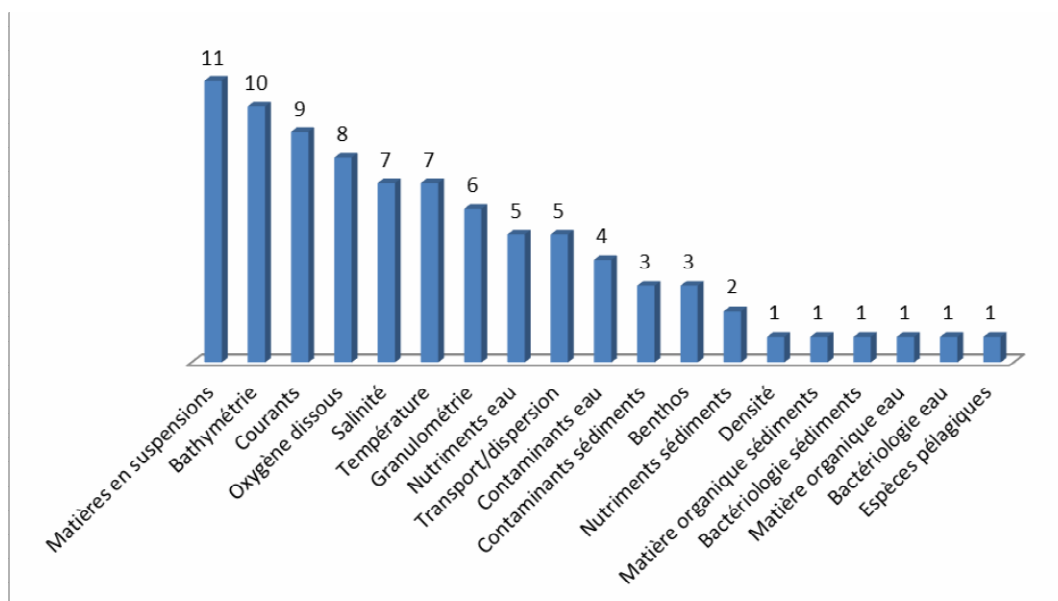


Figure 5-2 : Suivis mis en œuvres dans les sites étudiés

5.3.2 - Suivis scientifiques ou expérimentaux

5.3.2.1 - Types de suivis mis en place

5.3.2.1.1 - Suivi du milieu physique

Le suivi du milieu physique est particulièrement développé dans l'ensemble des opérations de dragage à injection d'eau (voir tableau précédent) :

- une importante partie des expériences avait pour objectif d'évaluer l'efficacité physique du dragage à injection, ,
- le suivi du courant de densité implique la mise en place d'une instrumentation importante (mise en place d'ADCP fixes et embarqués) et complexe.

D'une manière générale, les éléments présentés dans le tableau ci-après ont pu être mesurés à l'aide de différents instruments au cours des campagnes de mesures répertoriées :



Tableau 5-1 Moyens de mesures suivant les paramètres physiques mesurés

Paramètre mesuré	Méthode de mesure	Exemple	Commentaires
Matières en suspension / turbidité	Turbidimètre, sonde multiparamètres	Bayonne	Ces instruments fournissent une information de turbidité en NTU (≠ g/l)
	Mesures à l'ADCP (en station fixe ou embarqué sur un navire)	Loire, Gironde (ADCP embarqué)	La station fixe « vérifie » la présence ou non du courant de densité en un point donné. L'ADCP embarqué permet une visualisation plus précise de son emprise réelle. Attention mesure difficile à proximité du fond (1-2 m)
	Prélèvements d'eau	Anvers	Les différentes mesures sont généralement complémentaires : étalonnage, fréquence d'échantillonnage, simplicité de mise en œuvre, coûts...
Equilibres hydrosédimentaires / dépôts :	Bathymétrie immédiatement avant, immédiatement après, et quelques semaines après le dragage	Royaume-Uni	Attention à la fréquence utilisée (densité de la couche de matériaux détectée) Attention à la définition de la zone à lever
	Pièges à sédiments, Traceurs fluorescents (Royaume-Uni, Elbe, Haringvliet, peu efficaces dans les expériences menées)	Royaume-Uni, Elbe, Haringvliet	Peu efficaces dans les expériences menées
	Mesure de densité in-situ	Crouch River, Elbe	Utile pour enjeu particulier lié à la navigation
Modification du faciès sédimentaire	Prélèvements benne et analyse	Gironde	Mesure précisément la granulométrie
	Sondeur acoustique	Weser	Donne une meilleure vision d'ensemble de la zone
Mesure des courants	ADCP	Loire, Elbe, Tamise...	/

5.3.2.1.2 - Suivi de la qualité de l'eau

En comparaison avec le suivi du milieu physique, le suivi de la qualité de l'eau (ou suivi chimique) est plus marginal dans les opérations qui ont été réalisées.

Dans la plupart des cas, le dragage à injection d'eau est réalisé en milieu non contaminé. Le suivi chimique de la qualité de l'eau est donc le plus souvent limité à un minimum (simple mesure des MES).

Tableau 5-2 Moyens de mesures suivant les paramètres mesurés

Paramètre mesuré	Méthode de mesure	Exemple
Contaminants	Bouteille Niskin	Gironde
Température / Salinité / O2	Sonde multiparamètre	Bayonne
Turbidité / MES	Turbidimètre	Boulogne - Calais
	ADCP	Loire



5.3.2.1.3 - Suivi du milieu vivant

Le suivi du milieu vivant se heurte à des difficultés relatives à la mise en place de protocoles fiables et pouvant fournir des résultats de mesures exploitables. L'analyse qui peut être faite dépend en effet beaucoup de la connaissance initiale du milieu et des moyens de mesure mis en place auparavant.

Le milieu vivant est, de plus, sujet à d'importantes fluctuations naturelles, saisonnières, ou interannuelles, en termes de densité ou de diversité, qui rendent difficile l'interprétation des mesures durant un dragage.

