

Auteurs : A. E. Robert¹; N. Desroy¹; C. Vogel²; L. Simplet³

Date : 08 janvier 2018

¹ Ifremer/ODE/LITTORAL/LERBN

² Ifremer/RBE/HMMN/RHPEB

³ Ifremer/REM/GM/LGS

Synthèse sur l'impact de l'extraction de granulats marin en France métropolitaine

Analyse des suivis environnementaux sur les façades Atlantique, Manche-Est et Manche-Ouest



Extraction à point fixe par un navire à benne preneuse sur le site du Minou en Bretagne (© Ifremer)

Table des matières

1. Introduction.....	6
1.1. Demande en granulats.....	6
1.2. Contexte législatif Français.....	7
1.3. Caractéristiques des sites d’extractions en France Métropolitaine.....	7
1.4. Contexte de la commande	10
1.5. Méthodologie mise en place pour répondre à la commande.....	10
2. Synthèse des impacts constatés sur les sites étudiés.....	13
2.1. Impact lié au panache turbide.....	13
2.2. Impacts sur la topographie du fond marin.....	14
2.3. Impact sur les conditions hydrodynamiques.....	14
2.4. Impact sur la nature du fond marin	15
2.5. Impact sur les peuplements macrobenthiques	15
2.6. Impact sur les peuplements halieutiques.....	16
2.7. Prise en compte de la résilience environnementale	17
2.8. Limites et biais d’échantillonnages constatés dans les suivis environnementaux.....	17
3. Comparaison avec les impacts décrits dans les publications scientifiques	21
3.1. Impact sur l’environnement physique.....	21
3.2. Impact sur l’environnement biologique.....	27
3.3. Résilience environnementale	34
4. Perspectives.....	38
4.1. Vers la prise en compte du fonctionnement de l’écosystème	38
4.2. Vers la prise en compte des impacts cumulés	39
5. Conclusion générale	40
Annexe 1. Synthèse sur l’impact de l’extraction de granulats marins sur le site du Pilier.....	44
1. Caractéristiques du site d’extraction du Pilier	45
2. Résumé des impacts constatés	46
3. Conclusions	50
Annexe 2. Synthèse sur l’impact conjugué des extractions de granulats marins sur les concessions de Chassiron B, C, D et E.....	52
1. Caractéristiques des sites d’extraction de Chassiron	53
2. Impacts sur le volet morpho-sédimentaire	54
3. Impact sur le volet hydrodynamique	55

4. Impact sur les peuplements macrobenthiques.....	56
5. Incidence sur les sites Natura 2000.....	57
6. Conclusion.....	58
Annexe 3. Synthèse sur l'impact de l'extraction de granulats marins sur le site des Duons.....	60
1. Caractéristiques du site d'extraction des Duons.....	61
2. Volet morpho-sédimentaire.....	63
3. Volet hydrodynamique.....	65
4. Evolution de la macrofaune benthique.....	66
5. Impact sur les ressources halieutiques.....	67
6. Incidence sur les sites Natura 2000.....	68
7. Conclusion.....	69
Annexe 4. Synthèse sur l'impact de l'extraction de granulats marins sur le site de la Horaine.....	72
1. Caractéristiques du site d'extraction de la Horaine.....	73
2. Volet morpho-sédimentaire.....	74
3. Volet hydrodynamique.....	77
4. Impact sur les peuplements benthiques.....	78
5. Incidence sur les sites Natura 2000.....	81
6. Conclusion.....	82
Annexe 5. Synthèse sur l'impact de l'extraction de granulats marins sur le site de la Baie de Seine	83
1. Caractéristiques du site d'extraction.....	84
2. Impact de l'extraction de granulats sur l'environnement physique de la baie de Seine.....	86
3. Impact de l'extraction de granulats sur l'environnement biologique de la baie de Seine.....	88
4. Conclusion.....	92
Annexe 6. Synthèse sur l'impact de l'extraction de granulats marins sur le site de Dieppe – « Granulats marins de Dieppe (anciennement Graves de Mer) ».....	94
1. Caractéristiques du site d'extraction.....	94
2. Impact lié à la génération d'un panache turbide.....	96
3. Modification de la topographie du fond marin.....	98
4. Modification de la nature du fond marin.....	100
5. Incidence de l'extraction sur le littoral.....	100
6. Impact sur le compartiment benthique.....	101
7. Impact sur les ressources halieutiques.....	102
8. Conclusion.....	103

Annexe 7. Extraction de granulats marins : cadre réglementaire et évolution au cours des vingt dernières années.....	106
1. Présentation de l'encadrement réglementaire en vigueur concernant l'extraction de granulats marins.....	106
2. Prise en compte de l'environnement et de la séquence Eviter-Réduire-Compenser pour ce qui concerne spécifiquement l'extraction de granulats marins.....	107
3. Bref historique des évolutions réglementaires concernant les granulats marins.....	108
Références bibliographiques.....	112

1. Introduction

1.1. Demande en granulats

La production de granulats représente un secteur industriel majeur. En Europe, ils représentent 67% du volume des produits miniers extraits - devant le pétrole, le gaz et le charbon- soit entre 2 et 3 milliards de tonnes chaque année. Ils sont essentiellement destinés à l’approvisionnement de l’industrie du béton et contribuent à 23% des revenus de l’industrie minière européenne (Menegaki and Kaliampakos, 2010). L’Allemagne, l’Espagne, la France, l’Italie et le Royaume-Uni extraient chacun plus de 200 millions de tonnes de granulats par an (moyenne entre 1997 et 2006). En France, la consommation de granulats est en croissance régulière depuis la fin des années 90, en lien avec la demande croissante en matériaux de construction.

Pour les industriels, les granulats marins représentent une alternative intéressante aux extractions terrestres, de par leur qualité, leur accessibilité et les volumes des gisements. Les principaux pays producteurs de granulats marins sont les Pays-Bas, le Royaume-Uni et le Danemark avec 20,92, 13,57 et 6,86 millions de m³ extraits annuellement (moyenne entre 1989 et 2005). La France se hisse à la quatrième place de ce classement avec une production annuelle estimée aux alentours de 2-2,6 millions de m³ (devant la Belgique : 1,64 millions m³.an⁻¹, l’Espagne : 0,96 millions m³.an⁻¹ et la Pologne : 0,94 millions m³.an⁻¹). Cela constitue moins de 2% de la production nationale et moins de 1% de la demande annuelle (300 millions de tonnes). Environ 400000 tonnes de granulats marins sont donc importées du Royaume-Unis et de la Belgique chaque année pour approvisionner le marché français. Bien que la part des extractions de granulats marins à l’échelle nationale est relativement modeste, elle participe significativement à la production et à la consommation des territoires littoraux (et jusqu’en amont des grands estuaires). De plus, il est probable que les besoins en granulats marins augmentent considérablement dans les prochaines années, en lien avec le développement des zones côtières, d’une réglementation environnementale plus stricte concernant les granulats terrestres et d’une demande grandissante en matériaux de réapprovisionnement des plages (Velegrakis *et al.*, 2010)¹.

¹ Cette assertion, valable pour le contexte général européen, est à nuancer au niveau national car la France met en place une politique d’économie de la ressource minérale (terrestre ou marine) traduite dans les schémas des carrières et reposant notamment sur le recyclage et la recherche d’autres moyens de construction.

1.2. Contexte législatif Français

Depuis l'ordonnance n°2011-91 du 20 janvier 2011 portant codification de la partie législative du code minier, les extractions de granulats marins relèvent des sections 1 et 2 du chapitre 3 du titre III du livre I^{er} du code minier (articles L. 133-1 à L. 133-13 du code minier). Cette activité est subordonnée à l'obtention d'un titre minier et d'une autorisation d'ouverture des travaux. Lorsque le périmètre sollicité se situe à l'intérieur du domaine public maritime (soit jusqu'à 12 milles nautiques de la ligne de basse mer), une autorisation d'occupation temporaire du domaine public maritime, dite "autorisation domaniale", est également requise. L'instruction des différentes demandes d'autorisations relève du décret n° 2006-798 du 6 juillet 2006 relatif à la prospection, à la recherche et à l'exploitation de substances minérales ou fossiles contenues dans les fonds marins du domaine public et du plateau continental métropolitain. En cas d'issue favorable des procédures, l'autorité compétente en matière d'occupation du domaine public maritime, est tenue de délivrer les autorisations d'ouverture des travaux et d'occupation temporaire du domaine public dans les deux mois qui suivent l'octroi du titre minier. Les trois procédures (titre minier, autorisation d'ouverture des travaux, autorisation d'occupation temporaire du domaine maritime) peuvent également être conduites de manière simultanée. Dans ce cas, l'instruction des différentes demandes est coordonnée par le préfet. La durée des procédures administratives est variable d'un projet à un autre. Si les textes prévoient que le silence gardé par le ministre sur la demande de titre d'exploitation vaut rejet au bout de trois ans, les dossiers ayant fait l'objet de décisions récentes révèlent des durées d'instruction qui peuvent atteindre les sept ans.

La cadre juridique de l'extraction de granulats marins en France et son évolution au cours des vingt dernières années a fait l'objet d'une fiche plus détaillée, rappelée en annexe du présent rapport (annexe 7).

1.3. Caractéristiques des sites d'extractions en France Métropolitaine

Aujourd'hui, 19 sites bénéficient d'un titre minier pour l'extraction de granulats marins. Ils sont principalement distribués le long des côtes Bretonne, Atlantique et de Manche orientale (Figure 1). A ce jour, quatre demandes sont en cours d'instruction, deux pour demande de prolongation de l'activité d'extraction et deux pour des demandes de titre minier sur de nouveaux sites d'extractions. Deux permis d'exploration, ont été récemment accordés (2016 et 2017) au large des estuaires de la Gironde et de la Loire.

De manière générale, les sites d'extraction ou visés par une extraction (*i.e* permis d'exploration et demande en cours d'instruction) sont localisés sur des fonds d'une vingtaine de mètres de profondeur par rapport au zéro hydrographique, et à une distance d'une dizaine de kilomètres de la côte. Toutefois, les sites les plus récemment ouverts à l'extraction ou faisant l'objet d'une exploration (Granulats Nord Gascogne, Loire Grand Large, Sud Atlantique, Manche orientale) sont relativement profonds (> 40 m CM²) et éloignés des côtes (>20 km des côtes les plus proches). A l'inverse, certains sites (La Cormorandière, les Duons, Granulats Marins de Dieppe, Platin de Graves) sont très côtiers, avec une profondeur inférieure à 5 m CM et une distance à la côte inférieure ou égale à 4 kilomètres.

La majorité des matériaux extraits sont des sables et/ou des graviers siliceux (13 sites d'extraction). Certains sites exploitent également des sables coquillers (4 sites) ou des galets de silex en association avec des sables coquillers (2 sites). Les sites d'extractions de maërl sont aujourd'hui fermés (Ilot Saint-Michel, Lost Pic, Pourceaux et Les Glénan).

Des mesures visant à Éviter, Réduire et à Compenser (ERC) les impacts sont prévues par les arrêtés préfectoraux régissant les modalités d'exploitation de chaque site d'extraction (Tableau 1). Ainsi, l'ensemble des sites en activité sont concernés par une interdiction du criblage des sédiments à bord. Cela a pour objectif de limiter les changements dans la nature des fonds marins, ainsi que les impacts liés à la formation d'un panache turbide. Certains arrêtés préfectoraux (17 sites sur 19) prévoient également de limiter l'impact sur la topographie du fond marin en imposant une répartition homogène de l'effort de dragage à la surface des sites exploités et/ou en définissant la valeur maximale des pentes des bords de la souille à l'issue des extractions. Des dragages de finition peuvent également être envisagés afin d'atténuer les reliefs. Sur certains sites relativement côtiers, une profondeur maximale des creusements est fixée par les arrêtés préfectoraux dans le but de limiter les modifications des conditions hydrodynamiques (11 sites sur 19).

Certaines mesures ERC ont pour objectif de favoriser la résilience biologique à l'issue des extractions, en limitant les changements dans la nature des fonds (17 sites) et/ou en maintenant une épaisseur minimale de sédiment au-dessus du substratum rocheux (en général une couche de 1 à 2 m d'épaisseur ; 12 sites). La résilience biologique peut également être facilitée par la préconisation d'une extraction par bandes et/ou par la pratique de la jachère (6

² Par rapport au zéro hydrographique

sites) ainsi qu'en prescrivant la réalisation des extractions dans le sens des courants dominants (5 sites).

Enfin, des périodes d'arrêt des extractions peuvent être envisagées afin de limiter les conflits d'usage avec les professionnels de la pêche, et limiter les effets sur la ressource halieutique (e.g. période de pêche à la seiche, période de reproduction du hareng).

Tableau 1 : Mesures ERC (éviter, réduire, compenser) incluses dans les arrêtés préfectoraux régissant les modalités d'exploitation des sites actuellement en activité (19 au total).

Mesures	Objectif	Nombre de sites (sur 19)
Interdiction du traitement des matériaux à bord	Eviter un changement de nature des fonds et limitation du panache turbide	19
Réalisation d'une extraction homogène, atténuation des pentes bordières de la souille, dragage de finition	Limiter les effets sur la morphologie des fonds notamment pour maintenir les pratiques de pêches	17
Garantir que la couche sédimentaire restituée en fin d'extraction sera similaire à celle qui prévalait	Favoriser la recolonisation par la faune benthique	17
Maintien d'une épaisseur sédimentaire minimum	Eviter la mise à nu du substratum rocheux (modification des habitats et gêne à la pratique de la pêche),	12
Limitation de la profondeur d'extraction	Limiter les effets sur la morphologie des fonds et donc sur l'hydrodynamique, éviter de mettre à jour le substratum ou une couche sédimentaire de nature différente	11
Période(s) d'arrêt des extractions	Respecter les cycles de vie des ressources halieutiques (période de frai,...) et éviter une gêne lors de périodes de pêche (coquille Saint-Jacques par ex.)	9
Zonage de l'extraction (par bandes, jachère)	Favoriser la recolonisation par la faune benthique	6
Extraction réalisée dans la direction des courants dominants	Limiter les effets du panache turbide, favoriser le comblement des sillons par la dynamique sédimentaire naturelle	5

1.4. Contexte de la commande

L'instruction des sites d'extraction de granulats marins prévoit la réalisation de suivis environnementaux. Ceux-ci ont pour but de suivre l'évolution des sites d'extraction et des zones adjacentes, pendant et à l'issue des extractions. *In fine*, ils sont censés fournir les connaissances nécessaires (i) à la mise en place de mesures de réduction des impacts et, (ii) à la restauration écologique des sites.

L'article 99 de la loi n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité de la nature et des paysages impose au gouvernement de remettre un rapport d'expertise au parlement sur l'impact de l'extraction de granulats marins, d'un point de vue environnemental et économique. La partie dédiée à l'expertise environnementale, basée sur l'analyse des rapports quinquennaux de suivi des sites d'extraction, a été déléguée à l'Ifremer. Elle fait partie des actions à mener en 2017, contractualisées *via* la convention « Relative aux conditions de réalisation par l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, d'un programme d'actions d'appui scientifique et technique au MTES », entre le ministère de la Transition Écologique et Solidaire et notre institut (référence Ifremer 17/1212982).

1.5. Méthodologie mise en place pour répondre à la commande

Afin de répondre à la commande du ministère de la Transition Énergétique et Solidaire, un sous-ensemble de six sites d'extraction a été choisi, à raison de deux sites par zone géographique (Atlantique, Bretagne et Manche orientale). Ces sites sont considérés comme représentatifs d'une part des différentes modalités d'extraction et d'autre part des différentes caractéristiques environnementales rencontrées sur ces trois zones géographiques.

Pour la façade Atlantique, les sites du Pilier et de Chassiron ont été sélectionnés (voir Figure 1). Le site du Pilier a la particularité d'avoir été longtemps celui sur lequel la pression extractrice était la plus importante (2267000 m³ autorisé annuellement à l'extraction sur une surface de 8,2 km²). Il est exploité depuis 1988 et bénéficie donc d'une longue série d'étude et de suivi des paramètres environnementaux. Les sites Chassiron B, C, D et E sont quatre concessions adjacentes qui offrent l'opportunité d'étudier les impacts cumulés des extractions sur l'environnement marin.