Les protocoles sont similaires aux suivis sur les opérations de dragage conventionnelles (cf. « *Guide méthodologique sur les suivis des dragages et immersions* »).

5.3.2.2 - Echelles spatiales et temporelles

Tous les paramètres environnementaux qui peuvent être étudiés pour déterminer l'impact environnemental montrent qu'il existe de grandes variations naturelles aussi bien à l'échelle spatiale qu'à l'échelle temporelle. Ainsi, la stratégie d'étude de suivi doit prendre en compte cette hétérogénéité et s'assurer que la variabilité à long terme a été considérée lors de l'acquisition des données de base.

Par exemple, la turbidité peut varier selon les cycles de marée et des saisons, et la structure, la diversité et l'abondance de la communauté benthique peuvent être influencées par la saison de croissance.

5.3.2.2.1 - Échelle spatiale étudiée

On peut distinguer trois échelles spatiales différentes en ce qui concerne les suivis relatifs au dragage par injection d'eau :

- à proximité immédiate de la drague :
 - échantillonnage réalisé à différentes distances de la drague pendant son fonctionnement,
 - profils verticaux à l'ADCP ou à la sonde multifonctionnelle,
- zone draguée, éventuellement élargie suivant les impacts attendus :
 - stations de mesures fixes réparties sur la zone suivant schéma de dragage,
 - mesures sur transects,
- environnement global :
 - réseau de suivi estuarien type Loire, Gironde, Weser ou Elbe,
 - les échantillons d'eau sont la plupart du temps prélevés à trois profondeurs : en surface, à mi-profondeur, et au fond.

Ces trois approches sont complémentaires dans le cadre du suivi du dragage à injection. Les deux premières peuvent mesurer les impacts sur le champ proche, alors que la troisième pourra mesurer les impacts potentiels à grande échelle et fournira surtout des valeurs de références et une compréhension des processus naturels en jeu.

La densité des mesures est à établir au cas par cas, suivant la nature des opérations envisagées et la sensibilité du milieu.

5.3.2.2.2 - Échelle temporelle

Afin de présenter des résultats exploitables pour pouvoir analyser les impacts du dragage, les suivis doivent être réalisés avant, pendant et après les opérations, en prenant en compte les caractéristiques du site et du dragage :

- suivi avant dragage :
 - sert de référence au niveau de la zone draguée,
 - est généralement réalisé quelques jours ou quelques semaines avant les opérations,
 - peut être réalisé sur une longue période avant les opérations afin de mieux comprendre les variations naturelles locales (si pas de suivi à grande échelle déjà réalisé sur la zone d'étude), ou bien couplé à un réseau de surveillance long terme (MAREL en Seine, SYVEL en estuaire de la Loire ...),
 - doit être défini suivant les caractéristiques du site :
 - prise en compte de la marée,
 - prise en compte des débits fluviaux,
 - prise en compte du bouchon vaseux,
- suivi pendant le dragage :
 - permet de mesurer les impacts du dragage à injection,
 - doit être défini suivant les caractéristiques du site :
 - prise en compte de la marée,
 - prise en compte des débits fluviaux,
 - prise en compte du bouchon vaseux,
- suivi après le dragage :
 - permet de mesurer les processus de récupération/recolonisation du milieu,
 - est réalisé sur une période dépendant des paramètres étudiés (physiques ou biologiques).

5.4 - Propositions d'éléments de suivi opérationnel

Le « *Guide méthodologique sur les suivis des dragages et des immersions* » (Geode, 2012) propose un panel d'outils méthodologiques pour mettre en œuvre des suivis adaptés aux opérations de dragage en général, suivant les caractéristiques des sites et des projets.

Dans le cas du dragage à injection d'eau, il n'existe pas réellement, dans la bibliographie et sur les sites étudiés, de suivi opérationnel de routine. Les suivis initiaux, en première utilisation de la technique sur un site, y sont cependant bien détaillés.

Le suivi opérationnel est à établir au cas par cas, suivant le site du projet, au même titre que pour les autres techniques de dragage.

Dans cet esprit, le tableau ci-après présente l'intérêt général constitué par chaque suivi à mettre potentiellement en place. Les suivis à mettre en œuvre doivent répondre à un besoin technique, réglementaire, ou à un enjeu particulier au site, en se posant toujours les bonnes questions :

- quelle est la nature du courant de densité généré ?
- quel est le contrôle exercé sur celui-ci ?
- quelle est la qualité du milieu dragué ?
- quels sont les enjeux à proximité ?



On peut ainsi distinguer les suivis mis en place sur un site lors d'une première utilisation de la technique du dragage à injection. Ces suivis, plus proches des suivis de types scientifiques ou expérimentaux, ont pour but de connaître les zones d'influence potentielle générales du courant de densité et la sensibilité du milieu. Chaque site ayant ses spécificités, une bonne compréhension de celui-ci à la première utilisation du dragage à injection permet ensuite, lors des futurs travaux, la mise en place d'un suivi allégé, en routine, permettant simplement la vérification des paramètres identifiés précédemment.

Par exemple, pour des sites où il n'a pas été permis de mettre en évidence le courant de densité du fait des très fortes charges en MES et des fortes variabilités naturelles du milieu ambiant, il apparaît illusoire de programmer un suivi du courant de densité.

Ces principes généraux peuvent s'appliquer de différentes manières, suivant que le site se trouve en milieu ouvert ou fermé (bassin), en milieu fluvial, ou estuarien (voir parties suivantes). Ainsi, des propositions de suivi pour des cas-types sont proposées dans le chapitre 6.

Tableau 5-3 : Objectif des suivis de routine potentiellement mis en place

		Zone de dragage		Zone d'impact potentiel		Zone à enjeux ²	
		Evaluation initiale	Phase opérationnelle	Evaluation initiale	Phase opérationnelle	Evaluation initiale	Phase opérationnelle
Hydro-sédimentaire	Courants	Données sur l'efficacité locale : vitesse du courant de densité	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent
	Transport /dispersion	Données sur l'efficacité locale du procédé	Non pertinent	Aide à définir l'emprise de la zone d'impact potentiel	Non pertinent	Aide à définir les zones à enjeux potentiellement exposées	Non pertinent
Fonds marins	Bathymétrie	Renseigne sur les volumes extraits et l'efficacité des opérations	Renseigne sur les volumes extraits et l'efficacité des opérations	Aide à définir l'emprise de la zone d'impact potentiel (sédimentation ou érosion)	Non pertinent	Aide à définir les zones à enjeux potentiellement exposées	Permet de vérifier l'impact a posteriori (érosion ou sédimentation)
Qualité des sédiments	Densité	Pertinent uniquement si la notion de cote de navigation représente un enjeu particulier de la zone ou du projet					
	Granulométrie	Données sur l'efficacité locale de la technique : dispersion des fines	Non pertinent	Aide à définir l'emprise de la zone d'impact potentiel (augmentation de la proportion de fines)	Non pertinent	Aide à définir les zones à enjeux potentiellement exposées	Permet si nécessaire de vérifier l'impact à l'issue des travaux (fines)
	Contaminants	Contrôle réglementaire avant travaux	Contrôle réglementaire avant travaux	Contrôle réglementaire avant travaux	Contrôle réglementaire avant travaux	Contrôle réglementaire avant travaux	Contrôle réglementaire avant travaux
	Nutriments	Pertinent en cas d'enjeu dû à la présence de nutriments sur la zone					
	Matière organique	Pertinent en cas d'enjeu particulier sur le milieu vivant et la matière organique (eutrophisation...)					
	Bactériologie	Vérification de la qualité micro-biologique des matériaux					
Qualité des eaux	Matières en suspensions	Données sur l'emprise du courant de densité et sa dispersion (si nécessaire, suivi à l'ADCP du panache)	Contrôle de la qualité des eaux pendant les opérations (contrôle pontuel) ou réseau de surveillance existant	Aide à définir l'emprise de la zone d'impact potentiel (si nécessaire, suivi à l'ADCP du panache)	Contrôle de la qualité des eaux en opération (pontuel)	Aide à définir les zones à enjeux potentiellement exposées (si nécessaire, suivi à l'ADCP du panache)	Contrôle de la qualité des eaux pendant les opérations (contrôle pontuel)
	Température / Salinité	Vérification présence thermocline / halocline sur la zone	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent
	Oxygène dissous	Données sur la qualité générale de la colonne d'eau	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation	Données sur la qualité générale de la colonne d'eau	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation	Données sur la qualité générale de la colonne d'eau	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation
	Contaminants	Vérification du non-impact	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation	Vérification du non-impact	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation	Vérification du non-impact	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation
	Nutriments	Vérification du non-impact	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation	Vérification du non-impact	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation	Vérification du non-impact	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation
	Matière organique	Pertinent en cas d'enjeu particulier sur le milieu vivant et la matière organique (eutrophisation...)					
	Bactériologie	Vérification du non-impact	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation	Vérification du non-impact	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation	Vérification du non-impact	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation
Milieu vivant	Espèces benthiques	Etat initial	Etat initial éventuellement à mettre à jour	Etat initial	Etat initial éventuellement à mettre à jour	Vérification du non-impact (suivant enjeux qualité des eaux et qualité des sédiments) Utilisation des réseaux de suivi déjà mis en place	Pertinent si enjeux détectés lors de la 1 ^{ère} utilisation
	Espèces pélagiques	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Suivi long terme suivant enjeux	Suivi long terme suivant enjeux

² exemple de zones à enjeux (suivant caractéristiques du site) : zone conchylicole, espace naturel protégé, activité industrielle sensible, zones de baignade...



6 - ÉTUDES DE CAS

6.1 - Introduction

L'objet de la présente partie est de proposer des cas concrets d'application du dragage à injection d'eau et de moyens de suivis, suivant les principes généraux méthodologiques énoncés précédemment. Trois « cas types » d'application du dragage par injection d'eau sont ainsi proposés :

- Étude de cas n°1 : Dragage d'entretien par injection d'eau dans un port estuarien,
- Étude de cas n°2 : Dragage d'entretien par injection d'eau dans un port fluvial,
- Étude de cas n°3 : Dragage d'entretien par injection d'eau en bassin portuaire.

6.2 - Etude de cas n°1 : dragage dans un port estuarien

6.2.1 - Contexte

Le présent cas d'étude correspond à celui d'un port estuarien. Les volumes d'entretien sont de plusieurs centaines de milliers à des millions de mètres cubes chaque année, dans un milieu extrêmement dynamique avec les forts courants générés par les marées et le débit fluvial.

Les estuaires sont généralement caractérisés par la présence d'un bouchon vaseux, dont la position dépend du débit fluvial. Le site peut également connaître, en période d'étiage, des baisses importantes de concentration en oxygène dissous.

La mise en œuvre d'un dragage à injection d'eau en milieu estuarien doit en outre prendre en compte les éléments suivants :

- courantologie complexe : la bonne réalisation du projet passe par une connaissance approfondie des courants locaux,
- stratification : les thermoclines ou haloclines peuvent affecter de manière importante le courant de densité. Leur connaissance est un paramètre technique important pour le projet de dragage,
- les problématiques de remises en suspension, sédimentation, calculs des volumes dragués, sont rendues plus complexes par la présence éventuelle d'un bouchon vaseux (fortes turbidités et variabilités naturelles ne permettant pas de distinguer ce qui relève des opérations de dragage à injection d'eau des phénomènes naturels),
- les sédiments ne sont pas contaminés, ou très peu,
- la désorption de contaminant et donc le suivi de ce paramètre dans la qualité de l'eau représente un enjeu moindre qu'en milieu fluvial : les effets du dragage à injection sont négligeables à côté des phénomènes de désorption en jeu au moment du passage d'un milieu doux à un milieu salé.