Sur les côtes Bretonnes, l'attention s'est portée sur les sites des Duons et de la Horaine. Les Duons représentent un site d'extraction historique en France avec des prélèvements ayant

débuté durant les années 60. De plus, il fait l'objet de travaux scientifiques en cours, visant à tester des indicateurs de perturbation physique sur l'environnement benthique (projet IMPECAPE). Le site de la Horaine abrite un habitat à lançons, proie préférentielle de poissons à haute valeur commerciale tels que le bar, le lieu et le turbot. L'impact de l'extraction de granulats marins sur la dynamique des populations de lançons reste relativement méconnu.

Pour la Manche orientale, les sites Granulats Marins de Dieppe et Baie de Seine ont été sélectionnés en raison de la collaboration étroite entre les différents acteurs (extracteurs, comité des pêches, scientifiques, ...), engagée *via* le GIS SIEGMA (Groupement d'Intérêt Scientifique de Suivi des Impacts de l'Extraction de Granulats Marins). Cette collaboration avait abouti à la mise en place d'extractions expérimentales, préalablement à l'extraction industrielle. De plus, les résultats des travaux scientifiques ont conduit à l'élaboration de protocoles d'extraction innovants, visant à réduire l'impact environnemental et à favoriser une résilience rapide du milieu. Le site Granulats Marins de Dieppe, exploité depuis la fin des années 70, a permis de tester plusieurs hypothèses relatives à l'impact environnemental de l'extraction de granulats marins : importance de l'intensité de dragage, importance de l'impact lié à la surverse, importance des impacts cumulés avec le site mitoyen « Gris-Nez ». Enfin, la présence d'une zone fermée au dragage pendant 15 ans a permis d'étudier la résilience environnementale.

L'ensemble des dossiers de suivis environnementaux (annuels et/ou quinquennaux) portés à la connaissance de l'Ifremer, notamment lors de sa consultation par les services de l'État en charge de l'instruction de titre miniers (*i.e.* DREAL), ont été réexaminés dans le cadre de la commande du ministère de la Transition Énergétique et Solidaire. Cela représente environ 25 dossiers, de plus de 500 pages chacun. L'expertise de ces documents par l'Ifremer, afin d'identifier et d'analyser les impacts des extractions, a fait l'objet de fiches synthétiques rédigées pour chacun des six sites. Ces fiches qui ont déjà été portées à la connaissance des inspecteurs du CGEIET et du CGEDD sont reportées en annexes du présent rapport (annexes 1 à 6). Les prochains paragraphes rappellent les principaux résultats de ces analyses et dressent une synthèse des impacts constatés de l'extraction de granulats marins (Tableau 3).

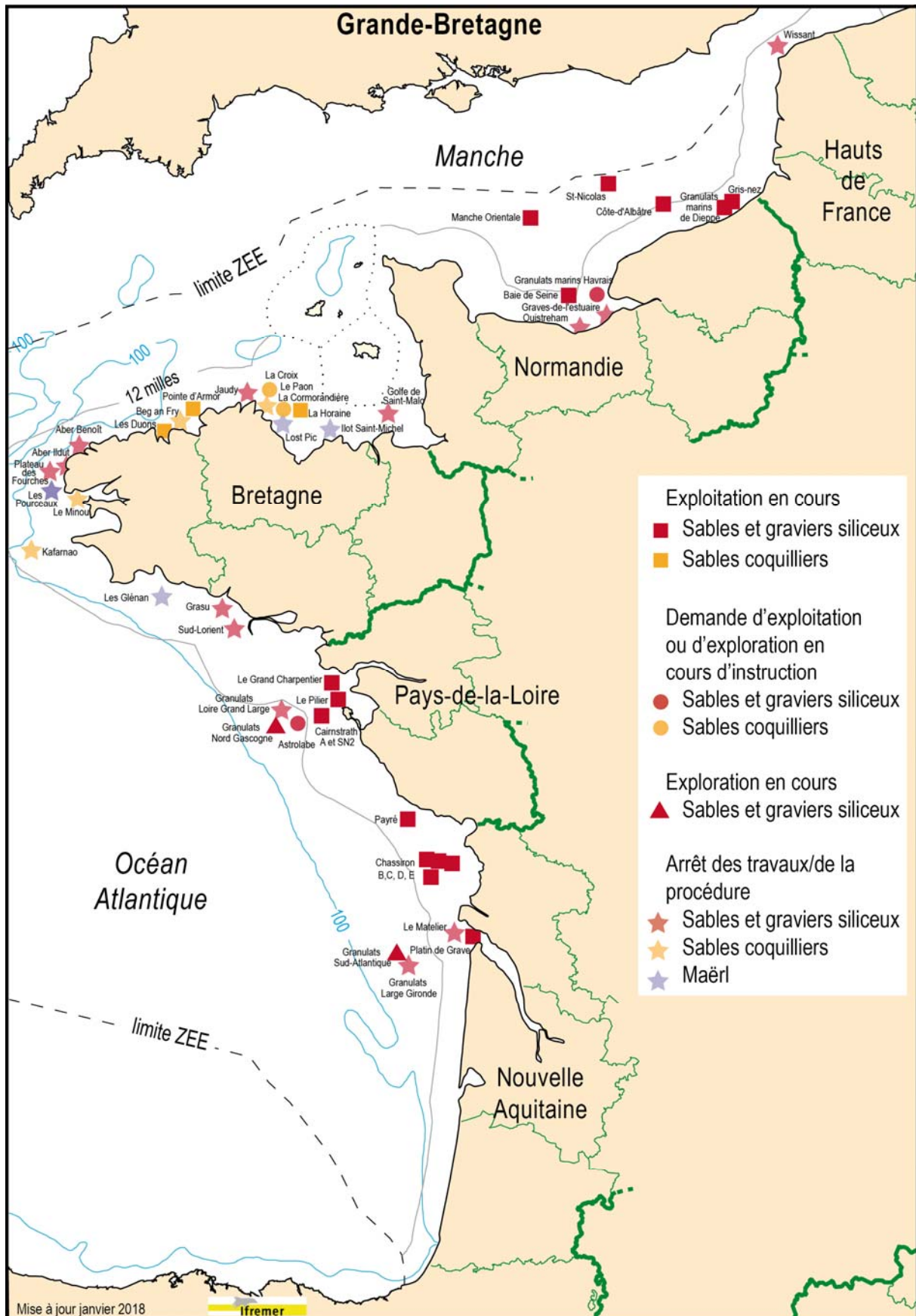


Figure 1 : Distribution des sites d'extraction le long de façades Atlantique, Bretonne et Manche orientale

2. Synthèse des impacts constatés sur les sites étudiés

2.1. Impact lié au panache turbide

A l'exception du site de la Horaine, où la turbidité est restée négligeable (inférieure à la turbidité naturelle), la remise en suspension des particules sédimentaires lors des opérations de dragage augmentait la turbidité de la colonne d'eau de manière significative. En effet, pour les sites du Pilier, des Duons et de Dieppe, l'augmentation de la concentration de matière en suspension était 4 à 9 fois supérieure à la turbidité naturelle. L'impact le plus conséquent a été observé sur le site de Baie de Seine avec une turbidité jusqu'à 15 fois supérieure aux conditions naturelles.

L'épaisseur des dépôts associés au panache turbide était négligeable à la Horaine (10^{-3} mm.an⁻¹) mais atteignait entre 0,24 et 1,31 mm.an⁻¹ sur le site Baie de Seine et entre 0,06 et 0,29 mm.an⁻¹ sur le site Granulats Marins de Dieppe.

La durée et la distance de dispersion du panache étaient relativement limitées au Pilier. En effet, le panache s'estompait au bout de 30 minutes et sa distance de dispersion (non-mesurée) semblait inférieure à 1 km au regard de la distribution des sédiments superficiels. Sur les sites des Duons et de la Horaine, la durée de vie du panache (>1h30 et >2h30) n'a pu être établie avec précision car la durée de l'expérimentation étant insuffisante. La distance de dispersion n'a pas été mesurée sur ces deux sites. En Baie de Seine, la durée de vie d'une section de panache turbide était de 2 heures et l'extension spatiale du panache atteignait 6 km par rapport à la position de la drague. A Dieppe, cet impact était plus modeste avec une durée de vie d'environ 1 heure pour une distance de dispersion équivalente à 3,5 km.

L'impact lié au panache turbide n'a pas été mesuré sur le site de Chassiron. Sur la concession Chassiron E, une approche par modélisation, simulant la dynamique d'une particule d'eau lâchée à l'endroit de la concession, a été tentée. Si, à défaut d'avoir effectivement mesuré la dispersion du panache turbide, une telle tentative est louable, il aurait été plus judicieux de simuler le devenir d'une particule siliceuse. Pour deux sites d'extraction (Duons, la Horaine), des biais mineurs ont également été soulevés. Aux Duons, le turbidimètre utilisé n'avait probablement pas été étalonné ce qui a conduit à des valeurs aberrantes mais cela a été compensé par des mesures de la concentration de matière en suspension. A la Horaine, la turbidité ambiante a été mal définie et il aurait été préférable de réaliser les mesures à partir d'un point fixe plutôt que par des suivis lagrangiens.

2.2. Impacts sur la topographie du fond marin

Les levés bathymétriques (réalisés au sondeur mono- ou multifaisceaux) et les mosaïques d'imagerie acoustique (réalisées grâce aux données acquises avec des sonars à balayage latéral) ont permis d'étudier l'impact de l'extraction de granulats sur la morphologie du fond marin. Ils ont ainsi révélé la présence de sillons laissés par les dragues, sur les sites du Pilier, de Chassiron, de Baie de Seine et de Dieppe. Leur profondeur était équivalente à 20 cm à Chassiron et à 1 m à Dieppe. Elle variait de 8 à 44 cm en Baie de Seine. La largeur des sillons était d'environ 5 m à Baie de Seine et à Dieppe mais n'a pas été mesurée sur le Pilier et à Chassiron.

Des souilles d'extractions ont également été observées sur l'ensemble des sites étudiés. Leur largeur était d'environ 2 km au Pilier et à Chassiron (mesurés sur les levés bathymétriques mais non-indiqués dans les dossiers de suivis environnementaux), et de 250 m à la Horaine. Sur le site des Duons, la souille d'extraction totalisait une surface de 6 hectares. En Manche, les souilles consistaient en un abaissement généralisé du fond marin à l'échelle du périmètre d'extraction, soit sur 1,6 km² pour les extractions expérimentales de Baie de Seine et sur 5,9 km² à Granulats Marins de Dieppe. La profondeur des souilles variait généralement entre 2 et 5 m par rapport à la profondeur moyenne du fond marin. La souille la plus profonde a été observée sur le site du Pilier avec un abaissement du fond marin d'environ 7 mètres.

L'impact à long terme de l'extraction sur la topographie du fond marin n'a pas pu être déterminé sur les sites d'extraction de Chassiron et des Duons, en raison d'une précision variable dans les levés bathymétriques ou de l'absence de véritable comparaison avec les données des suivis précédents.

2.3. Impact sur les conditions hydrodynamiques

Le creusement du fond marin entraînait généralement une réduction de l'agitation et de la vitesse des courants au niveau des souilles d'extractions et leur augmentation le long des bordures de la souille. Cependant, les modifications de l'hydrodynamisme étaient relativement modestes et souvent inférieures à 10% des conditions naturelles. Les modifications supérieures à ce seuil ont été observées aux Duons et à la Horaine dans le cas de simulations d'évènements climatiques extrêmes mais de fréquence annuelle. Les changements dans les conditions hydrodynamiques étaient principalement restreints aux

périmètres d'extractions et à leurs abords immédiats. Les conséquences sur la dynamique littorale ont été évaluées comme négligeables pour l'ensemble des sites d'extractions.

2.4. Impact sur la nature du fond marin

Les analyses granulométriques et/ou des données d'imageries acoustiques ont permis d'étudier les effets de l'extraction de granulats sur la nature du fond marin. Ces impacts étaient variables entre les sites étudiés. Aucun changement dans la nature du fond marin n'a été mis en évidence à partir des suivis environnementaux menés sur le site des Duons. Cependant, ceux-ci n'étaient pas suffisamment détaillés pour pouvoir conclure à une absence d'impact. Un affinement granulométrique a été observé dans quelques secteurs des sites d'extraction du Pilier et de Dieppe. Sur les sites de Chassiron, de la Horaine et de Baie de Seine, le patron inverse semblait se dessiner avec une augmentation de la taille des grains sédimentaires *via* la mise à l'affleurement locale des couches sous-jacentes. En particulier, en Baie de Seine, le dégagement de blocs rocheux posait la question de l'accessibilité de la zone pour la pêche professionnelle (risques d'avaries lors des chalutages).

2.5. Impact sur les peuplements macrobenthiques

L'impact sur les peuplements benthiques était majeur et relativement comparable entre les sites étudiés. Sur le site du Pilier, une réduction de 25% de la richesse spécifique et de 37% de l'abondance des invertébrés benthiques a été observée. Cependant, les effets ont potentiellement été sous-estimés en raison de stratégies d'échantillonnage inappropriées (stations situées en dehors des zones draguées). Sur ce site, la composition spécifique, c'est-à-dire l'identité des espèces, avait également été modifiée par l'activité d'extraction. Le bivalve *Spisula solida* a ainsi été remplacé par le bivalve *Abra alba*, ce qui traduit un affinement granulométrique sur ce site (*S. solida* est inféodée aux sables moyens à grossiers tandis que *A. alba* affectionne les milieux envasés). En Baie de Seine, la réduction des caractéristiques biologiques était variable selon les secteurs étudiés. Sur le site dragué pendant un an puis laissé au repos pendant deux ans, des réductions de la richesse spécifique, de l'abondance et de la biomasse, équivalentes à -22%, -66% et -74%, ont été observées. Dans le secteur exploité en continu pendant trois ans, l'impact était relativement plus élevé avec une réduction de la richesse spécifique, de l'abondance et de la biomasse équivalente à -77%, -71% et -81%.

Les impacts étaient d'un ordre de grandeur relativement similaire à Dieppe. Sur un secteur peu dragué, la réduction de la richesse spécifique et de l'abondance étaient de -40%. La biomasse était réduite de moitié par rapport aux stations de référence. Sur le secteur de dragage intensif, ces diminutions s'élevaient à -77% (richesse spécifique), -92% (abondance) et -96% (biomasse). Dans les secteurs faiblement et intensément dragués, la composition faunistique présentait une alternance d'espèces pionnières, inféodées aux galets et aux sables. Dans les secteurs non-dragués mais exposés à la surverse provenant du site mitoyen Gris-Nez, des réductions de la richesse spécifique (-30%), de l'abondance (-50%) et de la biomasse (-20%) ont été observées. Ces valeurs étaient équivalentes à celles observées dans les secteurs peu dragués et intensément dragués ce qui indique que la surverse entraîne un impact comparable au dragage *sensu stricto*. Le peuplement macrobenthique était alors caractérisé par des espèces pionnières inféodées aux sables fins.

2.6. Impact sur les peuplements halieutiques

L'impact sur les peuplements halieutiques était très variable entre les sites étudiés. Sur le site du Pilier, l'extraction de granulats marins semblait avoir un effet positif sur la richesse spécifique (+45%), sur l'abondance (+120%) et sur la biomasse (+80%) des populations observées. Les espèces favorisées étaient essentiellement benthodémersales. A l'inverse, les espèces pélagiques étaient généralement défavorisées. Une augmentation de la richesse spécifique a également été mise en évidence sur le site de Dieppe, que ce soit dans le secteur de dragage intensif (+40%) ou dans le secteur exposé à la surverse de Gris-Nez mais non-exploité (+20%). En revanche, l'extraction de granulats marins entraînait une réduction de l'abondance (-35 à -47%) dans ces secteurs. L'activité d'extraction entraînait également des changements dans l'identité des espèces dominant le peuplement halieutique. Le secteur soumis au dragage intensif était dominé par la dorade grise tandis que le secteur exposé à la surverse présentait des abondances élevées de plie. Les secteurs non-dragués étaient quant à eux dominés par le lançon. Pour le site de Baie de Seine, l'ensemble des indicateurs écologiques montrait une réduction par rapport aux stations de référence. Sur le secteur dragué pendant un an, la richesse spécifique et l'abondance ont diminué de 33% et de 80% respectivement par rapport aux zones non-draguées. Dans le secteur exploité en continu pendant trois ans la richesse spécifique diminuait de 50% et l'abondance de 92% par rapport à celle observée au sein des secteurs non-dragués. Les espèces défavorisées par les extractions étaient le grondin, la sole perdrix, le tacaud commun, le rouget barbet et le merlan. A

contrario, la sole et la plie exhibaient une fréquentation accrue dans les secteurs exploités. L'analyse des contenus stomacaux de ces espèces a révélé que l'extraction modifiait leur régime alimentaire, l'identité de leurs proies changeant avec la nature du fond marin.

2.7. Prise en compte de la résilience environnementale

La résilience morpho-sédimentaire et la résilience biologique n'ont été considérées que dans le cadre des travaux du GIS SIEGMA. Pour les 4 sites non traités, ce volet n'avait pu être abordé en raison d'une extraction toujours en cours.

Sur le site Granulats Marins de Dieppe, les scientifiques du GIS SIEGMA ont mis en évidence que le comblement des sillons était relativement rapide (environ 1 an). Toutefois l'extraction de granulats marins sur ce site aura un impact direct et permanent sur la topographie et la nature du fond marin en ponctionnant les cordons de galets fossiles qui ne peuvent être rechargés par le transit sédimentaire naturel (apport sableux). Ceci se reflétait dans la résilience biologique. En effet, la macrofaune benthique comme les peuplements halieutiques n'ont pas montré de retour à un état proche de celui de référence, 15 ans après l'arrêt des extractions.

En Baie de Seine, le temps de l'expérimentation n'était pas suffisant pour déterminer avec précision le temps de résilience de la macrofaune benthique. Celle-ci semble supérieure à 2 ans car les peuplements présentaient toujours des différences par rapport à l'état de référence à l'issue de cette période. Les peuplements halieutiques semblaient avoir retrouvé leurs caractéristiques pré-dragages, au bout de 1,5-2,5 ans.

2.8. Limites et biais d'échantillonnages constatés dans les suivis environnementaux

Lors de l'analyse des dossiers de suivis environnementaux, de nombreux biais et manquements dans les protocoles d'échantillonnage ont été mis en évidence. De plus, les interprétations des résultats étaient parfois erronées, ce qui pouvait conduire à une sous-estimation de l'impact de l'extraction. Si cela n'entrave pas l'apport de connaissances générales sur l'impact de l'extraction de granulats marins à l'échelle nationale, ces constats posent de sérieuses questions quant à la capacité à discerner les impacts propres à chaque site d'extraction.

L'identification de l'impact sur l'environnement physique a généralement été conduite de manière rigoureuse. Les suivis de l'environnement physique étaient donc globalement peu perclus de biais d'échantillonnage. En revanche, l'impact de l'extraction sur les peuplements macrobenthiques n'a pas pu être déterminé sur les sites de Chassiron, des Duons, et de La Horaine (Tableau 2). Cela était essentiellement imputable à une stratégie d'échantillonnage peu pertinente, avec l'absence de stations situées dans des zones véritablement soumises aux dragages. Des biais dans l'acquisition des données (qualité du tri variable d'une année à l'autre, identifications taxonomiques douteuses) et l'utilisation d'indicateurs écologiques non-adaptés, tels que l'indice M-AMBI ou les classifications EUNIS (trop grossières pour distinguer les changements dans la composition faunistique), ne permettaient également pas de conclure sur l'impact de l'extraction de granulats. Pour ces mêmes trois sites, le changement des protocoles d'échantillonnage entre les suivis environnementaux ne permet pas d'évaluer l'évolution des sites d'extraction sur le long terme. Ces limites ont également été soulevées à propos des suivis halieutiques. Pour les sites de Chassiron et des Duons, l'impact sur les peuplements halieutiques n'a pas été étudié. A la Horaine, les abondances des lançons ont été utilisées comme proxy de la densité de leurs prédateurs - espèces à haute valeur commerciale comme le bar, le lieu et le turbot. Cependant, il est utopique de penser que la présence des prédateurs est uniquement conditionnée par celle de leur proie et totalement indépendante de leur dynamique naturelle propre. De plus, la position des trains de chaluts destinées à évaluer l'impact sur le lançon manquait de rigueur car les trains recouvraient à la fois des zones exploitées et des zones non-draguées. Sur le site d'extraction du Pilier, l'évolution à long terme de la ressource halieutique n'a pas pu être identifiée du fait de la modification des mailles de la poche interne des chaluts et de saisons d'échantillonnage différentes entre les suivis.

La résilience environnementale n'a pas fait l'objet d'une investigation pour quatre des six sites sélectionnés ; ce volet n'ayant pas pu être traité, pour 4 sites, en raison d'une extraction toujours en cours. Seules les études conduites par le GIS SIEGMA sur les sites Baie de Seine et Granulats Marins de Dieppe ont abordé cette question. Toutefois, la durée des suivis n'est pas encore suffisante pour déterminer les temps de résilience physique et biologique avec précision.

Tableau 2 : Résumé des biais dans les protocoles mis en place lors des suivis environnementaux. Le nombre de sites concerné par chaque colonne est indiqué.

Volets environnementaux	Nombre de sites (sur les 6 sites étudiés)				
	Pas de biais	Impact non-étudié	Difficulté à déterminer l'effet à long terme	Biais majeurs : impossible de déterminer l'effet	Biais mineurs : manque de précision
Impact lié au panache turbide	3	1	-	0	2
Impact sur la topographie	3	0	2	0	1
Impact sur l'hydrodynamisme	5	0	0	0	1
Impact sur la nature des fonds	5	0	0	0	1
Impact sur les peuplements macrobenthiques	2	0	3	3	0
Impact sur les peuplements halieutiques	2	2	1	1	1
Résilience environnementale	0	4	0	0	2

Tableau 3 : Résumé des impacts constatés sur les sites d'extraction choisis (Surf. = surface actuelle du périmètre d'extraction ; Sub : type de matériaux extraits ; Prof. : profondeur moyenne des sites d'extractions ; Hydro. : vitesse moyenne des courants ; AOTM : date d'autorisation d'ouverture des travaux miniers ; MES : augmentation relative de la concentration de matière en suspension par rapport au milieu naturel ; Transport séd. Pot. = transport sédimentaire potentielle ; S : richesse spécifique ; A : abondance ; B : biomasse ; Comp. : composition faunistique ; *** : impact probablement sous-estimé par un biais dans les échantillonnages)

Façade	Atlantique		Bretagne		Manche orientale	
Site	Pilier	Chassiron (B, C, D et E)	Duons	La Horaine	Baie de Seine	Graves de Mer
Caractéristiques environnementales	<ul style="list-style-type: none"> Surf. : 8,2km² Sub. : sables et graviers siliceux Prof. : 14-19mCM Hydro. : 0.5-0.6m.s⁻¹ 	<ul style="list-style-type: none"> Surf. : 7,68km² Sub. : sables fins à moyen Prof. : 16-20mCM Hydro. : 0.3m.s⁻¹ 	<ul style="list-style-type: none"> Surf. : 0,18km² Sub. : sables fins à moyens Prof. : 11-29mCM Hydro. : 0.4m.s⁻¹ 	<ul style="list-style-type: none"> Surf. : 1.17km² Sub. : sables grossiers coquillers Prof. : 7-20mCM Hydro. : 0.5m.s⁻¹ 	<ul style="list-style-type: none"> Surf. : 8,6km² Sub. : sables grossiers coquillers Prof. : 19-22.5mCM Hydro. : 0.9m.s⁻¹ 	<ul style="list-style-type: none"> Surf. : 5.9km² Sub. : galets, sables et graviers coquillers Prof. : 10-20mCM Hydro. : 1.10m.s⁻¹
Caractéristiques de l'extraction	<ul style="list-style-type: none"> AOTM : 1988 Type : élinde trainante Quotas : 2,26 Mm³.an⁻¹ Intensité : 2.28-5.36 h.ha⁻¹.an⁻¹ 	<ul style="list-style-type: none"> AOTM : variable Type : élinde trainante Quotas : 1,47 Mm³.an⁻¹ Intensité : NC 	<ul style="list-style-type: none"> AOTM : 1965 Type : élinde trainante Quotas : 0,05 Mm³.an⁻¹ Intensité : NC 	<ul style="list-style-type: none"> AOTM : 1994 Type : point fixe Quotas : 0,125Mm³ Intensité : NC 	<ul style="list-style-type: none"> AOTM : 1994 Type : élinde trainante Quotas : 2,6Mm³ Intensité : <5 h.ha⁻¹.an⁻¹ 	<ul style="list-style-type: none"> AOTM : 1979 Type : élinde trainante Quotas : 0.50Mm³ Intensité : <1 h.ha⁻¹.an⁻¹
Caractéristiques du panache turbide (mesuré)	<ul style="list-style-type: none"> MES : x4 Dépôts : NC Durée : 30 min. Distance : < 1km 	<ul style="list-style-type: none"> MES : NC Dépôts : NC Durée : NC Distance : NC 	<ul style="list-style-type: none"> MES : x4-9 Dépôts : NC Durée : > 1h30 Distance : NC 	<ul style="list-style-type: none"> MES : négligeable Dépôts : 10⁻³mm.an⁻¹ Durée : >2h30 Distance : NC 	<ul style="list-style-type: none"> MES : x15 Dépôts : 0.24-1.31mm.an⁻¹ Durée : 2h Distance : 6km 	<ul style="list-style-type: none"> MES : 5-6 Dépôts : 0.06-0.29mm.an⁻¹ Durée : 1h Distance : 3.5km
Impact sur la topographie	<ul style="list-style-type: none"> Sillons : oui <ul style="list-style-type: none"> o Largeur/ Prof. : NC Souille : oui <ul style="list-style-type: none"> o Surface: ≈2km² o Prof.: 7m 	<ul style="list-style-type: none"> Sillons : oui <ul style="list-style-type: none"> o Largeur : NC o Prof.: 20cm Souille : oui (concessions C et B) <ul style="list-style-type: none"> o Surface: ≈0,5-0,7km² o Prof.: 5m 	<ul style="list-style-type: none"> Sillons : non Souille : oui <ul style="list-style-type: none"> o Surface: 0,06km² o Prof.: > 5m 	<ul style="list-style-type: none"> Sillons : NC Souille : oui <ul style="list-style-type: none"> o Surface: 0,05km² o Prof.: 1-5.5m 	<ul style="list-style-type: none"> Sillons : oui <ul style="list-style-type: none"> o Largeur : 5m o Prof.: 0.08-0.44m Souille : oui <ul style="list-style-type: none"> o Surface: ≈1.2km² o Prof.: ≈2m 	<ul style="list-style-type: none"> Sillons : oui <ul style="list-style-type: none"> o Largeur : 5m o Prof.: 1m Souille : oui <ul style="list-style-type: none"> o Surface: 5.5km² o Prof.: 2m
Modifications relatives de l'hydrodynamisme (modélisation, impact maximal)	<ul style="list-style-type: none"> Courant : NC Agitation : 10% Transport séd. Pot. : <1% Impact à la cote : négligeable 	<ul style="list-style-type: none"> Chassiron E : Courant : 15-20% Agitation : <10% Transport séd. Pot. : négligeable Impact à la cote : négligeable 	<ul style="list-style-type: none"> Courant : 10-20% Agitation : <10% Transport séd. Pot. : 40-100 t.m⁻¹.an⁻¹ Impact à la cote : négligeable 	<ul style="list-style-type: none"> Courant : 10-20% Agitation : <4% Transport séd. Pot. : négligeable Impact à la cote : négligeable 	<ul style="list-style-type: none"> Courant : <10% Agitation : 10% Transport séd. Pot. : NC Impact à la cote : négligeable 	<ul style="list-style-type: none"> Courant : 0.2% Agitation : <1.6% Transport séd. Pot. : NC Impact à la cote : négligeable
Impact sur la nature des fonds	<ul style="list-style-type: none"> Affinement granulométrique 	<ul style="list-style-type: none"> Affleurement des couches sous-jacentes dans certains secteurs 	<ul style="list-style-type: none"> Pas de changements 	<ul style="list-style-type: none"> Affleurement des couches sous-jacentes dans certains secteurs 	<ul style="list-style-type: none"> Affleurement des couches sous-jacentes dans certains secteurs 	<ul style="list-style-type: none"> Affinement dans certains secteurs
Impact sur les peuplements macrobenthiques	<ul style="list-style-type: none"> S : -25%*** A : -37%*** B : NC Comp.: <i>Spisula solida</i> → <i>Abra alba</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Ind. 	<ul style="list-style-type: none"> Ind. 	<ul style="list-style-type: none"> Ind. 	<ul style="list-style-type: none"> S : -22 à -42% A : -66 à -71% B : -74 à -81% Comp. : NC 	<ul style="list-style-type: none"> Secteur de dragage : S : -40 à -77% A : -40 à -92% B : -50 à -96% Comp : espèces pionnières inféodées aux sables et/ou aux galets Secteur de surverse (non-dragué) : S : -30% A : -50% B : -20% Comp. : espèces pionnières inféodées aux sables fins
Impact sur les peuplements halieutiques	<ul style="list-style-type: none"> S : +45% A : +120% B : +80% Comp. : 7 espèces benthodemersales. ↳ Espèces pélagiques Régime alimentaire : NC 	<ul style="list-style-type: none"> Ind. 	<ul style="list-style-type: none"> Ind. 	<ul style="list-style-type: none"> Ind. 	<ul style="list-style-type: none"> S : -33 à -50 % A : -80 à -92% B : NC Comp. : 7 grondins, sole perdrix, tacaud commun, rouget barbet, merlan. 7 sole, plie Modification du régime alimentaire sur le site exploité en continu pendant 3 ans 	<ul style="list-style-type: none"> Secteur de dragage : S : +40% A : -35% B : non-modifiée Composition : dominance de la dorade grise Secteur de surverse (non-dragué) : S : +20% A : -47% B : -29% Composition : dominance de la plie (secteur de référence dominé par le lançon)
Temps de résilience	<ul style="list-style-type: none"> NC 	<ul style="list-style-type: none"> NC 	<ul style="list-style-type: none"> NC 	<ul style="list-style-type: none"> NC 	<ul style="list-style-type: none"> Physique : NC Macrobenthos : >2 ans Poissons : 1.5-2,5 ans 	<ul style="list-style-type: none"> Physique : comblement rapide des sillons entre 2 hivers Macrobenthos : > 15 ans Poissons : > 15 ans

3. Comparaison avec les impacts décrits dans les publications scientifiques

Dans cette discussion, les impacts induits par l'extraction de granulats marins et synthétisés dans le chapitre précédent sont rappelés et comparés avec les conclusions de travaux scientifiques internationaux.