Les estuaires sont généralement l'objet de suivis environnementaux à grande échelle.



6.2.2 - Zones draguées

Dans le cas d'un port estuarien, les zones draguées correspondent en général :

- aux chenaux,
- à la souille d'un quai,
- à l'écrêtage de dunes ou de sillons,
- à la zone de câbles ou de conduites.

6.2.3 - Mise en œuvre du dragage à injection d'eau

Le dynamisme du milieu estuarien implique une stratégie d'utilisation spécifique du dragage à injection d'eau. Les sédiments remis en mobilité sont repris et dilués rapidement dans les courants locaux. Ils réintègrent le transport sédimentaire naturel local, et n'ont donc pas de zone de destination spécifique.

Les incidences potentielles de cette application du dragage à injection d'eau sont souvent réduites puisque le système imite des processus existant naturellement dans l'estuaire, si bien que les augmentations de matières en suspension, ou les diminutions d'oxygène dissous, dans la colonne d'eau restent généralement dans les gammes de variations naturelles et sont donc difficilement décelables. Les augmentations en matières en suspension sont cependant plus fortes et concentrées sur le fond.

Lors des périodes d'étiage, les teneurs en oxygène dissous sont plus faibles (risque d'hypoxie ou anoxie) et donc potentiellement vulnérables à une baisse supplémentaire. Si les expériences réalisées montrent que le dragage à injection d'eau n'aggrave pas ces situations, des processus de veille et d'alerte peuvent être mis en place pour encadrer les pratiques de dragage à injection d'eau sur les périodes sensibles.

6.2.4 - Objectifs de suivis

La complexité du milieu estuarien implique la mise en place d'un suivi adapté, souvent lourd et complexe, lors de la première utilisation du dragage à injection d'eau, afin de bien identifier les incidences potentielles locales de la technique et son efficacité. Suivant les résultats observés, le suivi de routine, lors des utilisations suivantes, peut être considérablement allégé.

Ainsi, en première utilisation ou à titre d'expérimentation, les suivis auront pour objectif d'acquérir, si elles ne sont pas déjà connues :

- les données physiques nécessaires à la bonne utilisation de la technique du dragage à injection d'eau : courantologie, morphologie locale, nature des sédiments,
- les données de qualité du milieu nécessaires pour déterminer les impacts (ou l'absence d'impact) de la technique (MES, oxygène dissous, contaminants),
- la connaissance des habitats présents sur le site (définition des zones de sensibilité).

En utilisation régulière, le suivi aura pour objectif de vérifier la cohérence générale au cours du temps des conclusions des premiers suivis expérimentaux.

Il est préconisé de privilégier l'utilisation des réseaux de suivi estuarien déjà opérationnels, éventuellement à adapter localement suivant les sensibilités.

6.3 - Étude de cas n°2 : dragage dans un port fluvial

6.3.1 - Contexte

Le présent cas d'étude correspond à celui d'un port fluvial. Les volumes d'entretien sont généralement plus faibles qu'en estuaire, dans un milieu caractérisé par de forts courants réguliers (débits fluviaux).

Le milieu fluvial présente les spécificités suivantes :

- les problèmes de stratification haline sont moindres que dans l'estuaire,
- la dissolution des contaminants est potentiellement plus importante puisque ceux-ci n'ont pas connu encore de désorption massive en arrivant en milieu salé,
- les caractéristiques des courants sont relativement constantes comparées aux courants estuariens,
- les turbidités naturelles sont plus faibles (en dehors des emprises du bouchon vaseux).

6.3.2 - Zones draguées

Dans le cas d'un port fluvial, les zones draguées sont similaires à celles en estuaire.

- chenaux,
- souille d'un quai,
- écrêtage de dunes ou de sillons,
- zone de câbles ou de conduites.

6.3.3 - Mise en œuvre du dragage à injection d'eau

Les forts courants en milieu fluvial impliquent une utilisation dispersive du dragage à injection d'eau : les sédiments remis en mobilité sont repris et dilués rapidement dans le transit fluvial.

Les courants étant unidirectionnels, la trajectoire du courant de densité est plus facile à anticiper.

6.3.4 - Objectifs de suivis

Le milieu fluvial est souvent moins complexe qu'en estuaire, les objectifs des suivis sont donc potentiellement plus faciles à atteindre. Les problématiques de qualité du milieu sont cependant plus importantes :

- les valeurs de turbidité sont plus faibles, cela implique donc une plus forte sensibilité à l'augmentation des MES dans le milieu ambiant,
- sensibilité supplémentaire à la désorption.

Ainsi, en première utilisation ou à titre d'expérimentation, les suivis auront pour objectif d'acquérir, si elles ne sont pas déjà connues :

- les données physiques nécessaires à la bonne utilisation de la technique du dragage à injection d'eau : courantologie, morphologie locale, nature des sédiments,
- les données de qualité du milieu nécessaires pour déterminer les impacts (ou l'absence d'impacts) de la technique (MES, oxygène dissous, contaminants),
- la connaissance des habitats présents sur le site –(définition des zones de sensibilité).



En utilisation régulière, le suivi aura pour objectif de vérifier la cohérence générale au cours du temps des conclusions des premiers suivis expérimentaux.

6.4 - Étude de cas n°3 : dragage dans un bassin portuaire

6.4.1 - Contexte

Le présent cas d'étude correspond à celui d'un port maritime doté de bassins portuaires, ouverts ou fermés. Les volumes concernés par les dragages sont généralement plus faibles en milieu fermé qu'en milieu ouvert. Les courants locaux naturels sont inexistantes ou faibles. Mais la morphologie est souvent favorable : sédimentation près des quais générant des pentes vers le centre du bassin, accumulation près des ouvrages d'ouverture, si existant... Les objectifs de distance de transport sont modestes car dépendants de la taille du bassin.