3.1. Impact sur l'environnement physique

3.1.1. Impact lié au panache turbide

L'impact du panache turbide est très variable entre les sites étudiés³. En effet, selon Hitchcock and Drucker (1996), l'intensité de cet impact dépend (i) de la teneur en particules fines dans les sédiments (<63 μm), (ii) de l'hydrodynamisme local ainsi que (iii) de la quantité de sédiment rejeté par les dragues. Ainsi, l'impact était négligeable sur le site de la Horaine (augmentation de la turbidité et épaisseur des dépôts très limités), probablement en raison de la quasi-absence de particules fines dans le sédiment (<0,01%). En revanche, l'impact était plus conséquent sur les sites des Duons et du Pilier, où la teneur en particules fines est légèrement plus élevée (de 0,1% et 1,5%, respectivement). En effet, sur ces sites, la turbidité générée lors des opérations de dragage pouvait atteindre 4 à 9 fois la turbidité naturelle. Néanmoins, et comme suggéré par de nombreux auteurs (Hitchcock and Drucker, 1996 ; Hitchcock and Bell, 2004 ; Newell *et al.*, 1999, 1998), ces impacts étaient temporaires et essentiellement restreints au niveau du périmètre d'extraction. Sur le site du Pilier, la durée de vie du panache était d'environ 30 minutes et sa distance de dispersion, probablement inférieure à 1 km au regard de la distribution des sédiments superficiels. Sur le site de « North Nab 122/3 », au sud de l'Angleterre, Hitchcock and Bell (2004) ont également observé une distance de dispersion inférieure à 1 km (500-800 m en aval de la drague). Sur ce site comme sur le site du Pilier, la faible dispersion du panache turbide pourrait être due à un hydrodynamisme relativement modéré (courant de flot et de jusant équivalents à 1,0 et 0,8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ à « North Nab 122/3 » et courant de marée moyenne de l'ordre de 0,5-0,6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et de 0,8-0,9 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en période de vive-eau exceptionnelle sur le site du Pilier), favorisant la décantation des particules en suspension, plutôt que leur dispersion.

³ Pour rappel, il n'a pas été possible de déterminer l'impact du panache turbide sur le site de Chassiron à partir des dossiers environnementaux pour lesquels l'Ifremer a été consulté.

L'impact du panache turbide était maximal sur les sites Granulats Marins de Dieppe et Baie de Seine. En effet, sur le site Granulats Marins de Dieppe, la turbidité générée lors des opérations de dragage était 5 à 6 fois supérieure à la turbidité naturelle et engendrait des dépôts de 0,06 à 0,29 mm.an⁻¹. Elle atteignait jusqu'à 15 fois la turbidité naturelle sur le site Baie de Seine, avec des dépôts plus épais (entre 0,24 et 1,31 mm.an⁻¹). Entre ces deux sites, les différences pourraient être dues à un environnement naturellement moins turbide sur le site Baie de Seine (1 à 3 mg.l⁻¹) qu'au large de Dieppe (10 mg.l⁻¹). Pour une même concentration de matière remise en suspension, l'augmentation relative de la turbidité apparaissait donc plus élevée en Baie de Seine. Cependant, ces différences pourraient également être liées à l'application de protocoles d'extractions différents (intensité des extractions, débit d'aspiration et type de surverse) et à une concentration en matière en suspension au sein de la surverse plus élevée en Baie de Seine (Duclos, 2012).

La durée de vie d'une section de panache turbide était d'environ 2 heures en Baie de Seine contre 1 heure à Dieppe (mais pouvait être visible pendant 3 à 4 heures en incluant le temps de chargement). Toutefois, la distance de dispersion du panache turbide était plus élevée en Baie de Seine (extension spatiale de 6 km) par rapport à Dieppe (extension spatiale de 3,5 kilomètres). Selon Duclos (2012), ces différences seraient imputables à (i) la teneur en fine plus élevée en Baie de Seine (1,5% contre 1% à Dieppe), (ii) la plus forte concentration de matière remise en suspension en Baie de Seine (jusqu'à 15 fois la turbidité naturelle contre 4 à 9 fois à Dieppe), (iii) ainsi qu'à la hauteur d'eau plus importante en Baie de Seine (19-22,5 m contre 10-20 m à Dieppe). Les résultats obtenus sur ces deux sites montrent que l'impact du panache turbide est, dans un contexte d'hydrodynamisme fort (vitesse moyenne des courants équivalente à 0,9 m.s⁻¹ en Baie de Seine et à 1,10 m.s⁻¹ à Dieppe), susceptible de dépasser largement le périmètre d'extraction *sensu stricto*. **La distance maximale de dispersion du panache était comparable à l'impact observé sur le site « Area 408 », en Angleterre, où le panache pourrait être responsable de modifications dans la nature des fonds, jusqu'à 3 km du site de dragage (Robinson *et al.*, 2005). Dans certains cas, l'extension du panache turbide peut atteindre 8 km (Dickson and Rees, 1998 *in* Newell *et al.*, 2004).**

3.1.2. Impact sur la topographie du fond marin

Les extractions sont généralement réalisées au moyen d'une élinde trainante. Cette pratique conduit à la formation de sillons sur le fond marin, comme cela est observé en Baie de Seine,

à Chassiron, au Pilier, ainsi que sur de nombreux sites d'extraction anglais (Birchenough *et al.*, 2010 ; Cooper *et al.*, 2007b ; Davies and Hitchcock, 1992a ; Hitchcock and Bell, 2004 ; Kenny and Rees, 1994). Ces sillons reflètent directement la direction de la drague et sont globalement rectilignes (Duclos, 2012). En France, les becs d'élinde sont essentiellement de type « fixed visor » et de type « California » dont la largeur est comprise entre 2 et 2,5 m (Duclos, 2012). Elles génèrent des sillons dont la profondeur est comprise entre 35 et 50 cm (Davies and Hitchcock, 1992a ; Hitchcock *et al.*, 1998). Les largeurs et profondeurs des sillons, en raison des passages répétés au même endroit, telles qu'elles ont pu être mesurées *in situ* sur les sites anglais, varient respectivement entre 1 et 4 m de large, et une profondeur de 20 à 50 cm (Birchenough *et al.*, 2010 ; Davies and Hitchcock, 1992 ; Kenny and Rees, 1994).

Les modifications du relief induites par le creusement de sillons sur le fonds marin, sur les sites français, étaient donc d'un ordre de grandeur comparable à ce qui a été mis en évidence par les travaux scientifiques. En effet, la largeur des sillons était d'environ 5 m en Baie de Seine (non-mesurée à Chassiron) et leur profondeur variait entre 20 cm (Chassiron) et 1 m (Baie de Seine).

Plus l'intensité de l'extraction est élevée, plus le nombre de sillons isolés diminue pour former une dépression (Cooper *et al.*, 2007b ; Krause *et al.*, 2007 ; Le Bot *et al.*, 2010). La morphologie de cette dernière est liée à la fréquence des dragages, au volume cumulé des extractions, ainsi qu'à leur localisation (Duclos, 2012). De telles structures topographiques ont été observées au Pilier et aux Duons, avec des creusements de 7 et 5 m par rapport au niveau moyen du fond marin. A Dieppe, c'est l'ensemble de la surface de la concession (soit 5,9 km²) qui présentait un approfondissement d'environ 2 mètres. Ces trois sites sont exploités depuis de nombreuses années (début des extractions en 1988, 1965 et 1979, respectivement). Le volume cumulé des excavations depuis l'ouverture des travaux miniers est donc relativement élevé, ce qui explique l'ampleur des reliefs générés. La production totale cumulée⁴ était équivalente à 23248612 m³ au Pilier, à 378534 m³ aux Duons (soit 446815 tonnes) et à 3877393 tonnes et à 4460975 tonnes respectivement sur l'ancien et le nouveau site d'extraction Granulats Marins de Dieppe (calculé à partir des volumes extraits chaque année et indiqué dans les dossiers de suivis environnementaux). Des dépressions ont été observées en Baie de Seine mais celles-ci étaient plus modestes que sur les sites précédents (approfondissement localisé de 2 m par rapport au fond marin). A Chassiron, des souilles ont également été mises en évidence sur les concessions B et C. Celles-ci avaient une

⁴ Indiquée dans les suivis quinquennaux les plus récents

profondeur d'environ 5 m et témoignaient d'une intensité de dragage relativement élevée (volume des quotas équivalent à 330000 m³ autorisés par an) sur une zone relativement restreinte (surface des souilles équivalentes à 0,5 et 0,7 km²). Le site de la Baie de Seine n'a fait l'objet que d'extractions expérimentales d'une durée de un et trois ans suivant les secteurs. Par conséquent, le volume cumulé des extractions était relativement réduit, atteignant 500000 tonnes sur le secteur exploité pendant un an et 150000 tonnes sur le secteur exploité pendant trois ans.

Le dragage à point fixe est moins couramment utilisé que le dragage avec aspiration en marche (et élinde trainante). Cette méthode est mise en œuvre lorsque la surface des dépôts sédimentaires est restreinte ou bien lorsque ceux-ci sont épais. Sur le site de la Horaine, cette méthode d'extraction a été choisie en raison des reliefs accidentés de la dune hydraulique qui compliquent l'utilisation d'une drague à aspiration en marche. Selon Desprez (2012), la surface impactée par les dragages en points fixes est généralement inférieure à la surface impactée par les dragues à aspiration en marche. En revanche, les dépressions formées sont souvent plus profondes. Sur le site de la Horaine, des puits cylindriques d'environ 250 m de diamètre ont été mis en évidence *via* les levés bathymétriques. **Ces dimensions étaient cohérentes avec les observation d'Hitchcock and Bell (2004) dans un secteur d'extraction en point fixe « North Nab 122/3 » (sud de l'Angleterre).** Ces auteurs ont mesuré des puits de 300 m de long et de 100 m de large. **En revanche, la profondeur des puits pouvait être deux fois supérieure à ceux observés sur le site de la Horaine (10 m contre 1 à 5,5 m de profondeur).** Sur le site « North Nab 122/3 », la quantité de matériel excavé chaque année était supérieure au volume prélevé annuellement sur l'ancien périmètre d'extraction de la Horaine (150000 tonnes contre 100000 tonnes). En outre, à « North Nab 122/3 », l'extraction était focalisée sur une zone de quelques centaines de mètres carrés à l'intérieur de la concession, ce qui en faisait l'un des sites du Royaume-Uni les plus intensivement dragué par unité de surface. En comparaison, l'exploitation sur l'ancien périmètre d'extraction de la Horaine était plus diffuse (répartie sur 1,32 km²). De ce fait, un niveau d'intensité de la pression d'extraction plus faible, couplé à un volume annuel extrait inférieur sur le site de la Horaine que sur le site anglais « North-Nab 122/3 » doit permettre d'expliquer la limitation de la profondeur des dépressions.

Les changements de morphologie du fond marin sont susceptibles d'altérer les conditions hydrodynamiques locales et d'affecter les côtes adjacentes. Un tel phénomène a été mis en évidence par Kortekaas *et al.* (2010) sur la côte allemande de la mer Baltique, où certaines plages ont reculées de 30 à 70 m par siècle au cours des 160 dernières années en lien avec l'extraction de granulats marins. Ces auteurs ont montré qu'un approfondissement, même modéré (1 à 2 m par rapport au niveau moyen du fond marin, soit une modification de la bathymétrie de l'ordre de 10%), était susceptible de modifier significativement l'action des vagues et des courants sur le transport sédimentaire potentiel à la côte, et de priver les plages de leur apport en sable. Pour les sites français étudiés dans le présent rapport, les modèles prédisaient que le creusement du fond marin aurait un impact relativement limité (modification de la hauteur significative des houles inférieure à 10% par rapport aux conditions naturelles) et restreint à proximité du périmètre d'extraction et/ou à ses abords immédiats. Sur la concession Chassiron E, les modèles suggéraient que le creusement des fonds marins serait susceptible de modifier les conditions d'agitation sur les côtes, au sud-ouest de l'île de Ré et au nord-est de l'île d'Oléron. Cependant, ces modifications étaient inférieures à 5% des hauteurs significatives des vagues en conditions naturelles (*i.e.* sans creusement). Par conséquent, les auteurs de la modélisation hydrodynamique ont suggéré que les courants résiduels de houle le long de la côte ne seraient pas modifiés par le creusement de la concession E, y compris dans le cas de houles très énergétiques. Sur les autres sites d'extraction analysés dans la présente étude, les impacts à la côte seraient également négligeables. Cela va à l'encontre des observations de Kortekaas *et al.* (2010) sur la côte allemande de la mer Baltique. Toutefois, **dans les faits, seul un nombre très restreint d'études scientifiques ont observé un impact de l'extraction sur le littoral.** Il a longtemps été suspecté que l'extraction de granulats était le principal moteur de l'érosion drastique de certaines plages du Pays de Galles. Or, une étude scientifique dédiée, conduite par Phillips (2008) sur la base d'un suivi du trait de côte de 5-6 ans, n'a pas établi de lien de cause à effet entre l'activité d'extraction et l'érosion des plages. Celle-ci serait plutôt imputable à d'autres facteurs tels que la hauteur d'eau, le vent, les vagues et les aménagements anthropiques. Une seconde étude conduite au sud du Portugal par Lopes *et al.* (2009) à l'aide d'un modèle numérique, a montré que la formation d'une importante souille (900 m de long x 150 m de large, pour une profondeur de 5 m par rapport au niveau moyen du fond marin situé à 15-20 m), entraîne des modifications relativement modérées de la vitesse orbitale des vagues (entre

2 et 16% selon les scénarios testés). Ces modifications se propageraient jusqu'à l'isobathe – 4 m sans toutefois atteindre la côte (distante de 4 km par rapport au site d'extraction).

3.1.3. Impact sur la nature des fonds marins

Il est largement reconnu que l'extraction de granulats marins est susceptible de modifier la nature du fond marin *via* (i) le dépôt des eaux de surverse, (ii) la décantation des sédiments transportés naturellement dans les sillons et/ou les souilles d'extraction et (iii) la mise à jour de couches sédimentaires sous-jacentes (Boyd *et al.*, 2004, 2005 ; Boyd and Rees, 2003 ; Cooper *et al.*, 2007b ; Kenny and Rees, 1994 ; Newell *et al.*, 2004 ; Robinson *et al.*, 2005). Sur le site des Duons, aucun changement dans la granulométrie du sédiment n'a été observé. Cependant, l'absence de carte de différentielle de la nature des fonds n'a pas véritablement permis de conclure à l'absence d'impact du dragage sur ce site. Un impact a en revanche été constaté sur les autres sites d'extractions étudiés. **Sur les sites du Pilier et Granulats Marins de Dieppe, cet impact se traduisait par un affinement granulométrique généralisé à l'échelle du site d'extraction (Pilier) ou le comblement des sillons par du sable fin (Dieppe). Les études menées par Boyd and Rees (2003) et Cooper *et al.* (2005) sur plusieurs sites d'extraction anglais (« Areas 122/3 », « Area 351 », « Area 408 », « Area 222 » et « Hastings ») ont mis en évidence un patron similaire, en lien avec le dépôt des eaux de surverse et/ou la pratique du criblage des sédiments à bord (« screening »).**

Sur le site du Pilier, l'impact du panache turbide était relativement limité. Les changements dans la nature sédimentaire étaient donc restreints au périmètre d'extraction, à l'instar des observations de Cooper *et al.* (2007b), sur le site d'Hastings. En revanche, sur le site Granulats Marins de Dieppe, l'extension spatiale du panache turbide atteignait 3,5 km et des changements granulométriques ont été observés jusqu'à 2 km du site d'extraction. Ces observations sont très similaires à celles réalisées par Robinson *et al.* (2005b) sur le site « Area 408 », où l'hydrodynamisme (courant de marée maximal équivalent à $1,5 \text{ ms.s}^{-1}$) est très proche des conditions observées à Dieppe où des zones de dépôts de sédiments fins, bien triés, ont été observées jusqu'à 3 km des zones de dragages. Un tel patron est généralement observé dans les sites où le criblage des sédiments est pratiqué (Cooper *et al.*, 2007a ; Newell *et al.*, 2004 ; Robinson *et al.*, 2005). Ainsi, Newell *et al.* (2004) ont observé des changements dans la composition faunistique jusqu'à 2 km du site d'extraction « Area 122/3 », probablement en lien avec le rejet de sédiments fins lors du

criblage. Certaines études menées sur les effets du criblage en mer indiquent que le volume de sédiment rejeté par cette pratique pourrait atteindre 60 à 80% du volume extrait (Newell *et al.*, 2004, 1998). Selon Desprez (2012), le volume rejeté de cette manière représenterait 300 fois celui associé à une surverse. Le criblage en mer n'est pas autorisé en France (interdiction inscrite dans les arrêtés préfectoraux d'ouverture de travaux). Dans la mesure où sur certains sites tels que Dieppe et Baie de Seine, l'extraction par surverse modifie déjà profondément la nature des fonds, au-delà du périmètre d'extraction, la pratique du criblage du sédiment augmenterait de façon majeure l'importance des dépôts de sédiments fins, celle-ci étant corrélée au volume de sédiment rejeté (Hitchcock and Drucker, 1996). **Par conséquent, on ne peut qu'encourager le maintien des mesures d'interdiction de criblage imposées par les arrêtés préfectoraux comme mesure de réduction des effets du panache turbide.**

A l'inverse, une augmentation de la taille des grains sédimentaires a été observée sur les sites Baie de Seine (mise à jour de blocs rocheux), et dans une moindre mesure à Chassiron (quelques zones de sables fins à moyens ont été remplacées par des graviers) ou à la Horaine (quelques zones de sables coquillers ont été remplacées par des graviers et des galets). **Ces modifications résultent très probablement de la mise à jour des strates sédimentaires sous-jacentes, comme cela a été décrit par Kenny and Rees (1994) lors d'un dragage expérimental sur la côte est de l'Angleterre.** Ces auteurs avaient observé une augmentation de la proportion en gravier (> 2 mm) dans le sédiment du site de dragage expérimental. L'examen d'un échantillon de sédiment prélevé à l'aide d'un carottier avait montré que cette zone présentait initialement (avant les dragages) une proportion élevée de graviers dans la couche comprise entre 0,05 et 0,7 m de profondeur dans le sédiment. Kenny and Rees (1994) avaient alors suggéré que le dragage avait entraîné l'affleurement de cette couche sédimentaire.

3.2. Impact sur l'environnement biologique

3.2.1. Impact sur les peuplements macrobenthiques

Il est communément admis que l'extraction de granulats marins entraîne de profonds changements dans la structure des peuplements macrobenthiques. Les dragues aspirent les organismes benthiques en même temps que le sédiment superficiel, ce qui tend à défaucher les zones de dragages (Desprez, 2012 ; Kenny and Rees, 1994 ; Newell *et al.*, 1998).

Contrairement à certaines activités générant une perturbation physique sur le fond marin (e.g. chalutage de fond : Bremner *et al.*, 2003 ; de Juan *et al.*, 2007 ; Kenchington *et al.*, 2007 ; Tillin *et al.*, 2006), l'impact sur la macrofaune benthique est, dans le cas de l'extraction de granulats marins, non-sélectif. Toutes les espèces sont susceptibles d'être impactées de la même manière, et ce quels que soient leur identité et/ou traits d'histoire de vie. La plupart des organismes macrobenthiques sont en effet incapables de fuir lors du passage de l'élinde (contrairement aux poissons).

De nombreuses publications scientifiques ont décrit des réductions de la richesse spécifique de 30 à 80% et des diminutions d'abondance comprise entre 40 et 90% (Boyd *et al.*, 2005, 2004 ; Cooper *et al.*, 2011 ; Newell *et al.*, 2004, 1998). Les impacts constatés sur les sites de Dieppe (réduction de la richesse spécifique de 74 à 82%, réduction de l'abondance de 84 à 95% et réduction de la biomasse de 94% à 98%) et de Baie de Seine (réduction de la richesse spécifique de 22% à 42%, réduction de l'abondance de 66% à 71%) étaient donc similaires à l'impact constaté sur certains sites d'extraction anglais. Toutefois, très peu d'études ont mis en évidence une véritable défaunation sur les sites d'extraction. A notre connaissance, cela n'a été observé que par Simonini *et al.* (2007) en mer Adriatique, sur la base d'un protocole BACI (Before After Controlled Impact). Généralement, la majorité des études comparent les peuplements benthiques entre des sites dragués et des sites de références, non-exploités. Il y a donc une potentielle inadéquation entre les échelles spatio-temporelles des observations et celles de l'impact.

Dans le cadre des suivis environnementaux de l'activité d'extraction, les prélèvements benthiques ne sont pas directement réalisés après le passage des dragues, ce qui permet une certaine recolonisation par les organismes présents dans les zones adjacentes. **Les peuplements benthiques des sites d'extractions sont d'ailleurs souvent dominés par des espèces pionnières, capables de recoloniser rapidement le milieu après une perturbation (Cooper *et al.*, 2007 ; Newell *et al.*, 2004a ; Ware *et al.*, 2009).** Par exemple, Boyd and Rees (2003) ont observé une augmentation de l'abondance de *Balanus crenatus* et de *Leptocheirus hirsutimanus*, deux espèces pionnières, dans le site d'extraction et à son voisinage immédiat. Sur le site « Area 408 », Robinson *et al.* (2005) ont rapporté un impact limité de l'extraction sur la composition faunistique. Cependant, ce site était peuplé par des espèces inféodées aux graviers ensablés (*Ophelia borealis*, *Spiophanes bombyx*, *Nephtys caeca*, *Scoloplos armiger* et *Parexogone hebes*, des nématodes et des némertes ainsi que plusieurs crustacés comme *Pisidia longicornis* et *Bathyporeia* spp.) et capables de recoloniser rapidement le milieu après

un épisode de perturbation. Les impacts ne peuvent pas être estimés sur la base des seules valeurs de richesse spécifique, abondance et biomasse. La composition des peuplements benthiques est également à prendre en compte car deux valeurs de richesse spécifique peuvent correspondre à des compositions faunistiques totalement différentes.

Il est par ailleurs possible que la défaunation soit un processus très localisé et restreint aux sillons venant d'être creusés. Or, les prélèvements macrobenthiques, du fait de la difficulté à positionner les bennes avec précision à la surface du sédiment, ne sont pas réalisés à l'endroit exact où la drague est passée, ce qui tend à sous-estimer l'importance de l'impact du dragage sur la macrofaune benthique. Ceci soulève également la question de l'adéquation entre l'échelle spatiale à laquelle les indices d'intensité de dragage sont calculés, typiquement un hectare (*e.g.* Boyd *et al.*, 2005 ; Cooper *et al.*, 2007, 2008), et l'échelle à laquelle se produit l'impact (quelques mètres carrés). Si l'utilisation d'indicateurs d'intensité de dragage représente une véritable avancée dans la compréhension des impacts, qui doit être encouragée pour l'ensemble des sites d'extraction, il faut néanmoins garder à l'esprit que les indices restent perfectibles, notamment en terme de précision spatiale.

Il est également largement reconnu que l'extraction de granulats marins est susceptible de modifier les peuplements macrobenthiques en modifiant la nature des fonds (Bolam, 2012 ; Boyd *et al.*, 2005 ; Boyd and Rees, 2003 ; Cooper *et al.*, 2011 ; de Jong *et al.*, 2015 ; Froján *et al.*, 2011 ; Newell *et al.*, 2004 ; Robinson *et al.*, 2005). A l'échelle des côtes anglaises, la vitesse moyenne des courants, la teneur en vase et la teneur en sable expliquaient 13,1% de la variabilité dans la composition faunistique (6,1% pour la vitesse des courants, 3% pour la teneur en vase et 4% pour la teneur en sable) (Cooper and Barry, 2017). A plus petite échelle, sur les côtes bretonnes, cette même variabilité est expliquée à hauteur de 20% par les caractéristiques sédimentaires (teneur en vase, diamètre moyen des grains sédimentaires et indice de tri), à hauteur de 13% par les conditions hydrodynamiques (vitesse maximale des courants et agitation moyenne des vagues) et à 4% par la variabilité environnementale (écart-type de la température, concentration de matière en suspension et saturation en oxygène, Dutertre *et al.*, 2013). **Cependant, la relation entre la faune benthique et le sédiment est potentiellement variable selon les habitats considérés.** Une méta-analyse réalisée par Cooper *et al.* (2011) et incluant onze sites d'extraction localisés le long des côtes est et sud de l'Angleterre a montré que **les peuplements benthiques inféodés à des zones stables riches**

en graviers étaient les plus sensibles aux changements dans la granulométrie des sédiments. A contrario, les peuplements inféodés à des zones sableuses dynamiques seraient les moins sensibles aux changements dans les caractéristiques sédimentaires.

Sur les sites de la Horaine et de Chassiron, des changements dans la nature du fond ont été constatés lors des suivis environnementaux. Il n'a cependant pas été possible de déterminer les conséquences de ces changements sur la faune benthique de ces sites en raison des biais méthodologiques dans les protocoles utilisés. Sur le site du Pilier, une tendance à l'affinement granulométrique a été observée, se répercutant sur la composition faunistique par le remplacement de *Spisula solida* (qui est inféodé aux fonds sableux et/ou relativement grossiers) par le bivalve *Abra alba* (qui affectionne les milieux envasés). Cette substitution est très comparable à celle observée par de Jong *et al.* (2015) dans une souille profonde, située sur un fond de 20 m, en face du port de Rotterdam. Ces auteurs ont observé une augmentation drastique de l'abondance d'*Abra alba*, en lien avec le comblement de la souille par des sédiments fins, deux ans après l'arrêt des travaux d'extraction.

Le patron mis en évidence à Dieppe était relativement plus complexe que celui du site du Pilier. En effet, l'extraction de granulats marins augmentait l'hétérogénéité de l'habitat en générant une alternance de zones ensablées (comblement des sillons et dépôts de surverse) et de galets. Cependant, les dossiers de suivis, ainsi que la synthèse de Desprez (2012), ne permettaient pas de déterminer les conséquences de ce changement sur la faune benthique. Il était seulement indiqué qu'aux stations exposées à la surverse, les paramètres biologiques étaient considérablement réduits par rapport aux stations de référence. De ce point de vue, Desprez *et al.* (2010) indiquent que l'augmentation de l'hétérogénéité de l'habitat se traduit par une distribution des peuplements macrobenthiques en mosaïque, avec une alternance entre des espèces caractéristiques des sédiments grossiers (*Glycymeris glycymeris*, *Echinocyamus pusillus*, *Branchiostoma lanceolatum*⁵, *Nephtys cirrosa*, *Asbjornsenia pygmaea*⁶, *Arcopagia crassa*) et des espèces caractéristiques de sables fins (*Spiophanes bombyx*, *Spisula elliptica*, *Thia scutellata*). Les zones de dépôts de sables fins abritaient une abondance et une biomasse réduites par rapport aux zones de sédiments grossiers ce qui, selon les auteurs de cette étude, serait dû à l'incapacité des peuplements d'origine (établis sur un substrat stable) à supporter le dépôt de sables fins (remobilisé en permanence (sous l'influence de l'activité d'extraction et de l'hydrodynamisme important). Dans les zones de dépôt de sables fins, facilement

⁵ Anciennement *Amphioxus lanceolatus*

⁶ Anciennement *Tellina pygmaea*

remobilisables, les peuplements benthiques seraient maintenus dans un état proche des premiers stades de recolonisation.

L'extraction de granulats marins est enfin susceptible d'impacter les peuplements benthiques, hors du périmètre d'extraction *sensu stricto*, par les dépôts issus des eaux de surverse. Newell *et al.* (2004) ont mis en évidence que l'extension spatiale de l'impact sur la macrofaune peut atteindre 4 km par rapport au site de dragage proprement dit (site « Area 122/3 »). Une zone de 2 km, située hors du site d'étude et dans l'axe du courant de marée, présentait une biomasse plus élevée que dans les sites de référence ce qui serait imputable à un enrichissement en matière organique relarguée lors de la surverse. Cependant, cette explication était restée hypothétique et n'avait pas été démontrée à l'aide de mesure dans les sédiments. **A Dieppe, l'extension spatiale de l'impact engendré sur la macrofaune était comparable aux observations de Newell *et al.* (2004).** Des stations éloignées d'environ 2 km des zones de dragages mais exposées à leur panache turbide se caractérisent par des réductions de la richesse spécifique (-56 à -94%), de l'abondance (-43 à -98%) et de la biomasse (-57 à -86%) par rapport aux sites de référence (non-dragués et non-exposés à la surverse). Ce résultat suggère que l'impact de la surverse hors du périmètre d'extraction peut être aussi important que dans les zones de dragage. Froján *et al.* (2011), n'avaient pas observé, sur le site « Area 408 », où le criblage est pratiqué, de différence dans la composition faunistique entre un site de dragage intensif et un site adjacent, peu dragué. Les dépôts de sédiments fins rejetés lors du tamisage pourraient donc couvrir certaines parties du site peu dragué et entraîner des effets disproportionnés par rapport au degré perçu de perturbation directe.

3.2.2. Impact sur les peuplements halieutiques

Peu d'études scientifiques se sont focalisées sur l'impact de l'extraction de granulats marins sur les peuplements halieutiques. Parmi les sites étudiés, l'impact de l'extraction sur les peuplements halieutiques n'a pu être déterminé que pour le site du Pilier (études réalisées par l'Ifremer et le Comité régional des pêches et des élevages marins des pays de Loire) de Dieppe et de Baie de Seine, sur la base des études menées par le GIS SIEGMA.

L'impact était minimal sur le Pilier, avec une augmentation de la richesse spécifique, de l'abondance et de la biomasse des ressources halieutiques entre les zones draguées et les

zones non-draguées. Ces augmentations étaient équivalentes à +45%, +120% et +80%, respectivement. Une augmentation de la richesse spécifique de 40% a également été observée dans les secteurs dragués, à Dieppe. De manière générale, ce sont les poissons benthiques et démersaux qui étaient les plus favorisées par les extractions (aux dépens des espèces pélagiques). Ceci pourrait résulter de l'attraction de certains prédateurs-charognards/nécrophages vers les sites de dragage où des organismes moribonds sont rejetés avec les eaux de surverse comme suggéré par Marchal *et al.* (2014) lors d'une étude conduite à l'échelle de la Manche-Est. Ces auteurs avaient observé une concentration importante des différentes flottilles de pêche (*i.e.* caseyeurs, fileyeurs et chalutiers) à proximité des sites d'extractions de granulats marins et en avaient déduit que les principales espèces ciblées par la pêche (*i.e.* tourteau, homard, bulot et sole) devaient y présenter des densités élevées, supérieures aux valeurs moyennes observées généralement en Manche-est (les auteurs soulignent néanmoins la sensibilité potentielle des espèces exploitées aux activités d'extraction sur le long terme). L'attraction des prédateurs et nécrophages dans les zones perturbées est également une observation récurrente dans les études traitant de l'impact du chalutage de fond (Bergmann *et al.*, 2002 ; Groenewold and Fonds, 2000 ; Kaiser and Spencer, 1994). Cependant, cette attraction est souvent temporaire et cesse lorsque la perturbation prend fin. L'importance de ce type de source de nourriture, dans l'alimentation des prédateurs et des nécrophages, fait encore débat au sein de la communauté scientifique. Par conséquent, il est possible que l'augmentation de la richesse spécifique, de l'abondance et de la biomasse des peuplements halieutiques observée sur le site du Pilier ne constitue pas un effet positif de l'extraction de granulats sur le long-terme. Des études complémentaires doivent être menées sur ce site d'extraction afin de déterminer les liens de cause à effet entre l'extraction et les peuplements halieutiques sur le site du Pilier. En outre, la fermeture définitive de ce site en 2018 sera l'occasion de confirmer le caractère temporaire de l'attraction des poissons sur ce site.