Les sédiments sont vaseux et d'une qualité potentiellement dégradée, suivant l'historique local et la fréquence des entretiens.

6.4.2 - Zones draguées

Les zones draguées correspondent généralement à :

- l'écluse du bassin,
- les bords de quais,
- les câbles et conduites sous-marines.

6.4.3 - Mise en œuvre du dragage à injection d'eau

Le dragage à injection d'eau permet de déplacer les sédiments accumulés en bordure du quai vers les surprofondeurs en centre du bassin. La drague à injection va donc circuler entre le centre du bassin et les bords du quai.

En bassin fermé, la notion de zone d'impact potentiel et de zone d'enjeux est perturbée par le fait que les impacts sont circonscrits à l'intérieur du bassin fermé. Les enjeux environnementaux sont également beaucoup plus faibles dans un milieu fortement anthropisé.

6.4.4 - Objectifs de suivis

Les faibles enjeux environnementaux et le relatif contrôle du courant de densité permet de réduire les suivis mis en place. L'action de la drague à injection est, de plus, relativement homogène : pas de structure morphologique particulière ni de courants locaux pouvant influencer sur le courant de densité de manière non-anticipée.

Les suivis mis en place doivent donc s'assurer de l'efficacité de la technique et du non-conflit avec les usages présents sur le site.

7 - APPROCHE REGLEMENTAIRE

7.1 - Contexte

En France, la technique du dragage à injection d'eau a fait l'objet d'autorisations dans le cadre des premières expérimentations réalisées, bien que celles-ci demeurent minoritaires. Dans la mesure où elle ne constitue pas une extraction de matériaux du milieu marin pour les sortir de l'eau, comme les autres techniques de dragage, il convient de s'interroger sur les conditions d'application de la réglementation en vigueur.

L'objectif du présent paragraphe est de préciser le régime juridique applicable à cette technique, au regard des éléments détaillés dans ce guide et des réglementations existantes dans les pays européens utilisant le dragage à injection de manière courante depuis plusieurs années.

7.2 - Exemples de réglementations existantes en Europe

7.2.1 - Allemagne

La réglementation allemande considère le dragage à injection d'eau, largement utilisé sur l'Elbe, l'Embs et la Weser depuis les années 80-90, comme une technique de dragage comme les autres.

Les autorités allemandes utilisent des niveaux de référence RW1 et RW2 qui sont appréciés de manière semblable par rapport aux niveaux de référence N1 et N2 en France : jugement a priori de l'inocuité de l'échantillon, mais laissant au cas par cas la possibilité de réaliser des études complémentaires pour enrichir l'argumentation. Cette démarche s'applique directement au dragage à injection d'eau, dont le niveau de détail des études environnementales dépend de ces critères.

7.2.2 - Royaume-Uni

Au Royaume-Uni, les travaux de dragages sont conditionnés par l'obtention d'une « licence ». De la même manière que les allemands et les français, les anglais utilisent des seuils de référence, dont l'interprétation est faite de manière similaire. Cette procédure est utilisée dans le cadre des opérations de dragage et d'immersion, représentant plus de 98% des cas au Royaume-Uni.

Jusqu'à présent, les dragages hydrodynamiques, incluant le dragage à injection d'eau, n'étaient soumis à aucune procédure. Depuis 2011, les DRAGAGE PAR INJECTION D'EAU sont soumis à autorisation et obtention d'une licence. Un guide méthodologique sur les critères à prendre en compte dans les procédures d'attribution des licences est en préparation par le CEFAS.



7.3 - Recommandations sur les critères à prendre en compte

Au regard des réglementations existantes dans les pays utilisant le dragage à injection depuis plusieurs décennies, il convient de traiter le dragage à injection d'eau comme une technique de dragage comme les autres, en appliquant les mêmes critères en ce qui concerne les niveaux de contaminations.

La prise en compte du volume (précisée en droit français à l'article R.214-1 du Code de l'Environnement) est cependant plus difficile à appréhender, du fait des incertitudes associées à la mesure des volumes dragués par le dragage par injection d'eau dans certains milieux naturels. Trois méthodes différentes peuvent cependant être envisagées :

- le volume peut être calculé par différence de cubature entre un relevé bathymétrique effectué avant l'opération et un second relevé effectué au moins une semaine après la fin de l'opération, avec les incertitudes et difficultés liées à ce type de mesures en estuaire,
- le volume peut être calculé entre la cote naturelle et la cote objectif, pouvant différer du volume effectivement dragué de par les aléas associés aux variations naturelles des fonds sur le site et à la mise en œuvre de la technique,
- le volume peut être estimé à partir d'un rendement moyen de la drague sur la durée d'utilisation, qui peut être déterminé statistiquement à l'issue d'une utilisation significative du dragage par injection d'eau sur le site.



BIBLIOGRAPHIE



- AIPCN, 2012 (sous presse). Project of Guidance document for Water Injection Dredging.
- Athmer, 2004. Water Injection Dredging : unbeatable economics for maintenance dredging.
- BFG, 2011. Umweltauswirkungen von Wasserinjektionsbaggerungen.
- Borst et al., 1994. Monitoring of Water Injection Dredging, Dredging Polluted Sediment (Second International Conference on Dredging and Dredged material placement).
- Bray, 2008. Environmental aspects of dredging.
- British Waterways, 2000. Environmental Appraisal of proposed water injection dredging of limehouse basin, London.
- Broads Authoritites, 2006. Monitoring of Trial Water Injection Dredging, River Bure, Broads: Dredge plume and sediment transport study.
- Broads Authoritites, 2007. Water Injection Dredging Trial.
- Broads Authoritites, 2010. Sediment Management Strategy.
- Bunschoten P., 2002. Creating a fairytale in Hong Kong (PIANC 2002, 30th International navigation congress).
- CETMEF, 2009. Dragage Hydrodynamique. Etat des lieux des pratiques françaises et recommandations générales.
- Commission of the European Communities, 1988. Water Injection Dredging : development of a new dredging method for use in maintenance dredging.
- CREOCEAN, 2006 à 2009. Suivi des dragages par injection d'eau. GPMNSN.
- Dimou N. K., Blumberg A. F. Evaluating the effects of the use of water injection dredging system in the Hudson river estuary
- Ecospan, 2008. Pre and post dredge environmental monitoring and bathymetric surveyx of the area in the vicinity of the royal William Yard Plymouth.
- Ecospan, 2009. Environmental monitoring of the Salcombe-Kingsbridge estuary prio to and after the mainteance dredging of Batson Creek
- Ecospan, 2009. Prediction of sediment movement and deposition in the Salcombe estuary as a result of proposed dredging at Kingsbridge, Lincombe and Batson Creek.
- Ecospan, 2010. Environmental assessment of the potential impact of proposed dredging works within the salcombe-Kingsbridge estuary on its faune and flora.
- Estourgie, 1989. Theory and practice of Water Injection Dredging.
- Gert de Vries et al. A Special unit for Water Injection Dredgers
- Ginger , 2009-2011. Suivi de l'incidence de la technique de remobilisation des sédiments par injection d'eau. GPMB
- Ginger, 2010. Etude d'incidence de la technique de remobilisation des sédiments par injection d'eau (Bayonne, Essai 2010).
- HARVEY, J. P., Mazik, K., COWX, I. G. & Elliott, M., 2004. Water quality, sediment, benthos and fisheries baseline survey: River Don Water Injection Dredging (Report to British Waterways, 157 pp.)
- HOCER, 2010. Réalisation d'un suivi environnemental de dragages par injection d'eau pour le GPMNSN.
- HR WALLINGFORD, 2000. Medway Approach Channel Deepening - Environmental statement
- HR WALLINGFORD, 2001. Monitoring around water injection dredging Medway Port



- HR WALLINGFORD, 2002. Medway Approach Channel Deepening Silt monitoring and sedimentation assessment.
- Hull, 2002-2004. Impacts of water injection dredging (WID) on fish populations.
- IDRA, 2011. Dossier d'incidence de suivi d'un test de mise en suspension de sédiments par injection d'eau (Bayonne).
- Knox, 1997. Water Injection Dredging in the USA. (Proceedings of the WEDA 17).
- Laboratorio de ensayos hidráulicos de las flores, 2004. Actualización del pma de los relimpia y mantenimiento del canal del dique.
- McKie et al., 1994. Port Edgar Marina Dredging Operation.
- Maushake C., Collins W., 2001. Acoustic classification and water injection dredging.
- Meyer-Nehls R., von Gabriele Gönnert B., Christiansen H., Rahlf H., 2000. Das Wasserinjektionsverfahren : Ergebnisse einer Literaturstudie sowie von Untersuchungen im Hamburger Hafen und in der Unterelbe //Results of a Literature Review and of Measurements in the Port of Hamburg and the Elbe Estuary.
- Murphy, A-M., 1993. DRP site visit : water injection dredging (dredging research VOL DRP-93-1, US army engineer waterways experiment station).
- Netzband et al., 1999. Water injection Dredging in Hamburg - Application and Research.
- Netzband et al., 2009. Relocation of dredged material from hamburg harbour in the river elbe.
- Papenmeier S., Schrottke K., Bartholomä A., 2009. Relocation of dredged material from hamburg harbour in the river elbe
- Papenmeier, S., Schrottke, K., Bartholomä, A., Steege, V., 2009. Controlling impact of water injection dredging of subaqueous dunes fields in the lower Weser, based on hydro-acoustics, optics and laser-optical measurements. (German Soc. of Limn. (DGL), ext. proceedings, annual conference, 28 September– 2 October 2009 (Oldenburg).).
- Pennekamp et al., 2002. Turbidity Caused by Dredging; Viewed in Perspective. Terra Aqua.
- Port of Antwerp, 2011. Monitoring baggering door waterinjectie
- Port of London Authority, 2007. Port of London Authority: Baseline Document for Maintenance Dredging
- Schettini, 2008. Monitoração da dragagem por injeção de água no porto de itajaí.
- Services Maritimes des Ports de Boulogne Calais, 2002. Essais de dragage avec le bateau "Jetsed".
- Soares, 2006. Avaliação do processo de dragagem por injeção de água em estuários.
- SOGREAH, 2008. Système Waterjet de la passerelle RORO T1 : document d'incidence.
- Spencer K.L., Dewhurst R.E. , Penna P., 2006. Potential impacts of water injection dredging on water quality and ecotoxicity in Limehouse Basin.
- Spencer K.L., Dewhurst R.E., 2002. Assessment of contamination and impact of water injection dredging in Limehouse basin, London, UK.
- Spencer K.L., 2012. Impacts potentiels du dragage à injection d'eau. Etabli pour ARTELIA.
- Stengel T., 2004. Water injection dredging in estuaries characterised by sandy sediments, Experiences in the Weser Estuary.
- Stengel T., 2006. Water injection dredging in the lower Weser an ecological and economical alternative to hopper dredging (PIANC CONGRESS).



- Sullivan, Nicola, 2000. The use of agitation dredging, water injection dredging and sidecasting : results of a survey of ports in England and Wales.
- Thompson R., Herington L., 1998. Kent waste local plan.
- US Army Corps of Engineers, 1993. Water injection dredging demonstration on the upper Mississippi River.
- US Army Corps of Engineers, 1995. Dredge plant equipment and systems processes; summary report for technical area 3.
- Van Oord, 2006. Water Injection Dredging : The natural way of dredging.
- Van Raalte G.H., Bray R., 2006. Hydrodynamic dredging : principles, effects and methods (CEDA 1999).
- Vandycke, 1999. Water Jet Technologies Offer New Power and Accuracy (CEDA 1999)
- Verhagen, 2000. Water Injection Dredging.
- Verweij et Winterwerp, 1999. Environmental impact of water injection dredging (CEDA 1999).
- Wilson D., Welp T., Clausner J., 2007. Water Injection Dredging in US waterways, history and expectations. WODCON XVIII.
- Winterwerp et al., 1999. On the far-field impact of Water Injection Dredging.
- Winterwerp et al., 2002. Far-field impact of water injection dredging in the Crouch River.