L'impact était maximal à Dieppe où la richesse spécifique était réduite de 35 à 47%, l'abondance était diminuée de 50 à 70%, tandis que la biomasse était réduite de 80 à 90%, selon les secteurs. En Baie de Seine, une diminution de la richesse spécifique, de l'ordre de 50 à 70%, a également été constatée. La cartographie du phénomène suggère que l'impact de l'extraction de granulats marins est restreint au périmètre d'extraction et à ses abords proches (quelques centaines de mètres). Ces résultats étaient comparables à ceux de l'étude menée par

Hwang *et al.* (2013) à l'ouest de la Corée du Sud, montrant une forte réduction de la richesse spécifique, de la diversité et de l'abondance des peuplements halieutiques (entre 60% et 90%) sur deux sites exploités et comparés à une zone non-draguée. Les analyses multivariées ont révélé que l'identité des espèces était plus proche entre les deux sites d'extraction qu'entre les sites d'extraction et le site de référence. Selon Hwang *et al.* (2013) cela traduirait notamment l'impact de l'extraction sur les organismes macrobenthiques, qui constituent les proies des poissons benthodémersaux. La synthèse de Birklund and Wijsman (2005) sur les effets de l'extraction de granulats marins sur les fonctions écologiques suggère également que la déplétion qualitative et quantitative des communautés benthiques peut affecter les niveaux trophiques supérieurs (poissons, oiseaux) lorsque l'augmentation dans la surface d'une zone géographique donnée conduit à une perte d'habitat et de ressource alimentaire potentielle. L'étude de Pearce (2008), menée sur des sites anglais, a également montré que l'altération du benthos par le dragage était susceptible de modifier le régime alimentaire des poissons démersaux. Cependant, en raison de la plasticité trophique des poissons (la majorité des poissons étudiés sont capables de changer de proies), il est possible que ces changements n'aient pas d'effets dommageables. Les travaux de Greening and Kenny (1996) vont également dans ce sens. Ils n'ont en effet pas observé de différences entre le nombre de taxons proies dans l'estomac des poissons provenant de sites dragués et non dragués. Cela semblait également être le cas en Baie de Seine, où le régime alimentaire des poissons n'était pas modifié sur le site d'extraction par rapport aux sites de référence. Seules les soles exhibaient un taux de remplissage de leur estomac supérieur sur le site d'extraction, en association avec une contribution accrue des bivalves et des espèces épigées inféodées aux zones de graviers dans leur régime alimentaire. Cette observation est à relier à la mise à l'affleurement de blocs rocheux sur le site exploité en continu pendant trois ans. A Dieppe, les changements de fréquentation des poissons démersaux étaient liés à des modifications de la distribution spatiale de leurs proies, elles-mêmes induites par des modifications des faciès sédimentaires. Sur le site de Dieppe, les changements dans la nature des fonds étaient plus conséquents qu'en baie de Seine où hormis la mise à l'affleurement de blocs rocheux, peu de changements avaient été constatés (probablement en raison du faible nombre d'années d'extraction et d'un substrat originel moins grossier).

En plus d'une réduction de l'intérêt trophique des sites d'extraction, l'activité est également susceptible d'impacter les peuplements halieutiques en détruisant des zones d'importance

fonctionnelle majeure comme les sites de pontes et de nourriceries. Les œufs et les larves de certaines espèces (*e.g. Cancer pagurus*, Bennett and Brown, 1983) sont susceptibles de surcroît d'être aspirées en même temps que le sédiment superficiel lors des dragages (Tillin *et al.*, 2011). Cependant, l'étendue spatiale des zones d'intérêt fonctionnel dépasse souvent très largement la superficie des sites d'extraction. Il est donc difficile de relier les effets de l'extraction à une destruction de ces habitats.

3.3. Résilience environnementale

3.3.1. Résilience physique

La résilience physique est définie comme le temps nécessaire pour que les traces des dragages ne soient plus détectables par imagerie et pour que la composition du sédiment soit similaire aux conditions pré-dragage et/ou aux conditions locales des sites de références (Boyd *et al.*, 2004). **Selon Foden *et al.* (2009), le temps de résilience serait variable selon la nature des fonds et les conditions hydrodynamiques locales.** Ces auteurs précisent que la majorité des sites d'extractions anglais sont localisés dans des sédiments grossiers, caractérisés par un hydrodynamisme modéré, ne favorisant pas la résilience physique. Sur ces sites, le temps de résilience est en moyenne de 20 ans. Cooper *et al.* (2007b) et Limpenny *et al.* (2002) ont observé la présence de sillons endommagés (éboulement des crêtes des sillons) sur les sites d'« Hastings » et « Area 107 », qui étaient pourtant fermés à l'extraction depuis respectivement 8 et 7 ans. Selon Boyd *et al.* (2004), les traces laissées par les dragues auraient persisté pendant plus de 10 ans sur le site « Area 122 ».

La plupart des sites étudiés dans le présent rapport étaient, à l'instar de la plupart des sites anglais, caractérisés par des sédiments grossiers et par un hydrodynamisme modéré ($< 1 \text{ m.s}^{-1}$, excepté à la Horaine et à Dieppe). Il est donc possible que le temps de résilience de l'environnement physique avoisine deux décennies sur ces sites. Cependant, sur des sites de dragage à point fixe, la résilience des souilles pourrait nécessiter plusieurs décennies (Schwarzer, 2010 ; Szymelfenig *et al.*, 2006). Sur le plateau continental de la Belgique, malgré des transits sédimentaires importants liés à de forts courants de marée, l'intensité de l'activité d'extraction a conduit à la création de dépressions de 5 m de profondeur par rapport au niveau moyen du fond marin. Celles-ci n'ayant pas montré d'indice de comblement trois ans après la fin des extractions, pourraient être permanentes (Van Lancker *et al.*, 2010). **La résilience morphologique des souilles d'extraction impose que le sédiment participant à les combler soit de même nature que le substrat de référence, afin**

de ne pas modifier la nature du fond marin. Or, les sédiments ponctionnés par l'activité minière sont souvent grossiers et d'origine fossile. Ils ne peuvent pas être apportés par le transport sédimentaire. Dans ce cas, la question de la possibilité d'une résilience morphologique reste posée.

La résilience de l'environnement physique n'a véritablement été étudiée qu'à Dieppe. Sur ce site, certains sillons étaient encore observables 10 ans après l'arrêt des extractions ; ce qui est cohérent avec les observations faites sur certains sites anglais. Le comblement partiel des sillons par les sédiments fins a entraîné des modifications dans la nature du substrat, toujours pérennes 15 ans après l'arrêt des extractions sur l'ancien périmètre d'extraction. La résilience physique semble donc largement plus longue sur le site de Dieppe en comparaison à ce qui a pu être observé dans la majorité des études anglaises. Cependant, les matériaux extraits sur ce site correspondant à des galets constituant des cordons fossiles (objet géologique particulier) ; leur résilience tant en termes de nature que de morphologie ne sera vraisemblablement pas possible.

3.3.2. Résilience biologique

Selon Foden *et al.* (2009), le temps de résilience des peuplements macrobenthiques dépendrait de (i) l'étendue spatiale de l'activité de dragage, (ii) de son intensité ainsi que (iii) de l'habitat considéré (ordre de grandeur des perturbations naturelles). La moitié des sites d'extractions anglais aurait un temps de résilience biologique équivalent à 8,7 ans en moyenne. Les zones estuariennes auraient les temps de résilience les plus courts, de l'ordre de 5,25 ans. Sur le site « Area 122 », caractérisé par des sables très grossiers et un hydrodynamisme relativement modéré, Boyd *et al.* (2005, 2004) ont recensé des temps de résilience biologique de l'ordre de 10 ans. Sur le site « Area 408 », composé de sables et de graviers ensablés, Cooper *et al.* (2005) et Robinson *et al.* (2005b) ont constaté que les peuplements benthiques étaient toujours dans un état altéré 10 ans après l'arrêt des extractions. A l'inverse, les sédiments grossiers exposés à un stress tidal modéré présenteraient le temps de résilience biologique le plus long, avec une moyenne de 10,75 ans. Cependant, **la résilience biologique est fortement conditionnée par la résilience de l'environnement physique. Ainsi, sur des sites où la nature du substrat n'a pas changé, la résilience peut-être relativement rapide.** Une étude conduite par Cooper *et al.* (2008) sur

le site d'Hastings (Sud-Est de l'Angleterre), caractérisé par des dépôts de graviers, a conclu (selon les secteurs étudiés) à un retour de la composition faunistique à un état proche de l'état de référence au bout de un et deux ans après l'arrêt des dragages. L'utilisation d'indices de diversité fonctionnelle (indice trophique de l'endofaune, Rao's Q, indice de distinction taxonomique et indice de production somatique) suggère que la résilience fonctionnelle de la communauté macrobenthique a eu lieu un an avant la résilience de la composition spécifique. Dans une zone sableuse du site d'Hastings, exposée à un hydrodynamisme élevé, Cooper *et al.* (2008) estiment que la résilience biologique rapide a été permise par une résilience physique déjà achevée ou proche de l'être. Sur le site « Area 222 » où le criblage à bord des sédiments est pratiqué par les extracteurs et sur lequel des dépôts importants de sédiments fins ont été observés, Boyd *et al.* (2005) ont montré que la structure des peuplements benthiques n'était toujours pas restaurée six ans après la fin des extractions. Cette étude apportait également des preuves que la composition du sédiment n'avait pas retrouvé ses caractéristiques d'origine à l'issue de cette période. Sur ce même site, Hussin *et al.* (2012), en se basant sur des analyses traditionnelles et des approches fonctionnelles, ont mis en évidence que dans le secteur où l'intensité de dragage était la plus faible, la macrofaune s'était complètement rétablie au moins sept ans après la fin du dragage. En revanche, dans les secteurs où l'intensité du dragage était élevée, la plupart des indices (taxonomiques et fonctionnels) suggéraient que la résilience n'avait pas encore eu lieu, même 11 ans après la fin du dragage. Ces auteurs avaient prédit que sur ce site, le temps de résilience benthique pourrait être compris entre 15 et 20 ans. Sur le site « Area 408 », Froján *et al.* (2011) ont également étudié la résilience biologique d'un point de vue taxonomique et fonctionnel, au cours d'une étude de quatre ans, réalisée un an après la fin des travaux d'extraction. Les auteurs avaient conclu que la résilience biologique (taxonomique et fonctionnelle) n'était toujours pas achevée cinq ans après la fin des extractions. Contrairement au site d'Hastings, les navires opérant sur le site « Area 408 » pratiquent le criblage, ce qui a entraîné un affinement sur une grande emprise de la zone d'étude, qui a perduré au cours des quatre années d'étude. Les auteurs ont suggéré que compte tenu de l'importance des modifications de l'état physique du fond marin, il était peu probable que la résilience biologique puisse être atteinte.

Seuls les suivis réalisés sur les sites de Granulats Marins de Dieppe et de Baie de Seine se sont intéressés à la résilience des peuplements macrobenthiques. En baie de Seine, les suivis n'ont toutefois pas été conduits sur une durée suffisamment longue pour estimer le temps de

résilience (seulement deux ans après l'arrêt des extractions). Les résultats obtenus à Dieppe montrent que la valeur de richesse spécifique avait retrouvé un niveau proche de l'état de référence, sept ans après l'arrêt des extractions. Par contre, 15 ans après la fin des extractions, l'abondance était toujours très supérieure aux valeurs estimées avant le début des dragages. Cela suggère que le peuplement benthique était maintenu dans un état de recolonisation précoce par des espèces pionnières. La biomasse présentait quant à elle, une valeur stagnante à 60% de sa valeur initiale au bout de 15 ans. L'ensemble de ces résultats indiquent que la résilience biologique n'est donc pas achevée au bout de 15 ans ; ce qui est plus long que ce qui a été observé ou estimé par la majorité des études conduites au Royaume-Uni. Ce constat est à relier à la résilience physique, potentiellement improbable sur ce site composé de galets fossiles et où le déblayage des sédiments fins venant combler les sillons apparaissait être un processus non-prévisible. **Cela pose la question de la possibilité de résilience biologique sur le site de Dieppe.**

Sur le site Baie de Seine, la résilience des peuplements halieutiques a été relativement rapide et supérieure à celle des peuplements macrobenthiques (>2 ans). Les suivis halieutiques ont montré que les paramètres biologiques avaient retrouvé des niveaux proches des niveaux de référence, entre un an et demi et deux ans et demi après l'arrêt des extractions expérimentales. Ce résultat diffère de ceux obtenus par de Jong *et al.* (2014) sur une zone d'extraction située à plus de 20 m de profondeur au large du port de Rotterdam. Dans un premier temps, la biomasse des poissons démersaux avait été multipliée par un facteur 20 dans les parties les plus profondes du site d'extraction. Cependant, cet « effet positif » n'avait pas perduré dans le temps et la biomasse avait retrouvé des niveaux proches de l'état de référence, deux ans après la fin des extractions. Deux ans après l'arrêt des extractions, la composition faunistique du peuplement halieutique montrait des différences significatives par rapport à l'état de référence, preuve d'une résilience inachevée à l'issue de cette période. A Dieppe, la résilience des peuplements halieutiques n'était pas achevée au bout de 15 ans, alors que celle du peuplement macrobenthique s'en approchait. Il n'y a, à notre connaissance, aucune étude scientifique menée sur une période suffisamment longue pour estimer la résilience des peuplements halieutiques avec précision. Les résultats obtenus sur le site de Dieppe peuvent donc difficilement être comparés avec les données de la littérature scientifique.

En France, les mesures ERC (Eviter, Réduire, Compenser) incluses dans les arrêtés préfectoraux régissant les modalités d'exploitations prévoient plusieurs dispositions visant à laisser les fonds marins dans un état proche de l'état de référence, à l'issue des travaux miniers. L'objectif de ces mesures est de faciliter la recolonisation biologique. Ceci est également imposé par la politique gouvernementale du Royaume-Uni mais, l'analyse des publications scientifiques suggère que cette politique a échoué car, **sur de nombreux sites, l'extraction de granulats marins a entraîné de profonds changements morpho-sédimentaires, notamment dans le cas d'une pratique intensive du criblage en mer**, susceptibles de limiter la résilience biologique (Boyd *et al.*, 2005 ; Cooper *et al.*, 2011 ; Froján *et al.*, 2011 ; Hussin *et al.*, 2012 ; Newell *et al.*, 2004 ; Robinson *et al.*, 2005). Selon Cooper (2012), le terme «similaire aux conditions initiales» peut être ambigu pour les extracteurs et les gestionnaires des sites d'extraction en l'absence de définition de ce qui est acceptable ou non en termes de changement de la composition des sédiments. Les gestionnaires sont contraints d'évaluer l'acceptabilité des changements de manière objective. Afin de répondre à cette interrogation, **Cooper (2012) a proposé une méthode d'évaluation basée sur la gamme de variation (i) de la composition granulométrique du sédiment et (ii) de la composition faunistique des communautés présentes à proximité des sites d'extraction, sur des zones non-impactées. Selon cet auteur, la résilience biologique devrait être possible tant que l'amplitude des changements reste dans cette gamme de variation.** Pour l'instant cette méthode a uniquement été testée sur le site d'Hastings (sud-est de l'Angleterre). Elle mérite donc d'être évaluée par un plus grand nombre de cas d'étude afin d'être validée.

4. Perspectives

4.1. Vers la prise en compte du fonctionnement de l'écosystème

L'érosion de la biodiversité pose la question de ses conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes. Cette question est au cœur des préoccupations écologiques depuis les années 60 et un nombre considérable des publications, de synthèses et de méta-analyses ont tenté d'établir un lien entre la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes et d'en comprendre les mécanismes (Balvanera *et al.*, 2006 ; Cardinale *et al.*, 2006 ; Hooper *et al.*, 2012, 2005). Il est aujourd'hui établi qu'une diminution de la biodiversité n'est pas nécessairement suivie d'une modification du fonctionnement des écosystèmes. Si le nombre d'espèce diminue mais que les espèces encore en place assurent un rôle identique à celui des

espèces disparues, alors les fonctions présentes dans l'écosystème seront maintenues (principe de redondance fonctionnelle). A l'inverse, l'absence de modification du nombre d'espèces ne signifie pas nécessairement que le fonctionnement de l'écosystème n'a pas été perturbé si l'identité des espèces et le fonctionnement qu'elles assurent a changé. Aujourd'hui, l'utilisation des traits biologiques (ensemble de caractéristiques morphologiques, d'histoire de vie, comportementales, etc... mesurables chez un organisme) comme proxy des fonctions réalisées par les organismes (Bremner, 2008) est en pleine expansion dans la recherche scientifique. Les traits biologiques des organismes sont de mieux en mieux documentés, par le biais de bases de données en ligne (<http://www.marlin.ac.uk/biotic/>), des projets scientifiques (e.g. base de données de traits biologiques du projet BENTHIS) et/ ou des publications scientifiques (Queirós *et al.*, 2013), et de telles approches ont été utilisées avec succès pour décrire l'impact du chalutage de fond sur le fonctionnement des écosystèmes benthiques (Bremner *et al.*, 2005, 2003 ; de Juan *et al.*, 2007 ; Kenchington *et al.*, 2007 ; Tillin *et al.*, 2006). Concernant l'extraction de granulats marins, seules quelques études conduites en Angleterre ont porté sur la résilience fonctionnelle des peuplements macrobenthiques (e.g. Cooper *et al.*, 2008; Froján *et al.*, 2011; Hussin *et al.*, 2012), tandis que le compartiment halieutique reste inexploré. Les analyses fonctionnelles pourraient être généralisées et incluses dans les suivis environnementaux afin d'avoir un aperçu des impacts engendrés par l'extraction de granulats dans un cadre écosystémique. D'autres pistes méritent également d'être explorées en ce sens, telle que des approches trophiques (Raoux *et al.*, 2017 ; Tecchio *et al.*, 2016).