**ANNEXE 1 :
ENGINS DE DRAGAGE A
INJECTION D'EAU REPERTORIES
(2012)**



Engin	Propriétaire	Année	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Tirant d'eau (m)	Propulsion (kW)	Pompe (kW)	Profondeur dragage (m)
Norma	Boskalis	1981/2008	27	9,5	3	2,15	625	NR	19
Arca	Boskalis	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Hol Blank	Bremenports	2006	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Hol Deep	Bremenports	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Dhamra	Deme	NR	31	10	NR	NR	NR	NR	22
Parakeet	Deme	NR	31	11,75	3,75	3,07	NR	2*184	25,7
Deltaqueen	Dutch Dredging	NR	43,2	12,15	2,21	1,09	2*405	NR	20
Airset	Dutch Dredging	NR	31,8	10,12	2	1,2	2*185	2*220	20
Milouin	GPMNSN	1997/2011	36,8	14,02	NR	2,20	2*486	2*545	20
Brotonne	GPMR	1985/2001	48,5	16,7	8,1	2,5	1193	2*382	5 à 20
Inai Terasek	Inai Kiara	2008	35,2	12	4	NR	NR	NR	NR
International Seaport Dredging Limited (ISD)	International Seaport Dredging Limited (ISD)	2009	31	10	4,8	3,4	2*1350	1200	4,5 à 22
MS Akke	Meger et van der Kamp	NR	46	11,8	NR	1,2	2*221 PS	2*240	23
Maasmond	Meger et van der Kamp	NR	47,2	12	NR	2,25	882	1250	21
Steubenhöft	Niedersächsisches Hafenamts	2009	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Draga Tocantins	Van Oord	2009	35,72	8,25	2,57	1,7	2*261	447	20
Draga Rio Madeira	Van Oord	2009	35,72	8,25	2,57	1,7	2*261	447	20
Antareja	Van Oord	1995	47,17	11,22	4	2,84	2*447	2*350	20
Odin	Van Oord	2007	17,5	4,5	1,8	1,45	2*89	220	10



Engin	Propriétaire	Année	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Tirant d'eau (m)	Propulsion (kW)	Pompe (kW)	Profondeur dragage (m)
Wodan	Van Oord	2007	32,85	12,15	1,84	1,39	Tug	2*459	20
HAM 922	Van Oord	1992	29,8	6,06	2,4	1,8	17	502	20
Norham Camorim	Van Oord	1982/1995	46,28	15	3,5	2,96	3*223	1007	25
Iguazu	Van Oord	1999	43,8	12,5	4,2	2,9	2*746	2*285	26,85
Jetsed	Van Oord	1987/2003	37,34	13,85	2,2	1,4	645	452+400	24,9
Baldur	Van Oord	NR	8,2	NR	NR	0,6	NR	NR	6,5
Njord	Van Oord	1994/2009	34,7	11,67	2,48	1,8	2*261	716	19
Sagar Manthan	Van Oord	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
BT 208	Weeks Marine Dredging Inc (USA)	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR



**ANNEXE 2 :
UTILISATION DU DRAGAGE A INJECTION A
L'ETRANGER**

Utilisation du dragage à injection à l'étranger (D'après MEYER 2000, WILSON 2008 et AIPCN 2012, complété par ARTELIA 2012)

NR : Non Renseigné X : suivi réalisé 0 : suivi non réalisé

Pays	Site	Régime	Date	Durée (jours ou heures)	Volume déplacé (m ³)	Sédiments	Contaminants	Suivi			Modèle
								Phy	Chim	Bio	
Royaume- Uni	Broads	Fluvial	2006	16	7 900	D50=12-30µm / 60-80% de fines	0	X	0	0	X
	Crouch	Estuarien	janv-96	7	6 200	Vase argileuse D50=4µm	NR	X	0	0	X
	Don	Fluvial	1997	NR	NR Entretien	Fins à grossiers	HAP	X	X	X	0
	Port of Tilbury Bellmouth (Thames)	Estuarien / Portes à flot	1990-2011	NR	Entretien 85 000 m ³ /an	Vase	TBT sur couches inférieures	X	X	0	0
	Chenal (Thames)	Estuarien	Entretien	NR	Entretien 6 000 m ³ /an	Sables fins, vases, rarement grossier	NR	NR	NR	NR	NR
	Shell Bravo (Thames)	Estuarien	NR	20h	60 000m ³ /an	Sables fins, vases	NR	X	X	NR	NR

Pays	Site	Régime	Date	Durée (jours ou heures)	Volume déplacé (m ³)	Sédiments	Contaminants	Suivi			Modèle
								Phy	Chim	Bio	
	Custom House Jetty (Thames)	Estuarien	1990-2011	NR	NR	NR	NR	NR	X	NR	NR
	Robbins Wharf (Thames)	Estuarien	1990-2011	NR	1 000m ³ /an	Vase	0	0	0	0	0
	Oikos Terminal (Thames)	Estuarien	NR	15h	60 000m ³ /an	Sables fins, vases	0	NR	NR	NR	NR
	Souilles de Petroplus Coryton	Estuarien	NR	50h	105 000 m ³ /an	Sables moyens, vases, fines	NR	NR	NR	NR	0
	Limehouse (Thames)	Bassin fermé	Nov 2002 - Janv 2003	NR	NR	fins	Nutriments	0	X	0	0
	Medway	Estuarien	2001	NR	Approfondissement + 8 000/an entretien	NR	NR	X	0	0	X
	Portsmouth	Ria	NR	NR	NR	NR	NR	X	X	0	0