4.2. Vers la prise en compte des impacts cumulés

Comme rappelé par Crain *et al.* (2008) la perte d'habitat et la surexploitation de certaines espèces clefs, caractérisaient historiquement les principales sources de perturbations pour les écosystèmes. Au cours du siècle dernier, cette liste s'est considérablement enrichie pour inclure, entre autres, les pollutions, les invasions d'espèces non-indigènes, et le changement climatique (voir la synthèse de Gray, 1997). La multiplicité des sources de perturbation des écosystèmes est aujourd'hui au centre des préoccupations de la recherche scientifique en écologie et la prise en compte de l'ensemble des impacts potentiels constitue un défi de taille pour les acteurs de la biodiversité : ces facteurs interagissent-ils entre eux et de quel manière ? Comment adopter des mesures de gestion efficaces pour lutter contre l'érosion de la biodiversité et/ou atteindre un bon état écologique du milieu dans le cas de perturbations

multi-sources ? A l'heure actuelle les réponses à ces questions restent essentiellement d'ordre théorique et ne s'appuient que sur un nombre très restreint d'études de terrain intégrant plus d'une source de perturbation (19 études sur 171, Crain *et al.* 2008). En 2008, Halpern *et al.* ont développé une méthode quantitative permettant de cartographier l'impact cumulé des activités humaines dans 20 types d'écosystèmes marins différents, à l'échelle planétaire. Les résultats indiquent qu'environ 41% de la surface de l'océan est sujette à un impact moyennement élevé à très élevé. Une petite fraction (0,5% soit environ 2,2 millions de km²), dont la mer du Nord, fait l'objet d'une pression cumulée très élevée. Les zones les plus impactées par les activités humaines sont les zones côtières (au sens des plateaux continentaux et de leurs pentes) qui subiraient à la fois les impacts provenant des activités terrestres et les impacts causés par les activités en mer. Si cette méthode semble prometteuse pour identifier les régions prioritaires pour la mise en place de mesures de gestion des activités humaines (*e.g.* en réduisant ou en éliminant les facteurs anthropiques contribuant le plus à l'impact cumulé), elle repose toutefois sur l'hypothèse que les impacts sont additifs. Or, une méta-analyse réalisée par Crain *et al.* (2008), et compilant les données de 171 études scientifiques pour lesquelles plus de deux facteurs de perturbation ont été pris en compte, suggère que, de manière générale, les interactions entre les sources de perturbations seraient plutôt de type « synergique ». Par conséquent, les impacts cumulés sont susceptibles d'être plus important que les impacts attendus au regard des effets individuels de chaque source de perturbation.

La prise en compte des impacts cumulés pour les écosystèmes marins et la résolution des hypothèses concernant leurs interactions imposent la bancarisation coordonnée des données issues du suivi des activités anthropiques en mer et de l'intensité des sources de perturbations (*e.g.* pêche, granulats marins, polluants, énergies marines renouvelables, trafic maritime, etc...). Des bases de données existent déjà, dans le cadre de la DCE (Quadrigé) et de RESOMAR par exemple, qui garantissent une information standardisée et de qualité à l'échelle nationale. A l'échelle régionale, ces bases de données pourraient être complétées par les données des suivis environnementaux sur l'extraction de granulats marins.

5. Conclusion générale

L'analyse des suivis environnementaux a révélé les profonds impacts engendrés par l'activité d'extraction de granulats marins sur la structure morpho-sédimentaire du fond marins ainsi que sur les peuplements benthiques et halieutiques. **Ces impacts étaient dans un ordre de**

grandeur relativement comparable à ceux observés par les études scientifiques conduites à l'étranger, et en particulier en Angleterre où une attention considérable est portée aux problématiques environnementales liées aux extractions en mer. En France, l'étendue spatiale du domaine maritime allouée à cette activité reste encore relativement modeste. Néanmoins, les impacts de l'extraction représentent une source de perturbation supplémentaire que doit supporter le milieu marin et, à ce jour, les impacts cumulés avec les autres activités sont loin d'être compris et maîtrisés.

En raison de nombreux biais méthodologiques, dépassant souvent le cadre du débat d'expert, il n'a pas été possible de dresser un inventaire complet des impacts sur les volets physiques (panache turbide, hydrodynamisme, morpho-sédimentaire, résilience dans les caractéristiques de l'habitat) et biologiques (peuplements macrobenthiques et halieutiques, résilience faunistique) pour chacun des sites choisis. Bien que des recommandations sur les méthodes à mettre en place existent (*i.e.* protocole Ifremer pour description de l'état initial et le suivi des ressources halieutiques, guide descriptif des usages halieutiques) il est indispensable de les renforcer afin de ne pas laisser libre court à leur interprétation. Les suivis les plus rigoureux étaient sans nul doute ceux qui ont été conduits dans le cadre du GIS SIEGMA. L'établissement d'une concertation entre les extracteurs et les scientifiques, par la mise en place de GIS à l'échelle de chaque façade maritime, pourrait être solution pour s'assurer (i) du respect des protocoles scientifiques lors de la réalisation des suivis environnementaux, et (ii) de la mise en place de modalités d'extractions visant à limiter l'impact de cette activité.

Dans ce cadre, nous recommandons tout d'abord d'assurer une reconduction à l'identique des protocoles expérimentaux d'un suivi à l'autre sur les différents sites, et tels qu'ils ont été définis initialement pour conserver la cohérence des jeux de données. Pour autant, à l'issue de cette analyse, quelques pistes se dévoilent pour améliorer la qualité des suivis environnementaux. Celle-ci passe par l'élaboration d'un plan de suivi des extractions de granulats marins à l'échelle nationale intégrant les différentes pressions, en cohérence avec les différentes directives européennes s'appliquant au cadre marin et en particulier avec les mesures de suivis engagées sous l'égide de la DCSMM. A terme, cette harmonisation des suivis devra permettre de travailler sur la prise en compte de l'impact cumulé des extractions et de l'ensemble des activités anthropiques en mer, qui nécessitera de se placer *a minima* à l'échelle d'un bassin biogéographique (*i.e.* manche orientale, ou échelle géographique supérieure). Enfin, d'autres approches théoriques pourront être considérées, telles que l'étude

de la fonctionnalité des espèces et des écosystèmes concernés par les activités d'extraction ou l'étude de la dynamique trophique des sites, afin de développer une approche intégrative de l'impact des activités d'extraction de granulats marins sur l'écosystème marin.

Annexes

Annexe 1. Synthèse sur l'impact de l'extraction de granulats marins sur le site du Pilier

Cette synthèse se base essentiellement sur les **deuxième (2005-2009) et troisième (2009-2014) bilans quinquennaux de l'exploitation et du suivi environnemental sur le site du Pilier**. L'attention a plus particulièrement été portée sur les annexes des bilans quinquennaux, c'est-à-dire sur les rapports réalisés par les bureaux d'études mandatés pour assurer les suivis. Ceux-ci comportent quatre volets.

- Un volet **morpho-sédimentaire** constitué par :
 - o le rapport de 3 pages réalisé par CREOCEAN en 2006 et intitulé « Evolution des turbidités dans le panache des eaux de surverse au cours d'un dragage réalisé par le navire André L » ;
 - o le rapport de 8 pages réalisé par CREOCEAN en 2010 et intitulé « Suivi turbide du Navire "Michel DSR" en extraction sur le gisement du Pilier » ;
 - o le rapport de 70 pages réalisé par ACRI-HE intitulé « Etude bathymétrique et sédimentologique - Bilan quinquennal 2014 - Zone d'extraction de la concession du Pilier ».
- Un volet **hydrodynamique** constitué par :
 - o le rapport de 30 pages réalisé par ARTELIA (bilan quinquennal 2010-2014) et intitulé « Impact sur les houles lié à un surcreusement sur le site d'extraction de sables du Pilier - Rapport d'étude » ;
 - o le rapport de 32 pages réalisé en 2010 par SOGREAH et intitulé « Expertise sur l'impact de l'extraction de sables sur les plages de Noirmoutier - Analyse bibliographique et recommandations sur les études complémentaires à la mer - Etudes complémentaire⁷ ».
- Un volet sur la **macrofaune benthique** constitué par le rapport de 50 pages réalisé par Bio-littoral et intitulé « Extraction de granulats - suivi bio-sédimentaire - Bilan quinquennal 2014 ».
- Un volet sur les **ressources halieutiques** constitué par

⁷ L'Ifremer ne dispose pas des compétences nécessaires pour évaluer la méthodologie mise en place. Les résultats sont présentés tels quels. Ils ne feront pas l'objet d'une discussion approfondie dans le livrable final.

- Le rapport de 56 pages réalisé par l’Ifremer en 2006 et intitulé « Ressources halieutiques et granulats marins : les sites du Grand Charpentier et du Pilier dans l’estuaire externe de la Loire. Rapport d’étude ».
- le rapport de 35 pages réalisé en 2013 par le Comité Régional des Pêches et des Elevages Marins des Pays de Loire (COREPEM ; Prioul et al 2013) et intitulé « Quinquennal du suivi de l’évolution du site d’exploitation de granulats marins du Pilier - Partie halieutique ».

Les **avis formulés par l’Ifremer** sur les deuxième et troisième bilans quinquennaux ont également été analysés pour la présente synthèse.

1. Caractéristiques du site d’extraction du Pilier

La concession du Pilier est située dans l’alignement de l’estuaire de la Loire, à 4.5 miles (8.3km) au Sud-Ouest de la Pointe Saint-Gildas et à 4.5 miles au Nord-Ouest de l’île de Noirmoutier. Ce site est représentatif d’un milieu dit « **d’énergie modérée** », avec un courant de marée dont l’intensité est équivalente à $0.5-0.6 \text{ m.s}^{-1}$ en marée moyenne, et à $0.8-0.9 \text{ m.s}^{-1}$ en marée de vive-eau exceptionnelle. La profondeur était initialement comprise entre 14 et 19 m C.M. Elle dépasse aujourd’hui localement les 28 m C.M. en raison de l’extraction de granulats.

Le gisement se compose de **sables et de graviers** dont l’épaisseur exploitable est comprise entre 7 et 12 m (moyenne de 9.5 m). Le volume de tout venant est estimé à 70 millions de m^3 (exploité à 45% à la fin de 2014). Les granulats du site du Pilier sont exploités depuis plus de 20 ans. L’exploitation a débuté en 1988 sous la forme d’un permis d’exploitation d’une surface de 2 km^2 . Depuis 1998, elle est régie par l’attribution d’une concession de 20 ans portant sur une superficie de 8.2 km^2 . L’indicateur de pression fournit dans le troisième bilan quinquennal (2010-2014) indique que l’intensité de dragage est « moyenne » (**$2.28-5.36 \text{ h.ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ selon les années** et à l’échelle de la concession). Toutefois, l’effort de dragage n’étant pas distribué de manière homogène au sein de la concession, l’intensité de dragage peut être localement plus élevée. Ainsi, et comme formulé dans l’évaluation du troisième bilan quinquennal par l’Ifremer, « *le même calcul aurait pu être rapporté à la surface réellement soumise à l’extraction ou encore calculé de manière à ressortir un zonage de l’intensité* ».

La pêche professionnelle est interdite à l’intérieur de la zone d’extraction.

Le site est inclut dans une zone Natura 2000 depuis 2007.

2. Résumé des impacts constatés

2.1. Volet morpho-sédimentaire

Génération d'un panache

Les mesures de turbidité et de matière en suspension (MES) générées par deux cargos de la flottille sablière suggèrent que l'extraction de granulats entraîne la formation d'un panache turbide, via les eaux de surverse et de déverse. Les concentrations en MES peuvent être relativement élevées par rapport aux niveaux naturels (jusqu'à quatre fois supérieures). Cependant, le panache turbide serait essentiellement restreint en surface et / ou en sub-surface, les valeurs mesurées à proximité du fond étaient relativement faibles et proches des niveaux naturels. **Le panache turbide aurait une durée de vie limitée et s'estomperait relativement rapidement après l'arrêt du dragage.**

En 2014, trois stations ont été échantillonnées dans l'axe des courants dominants, afin de déterminer l'impact lié au dépôt du panache turbide, en dehors du périmètre de la concession. L'analyse de leurs caractéristiques sédimentaire n'a pas révélé de gradient d'enrichissement en particules fines, ni de gradient dans le taux de matière organique. Seule une station, située au voisinage immédiat de la concession, montrait un envasement marqué (faciès sédimentaire de vase « pure ») et un léger enrichissement en matière organique. Cependant l'absence de données antérieures à 2014 ne permet pas de déterminer si les caractéristiques de cette station résultent du dépôt du panache turbide. **Quoiqu'il en soit, l'impact lié au panache turbide semble très limité et restreint au périmètre de la concession et/ou à son voisinage immédiat.**

Modification de la topographie

Dans la concession, les levés bathymétriques ont révélé de **profonds changements dans la topographie du fond marin** en lien avec l'activité d'extraction. Ces changements se caractérisent par la formation d'une **souille** (dont la profondeur peut atteindre jusqu'à 7 m par rapport au niveau moyen du fond). Celle-ci pourrait, selon le rapport du COREPEM, être impropre au chalutage et donc, limiter l'accès des pêcheurs à cette zone dans le cas où ils seraient autorisés à pratiquer après l'arrêt de l'activité d'extraction. La souille est bordée d'un côté par un « mur » aux pentes raides et, de l'autre, par un « **corridor** » remontant en pente douce jusqu'au niveau moyen du fond marin. Les images sonar ont également mis en

évidence des modifications de la topographie due aux **sillons** générés par les becs d'élindes, à la surface du sédiment.

Des zones d'érosion situées hors de la concession ont également été mises en évidence. L'avis formulé par l'Ifremer, indique que, faute de comparaison avec les suivis antérieurs à 2009 il n'est pas possible **d'exclure que ces érosions soient le fruit d'une amplification des courants en lien avec le creusement de la souille**. Des éléments complémentaires apportés par le bureau d'étude mandaté par l'extracteur permettent en partie d'écarter cette hypothèse (et de conclure au rôle joué par la dynamique sédimentaire naturelle).

Modification de la nature des fonds

De manière générale, il semble, au regard de la granulométrie des stations, que la concession présente un sédiment plus fin que dans les zones adjacentes, non-draguées. Ce patron semblait également ressortir de l'analyse à long terme (1999-2014) avec une tendance à la diminution de la taille des grains sur la concession, au cours du temps. En revanche, la granulométrie des stations non-draguées ne montrait pas de tendance claire. **L'extraction de granulats marins pourrait donc conduire à un affinement des sédiments de surface sur la concession**. L'absence de tests statistiques ne permet toutefois pas de conclure de manière formelle.

2.2. Volet hydrodynamique

Un modèle de houle simulant l'effet de différents scénarios de creusement sur la propagation des vagues prédit qu'un surcreusement compris entre 26 m C.M. (seuil fixé par arrêté préfectoral fixant les modalités d'extraction) et 30 m C.M. aurait un **impact relativement faible sur le régime de houle** (± 1 à 3% d'agitation supplémentaire par rapport à l'état de référence). De plus, cet impact serait **très localisé** et principalement cantonné à la zone d'exploitation. Par conséquent, **la souille d'extraction ne devrait pas affecter la dynamique sédimentaire du littoral de Noirmoutier**, au moins tant que la profondeur de la souille est inférieure à 30 m C.M.