Pays	Site	Régime	Date	Durée (jours ou heures)	Volume déplacé (m ³)	Sédiments	Contaminants	Suivi			Modèle
								Phy	Chim	Bio	
	River Severn (Gloucester)	Fluvial - Estuarien - Bassin fermé	2002-2012	NR	NR Entretien	Sables /graviers + fines	Ammonia	X	X	0	0
	Port Hedgar (Ecosse)	NR	1993	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	Swansea Marina (Gales)		2007								
Allemagne	Elbe (Hambourg, Cuxhaven)	Estuaire	Utilisation 1988-2011 Expériences 1997-1999	NR	Entretien 400 000m ³ /an au niveau du port de Hambourg, NR sur l'estuaire	Sables fins et vases	NR	X	X	0	0
	Weser (Bremenport, Bremerhaven)	Estuaire	Utilisation 2003-2011 Expériences été 2008	NR	NR plusieurs interventions ponctuelles 300-1 000m ³	Sables moyens	0	X	X	X	0
	Ems (Herbum , Papenburg)	Estuaire	Expérience Mars 2010	8 j	NR	NR	0	X	X	0	0
	Eider (Tönning)	Estuaire	1995	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR

Pays	Site	Régime	Date	Durée (jours ou heures)	Volume déplacé (m ³)	Sédiments	Contaminants	Suivi			Modèle
								Phy	Chim	Bio	
Pays-Bas	Haringvliet	Estuaire	1994	14 j	121 000	Vases	Contaminé PCB, HAP, métaux lourds	X	X	0	0
	Rotterdam	Estuarien	Années 90	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	Groningen	Estuarien	2011	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	Außenhafen Terneuzen	Estuarien	1988-1989	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	Epon Harbor Groningen/Delfzijl (mer de Wadden)	Estuaires	1989 1991	NR	NR	Sables fins	NR	NR	NR	NR	NR
	Chenaux - Mer de Wadden	Mer de Wadden	NR	NR	NR	Vases	NR	NR	NR	NR	NR
	Texel (Mer de Wadden)	NR	NR	NR	NR	Vases	NR	NR	NR	NR	NR
	Escaut	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR

Pays	Site	Régime	Date	Durée (jours ou heures)	Volume déplacé (m ³)	Sédiments	Contaminants	Suivi			Modèle
								Phy	Chim	Bio	
	Port à flot à Hanswert	NR	1992-1993	NR	NR	Vases et sables	NR	NR	NR	NR	
Irlande	Waterford	NR	1992-1993	NR	NR	Limons et sables	NR	NR	NR	NR	
Italie	Venise	Lagune	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
Etats-Unis	Atchafalaya river	Estuarien	2009	161h	33 440	NR	NR	NR	NR	NR	
	Galveston district (Houston Ship Channel)	Estuarien	2001 (Juillet-Septembre)	13 j	272 331	NR	NR	NR	NR	NR	
			2004 (Juillet-Novembre)	89 j	435 775						
	Hudson Estuary	Estuarien	June 2005	7 j	38 000	Vases	NR	X	NR	NR	X
	Mississippi amont	Fluvial	Juillet-Aout 1992	4 j	6 154	Sables fins 0,3-0,4mm	NR	X	0	0	0
	Mississippi	Estuarien / Fluvial	2009	565h	264 700	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	Mississippi – Port de la Nouvelle Orléans	Estuarien	1998, (Janvier-Mars)	57 j	500 371	NR	NR	NR	NR	NR	NR

Pays	Site	Régime	Date	Durée (jours ou heures)	Volume déplacé (m ³)	Sédiments	Contaminants	Suivi			Modèle
								Phy	Chim	Bio	
			2001 (Fevrier-Mars / Aout)	46 j	257 331	NR	NR	NR	NR	NR	NR
			2002 (Juin-Juillet)	40 j	683 389	NR	NR	NR	NR	NR	NR
			2005 (Mars)	28 j	408 497	NR	NR	NR	NR	NR	NR
			2009	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	Fernandina Harbor Marina	Estuarien	2012	Projet	Projet	Projet	Projet	Projet	Projet	Projet	Projet
	Calcasieu river	Estuarien	2009	86h	5 490	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	Mobile district	Estuarien	2005	5,5 j	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	Calumet	Estuarien	1994	1 j	12 034	Vases	NR	NR	NR	NR	NR
Portes à flot		2009	22 h	17 245	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
Brésil	Sao Luis / Sao Marcos	NR	NR	NR	750 000/an	Vases et sables	NR	NR	NR	NR	NR
	Itajai	Estuarien	1999-2009	NR	Entretien	NR	NR	X	X	0	X
Tanzanie	Dar es Sallam	NR	1997	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Nouvelle-Zélande	NR	NR	1985	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Chine	Hong-Kong	NR	1992-1994	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Inde	Mumbai	NR	NR	NR	NR	Limon	NR	NR	NR	NR	NR

Pays	Site	Régime	Date	Durée (jours ou heures)	Volume déplacé (m ³)	Sédiments	Contaminants	Suivi			Modèle
								Phy	Chim	Bio	
	Bombay	NR	1994	NR	NR	Limon	NR	NR	NR	NR	
	Kakinda	NR	NR	NR	1 980 000	Vases	NR	NR	NR	NR	
	Mangalore	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
	Hazira	NR	NR	45 j	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
Belgique	Anvers	Porte à flot	2001	NR	Entretien	Vases	NR	NR	NR	NR	
		Bassin fermé	Fev 2011	1 j	NR	NR	Métaux lourds, PCB, TBT...	X	X	0	0
Bangladesh	Rivière Jamuna	NR	NR	2 ans	Entretien	NR	NR	NR	NR	NR	
Yemen	Ash Shihr harbour	NR	NR	45 j	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
Argentine	Canal del Dique	Canal	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
	Estuario de Bahía Blanca	Estuarien	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	

geode

Nous contacter

courriel : ***geode@nantes.port.fr***

téléphone contact : **02 40 44 20 99**

Site internet : **<http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/club-geode-r65.html>**