Un modèle de dynamique sédimentaire tend vers les mêmes conclusions. Il suggère que la concession du Pilier n'a pas d'influence directe sur le littoral Nord de Noirmoutier *via* une diminution du stock sédimentaire alimentant les plages. **L'extraction sur le site du Pilier ne serait pas responsable des déficits sédimentaires observés sur les plages de Noirmoutier** au cours des dernières années.

2.3. Volet sur la macrofaune benthique

Les suivis de la macrofaune benthique montrent que l'extraction de granulats a un **effet négatif sur la richesse spécifique** et la **densité** benthique du Pilier avec des valeurs 25% et 37% plus faibles sur la concession par rapport aux zones non-draguées. Cependant, **les différences constatées sont inférieures à celles observées dans un certain nombre de publications scientifiques relatives à d'autres sites** (de l'ordre de 30-80% pour la richesse spécifique et de 40-90% pour la densité ; Boyd et al., 2005, 2004; Cooper et al., 2011; Desprez, 2000; Newell et al., 2004, 1998). En raison des différences dans les protocoles utilisés (puissance d'échantillonnage et précision taxonomique différentes), il n'est pas possible de comparer les données acquises en 2004-2014 avec celles obtenues en 1998-2002. Il est donc impossible de conclure sur les effets à long terme de l'extraction sur le site du Pilier.

L'extraction de granulats **modifie également l'identité des espèces et en particulier des espèces dominantes** avec, par exemple, le remplacement du bivalve *Spisula solida* par le bivalve *Abra alba*. En effet, *S. solida* qui caractérisait historiquement le site du Pilier (Glemarec, 1969) montrait en 2014 une densité plus élevée dans les zones non-exploitées que dans la concession. *A. alba* présentait un patron inverse avec des valeurs plus élevées dans la concession, en particulier depuis 2002. Ce résultat est cohérent avec certaines études montrant que les zones d'extraction sont caractérisées par des **espèces opportunistes capables de recoloniser rapidement le milieu après une perturbation** (Cooper et al., 2007b; Newell et al., 2004; Ware et al., 2009). De plus, comme cela a également été mis en évidence par de nombreux auteurs (Boyd et al., 2005; Cooper et al., 2011; Desprez, 2000; Desprez et al., 2010; Froján et al., 2011; Hussin et al., 2012; Newell et al., 2004; Robinson et al., 2005), **les modifications dans l'identité des espèces pourraient être le fruit des changements dans la nature des fonds induits par l'extraction de granulats marins**. En effet *S. solida* préfère les fonds sableux et/ou relativement grossiers alors que *A. alba* affectionne les milieux envasés. Toutefois, l'absence de tests ne permet pas de conclure d'un point de vue statistique. Comme suggéré par l'Ifremer lors de l'évaluation du troisième bilan quinquennal, l'analyse des similarités/dissimilarités entre stations et/ou entre périodes d'échantillonnage, *via* des MDS (multi-dimensional scaling) basées sur les distances de Bray-Curtis (avec et sans les

espèces de substrat dur) aurait été pertinente. Ce type d'analyse permettrait d'identifier rapidement et facilement les principaux changements faunistiques.

2.4. Volet sur les ressources halieutiques

Les analyses réalisées en 2006 par l'Ifremer ont mis en évidence que la concession du Pilier n'est pas considérée comme un habitat essentiel et n'est pas une nourricerie caractérisée. Les chalutages expérimentaux réalisés par la COREPEM ont montré que **la richesse spécifique, la densité et la biomasse du peuplement halieutique présentaient des valeurs, qui, en moyenne, étaient significativement plus élevées dans la concession que dans les zones non-draguées. L'identité des espèces ne semblait pas fondamentalement différente entre la zone de dragage et les zones non-exploitées** car environ 60% des espèces ont été retrouvées dans les deux zones. Les **espèces benthiques** (araignée, carrelet, congre, sole, tourteau) et **démersales** (merlan, seiche, tacaud) présentaient généralement les abondances les plus élevées à l'intérieur de la concession. Certaines espèces pélagiques (chinchard, maquereau, encornet, mullet blanc) exhibaient un patron inverse. La comparaison présentée par la COREPEM entre différentes données acquises en 1976-1980⁸ et 2006⁹ avec les données acquises en 2012-2013 (COREPEM) suggère que l'identité des espèces et leur distribution au sein du peuplement ichtyologique est relativement stable entre les suivis.

Cependant, lors de l'évaluation du troisième bilan quinquennal, l'Ifremer soulignait la **difficulté de comparer les résultats de 2012-2013 avec les résultats acquis lors des campagnes précédentes** en raison d'un maillage différent de la poche intérieure du chalut utilisé (essentiellement destiné à évaluer les pertes commerciales directes des professionnels et non pas à suivre l'évolution du milieu halieutique qui comprend aussi les juvéniles). De plus, il est difficile de comparer les différents suivis car les campagnes n'ont pas toujours été réalisées à la même saison. D'autres limites sont également évoquées par les experts de l'Ifremer (*e.g.* absence de tests statistiques permettant de valider les hypothèses, puissance d'échantillonnage différente entre la concession et les zones voisines, pas d'information sur la

⁸ « Effets de l'exploitation des granulats marins sur les activités halieutiques » - ISTPM – 1980

⁹ Désauney Y. et al. (2006) – Ressources halieutiques et granulats marins : les sites du Grand Charpentier et du Pilier dans l'estuaire externe de la Loire. Rapport d'étude – Convention n°06/5 210 566 F. 56p.

taille des poissons, etc...). Par conséquent, il est difficile de tirer des conclusions formelles sur l'impact de l'activité minière sur le peuplement halieutique.

3. Conclusions

Méthodologie

De manière générale, les suivis environnementaux réalisés sur le site du Pilier reposent sur une démarche scientifique solide, hormis pour le volet halieutique. Les remarques formulées par l'Ifremer lors de l'évaluation des bilans quinquennaux antérieurs à 2009 ont été prises en compte. Les nouvelles stations échantillonnées en 2014 dans le but de déterminer l'impact lié au panache turbide doivent être conservées dans les prochains suivis. Toutefois, des améliorations restent possibles. En effet, il est important de rappeler, que, quel que soit le suivi (physique, biologique), les résultats obtenus doivent être comparés aux données historiques (autant que possible) obtenues lors des suivis précédents, sans quoi il est impossible de déterminer le rôle joué par l'extraction de celui joué par la dynamique naturelle du milieu. De plus, des tests statistiques appropriés doivent être utilisés de manière systématique afin d'exclure la possibilité que les résultats obtenus soient dus au hasard.

L'utilisation d'un indicateur de pression représente une véritable avancée dans la caractérisation de l'impact de l'activité d'extraction. Cependant, cet indice aurait mérité d'être mieux valorisé, par exemple en repositionnant les stations sur une grille d'effort de dragage de 100 m x 100 m. Cela pourrait permettre une meilleure interprétation des résultats en facilitant, par exemple, l'analyse de la corrélation entre le degré de perturbation d'une station et la pression de l'activité (niveau d'intensité).

Impact sur l'environnement physique

Les suivis environnementaux réalisés sur le site du Pilier suggèrent que l'extraction de granulats marins a un impact fort sur l'environnement physique (modification de la topographie, de la nature des fonds...). Cependant, cet impact serait essentiellement restreint au périmètre de la concession. En particulier, l'activité minière aurait peu d'impact sur le littoral voisin (Noirmoutier) générant une activité touristique importante (pour rappel, l'Ifremer n'a pas compétence dans ce domaine et sont ici reportées telles quelles les conclusions des rapports).

Comparé à ce qui a pu être mis en évidence lors d'études scientifiques (*e.g.* Birchenough et al., 2010; Hitchcock and Bell, 2004), les connaissances acquises sur la topographie du fond

marin *via* les suivis environnementaux réalisés sur le Pilier sont très superficielles et mériteraient d'être affinées. Par exemple, l'utilisation d'un sondeur mono-faisceau limite la résolution des modèles numériques de terrain. Cela empêche, entre autres, de caractériser les sillons (profondeur, largeur) ou de suivre leur comblement par des sédiments fins.

Dans le contexte d'une souille aussi profonde que celle du Pilier, et susceptible de piéger des sédiments fins, peut-on s'attendre à ce que la nature du fond retrouve ces caractéristiques initiales après l'arrêt de l'activité d'extraction ?

Impact sur l'environnement biologique

Les résultats des suivis biologiques suggèrent que l'extraction de granulats marins sur le site du Pilier a un impact limité sur la richesse spécifique et la densité de la macrofaune mais qu'il changerait l'identité des espèces présentes et en particulier, l'identité des espèces dominantes. Ces changements seraient liés aux modifications de la nature du fond marin. Dans ce contexte, il est peu envisageable que la communauté retrouve ses caractéristiques initiales si la nature du fond marin a subi des modifications durables qui perdureront probablement après l'arrêt des extractions. Quelles sont les conséquences des changements dans les caractéristiques du peuplement macrobenthique d'un point de vue fonctionnel ?

L'identification des effets sur la ressource halieutique reste incomplète en dépit des efforts d'échantillonnage engagés. Les études conduites ne permettent pas d'identifier les modifications du peuplement dues à l'activité d'extraction et celles entraînées par la variabilité interannuelle naturelle. En ce sens, les analyses menées manquent de rigueur. L'étendue dans le temps des effets de l'extraction n'est pas traitée. Un travail complémentaire sur le réseau trophique est suggéré pour mieux appréhender l'effet des extractions *via* les processus écologiques soutenant les populations halieutiques. Selon l'avis formulé par l'Ifremer en 2013, l'analyse de contenus stomacaux apporterait des éléments de réponse quant à l'impact des extractions sur les populations halieutiques d'un point de vue écosystémique.

Annexe 2. Synthèse sur l'impact conjugué des extractions de granulats marins sur les concessions de Chassiron B, C, D et E

La rédaction de la présente synthèse résulte de l'analyse des documents suivants :

- « **État de référence environnemental du gisement de sables et graviers siliceux de Chassiron** » (ALIDADE, 2002, 37 pages) ; Cet état de référence, englobait le permis d'exploitation de Chassiron B (pour lequel une demande de concession a abouti le 26 février 2003), la concession Chassiron C et le site Chassiron D pour lequel, à l'époque, une demande de concession était en cours d'instruction (et a été accordée le 17 avril 2002).
- « **Concession Chassiron E – Demande d'autorisation d'ouverture de travaux – Étude d'impact** » (CREOCEAN, 2007, 128 pages). Une attention particulière a été portée sur les annexes de ce document qui présentent les données originales acquises par les bureaux d'études mandatés pour assurer les suivis :
 - « **Analyse faune benthique du secteur de Chassiron – 8 stations dossier CETRA Chassiron** » (P-G. Saureau, CNRS 2006, 21 pages) ;
 - « **Concession minière Chassiron E, Ouverture des travaux – Bathymétrie et nature des fonds – Rapport de mission** » (CREOCEAN, 2006, 5 pages) ;
 - « **Concession minière Chassiron E – Dossier d'autorisation d'ouverture de travaux – Modélisation numérique des conditions hydrodynamiques et du transport sédimentaire** » (CREOCEAN, 2006, 27 pages) ;
 - « **Concession Chassiron E – Demande d'autorisation d'ouverture de travaux – Dossier d'évaluation des incidences au titre de Natura 2000** » (CREOCEA, 2007, 14 pages) ;
- « **Suivi quinquennal – État 2011 – Contrôle bathymétrique, morphosédimentaire et biosédimentaire** » (CREOCEAN, 2012, 70 pages). Ce dossier correspond au second suivi quinquennal réalisé conjointement entre les quatre concessions minières de Chassiron (B, C, D et E), conformément aux recommandations exprimées par l'Ifremer dans son avis du 29 août 2003. Un premier suivi conjoint, datant de 2006 et qui englobait les quatre

concessions, a dû être réalisé mais l’Ifremer, n’ayant pas été consulté sur ce dossier, n’a pas en sa possession le rapport d’étude.

Les avis formulés par l’Ifremer sur chacun des dossiers précédemment cités ont également été consultés. Ils sont rappelés à propos, afin de moduler les conclusions des bureaux d’études ou bien lorsque les experts de l’Ifremer ont soulevé des biais méthodologiques susceptibles d’influencer les résultats.

1. Caractéristiques des sites d’extraction de Chassiron

1.1. Caractéristiques environnementales

Les sites d’extraction de Chassiron sont situés dans les Pertuis Charentais, au nord-ouest de l’île d’Oléron (environ 11 km de la pointe de Chassiron) et au sud-ouest de l’île de Ré (environ 11 km du phare des Baleines). Les sites d’extraction sont localisés sur des fonds marins compris entre -16 et - 25 m de profondeur C.M. Ils sont caractérisés par des sables fins à moyens, reposant sur des sables grossiers et des graviers (observés sous forme d’affleurements et de sillons). Les courants sont d’intensité modérée, avec une vitesse maximale de 0,6-0,7 m.s⁻¹.

Les Pertuis Charentais sont classés site Natura 2000 au titre de Site d’Intérêt Communautaire (première publication au journal officiel de l’Union Européenne du 7 décembre 2004) et d’une **Zone Spéciale de Conservation (arrêté du 21 octobre 2014)**. Les Pertuis sont **fréquentés par des** mammifères marins (phoque gris, grand dauphin, marsouin...), trois espèces de poissons amphidromes (lamproie marine, grande alose et alose feinte) et des tortues (tortue Luth, tortue de Kemp et tortue Caouanne).

1.2. Caractéristiques de l’activité minière

Historique de l’activité

Ce secteur d’extraction regroupe quatre concessions minières (Chassiron B, C, D et E) dont la surface cumulée atteint 7,68 km². Le volume cumulé maximal autorisé à l’extraction a été fixé à 1472000 m³ par an.

La concession Chassiron B a été accordée pour une durée de 20 ans aux sociétés DTM et Granulats Ouest, par décret ministériel du 26 février 2003. Cette concession représente une superficie de 1,33 km².

La concession Chassiron C a été accordée pour une durée de 15 ans aux sociétés Compagnie Armoricaine de Navigation (CAN) et Rambaud Carrières, par décret ministériel du 4 octobre 1999. Sa surface est de 1,35 km².

La concession Chassiron D occupe une surface de 3 km² et a été délivrée à la compagnie GSM pour une durée de 20 ans, par décret ministériel du 17 avril 2002.

Sur les concessions B, C et D, le volume de granulats autorisé à l'extraction, pour chacune d'elle, a été fixé à 330000 m³ par an, via les arrêtés préfectoraux du 6 novembre 2003 (Chassiron B et Chassiron D) et du 21 décembre 2000 (Chassiron C).

La concession Chassiron E représente une surface de 2 km² et a été accordée à la société CETRA, pour 30 ans, par décret ministériel du 24 Juillet 2006. Sur cette concession, le volume autorisé à l'extraction a été fixé à 482000 m³ par an (arrêté préfectoral du 25 février 2009).

2. Impacts sur le volet morpho-sédimentaire

Modification de la topographie

Le levé bathymétrique de 2011 a révélé la présence de souilles d'extraction sur les concessions B, C et D. Une pente maximale d'environ 2 degrés a été observée sur la concession B. Cependant, aucune valeur de creusement n'a été fournie dans le suivi quinquennal de 2011. Des traces de sillons de dragage, pouvant atteindre plus de 20 cm de profondeur, ont été observées dans chaque concession (y compris sur la concession E où aucune souille n'a été détectée).

La comparaison entre les levés de 2006 et de 2011 a montré que, de manière générale, la morphologie du fond marin avait peu évolué en 5 ans, hormis dans les concessions B, C et D. Cependant, l'Ifremer (avis du 11 mai 2012), regrettait que la comparaison entre les levés de 2006 et de 2011 soit aussi peu détaillée et préconisait de resserrer les profils des levés afin d'affiner le différentiel bathymétrique par krigeage.

Modification de la nature des fonds

Les analyses réalisées en 2011, basées sur l'interprétation de mosaïques sonars et validées à l'aide de prélèvements sédimentaires, ont révélé la présence de graviers au centre des concessions B et C. Ce faciès sédimentaire correspond au niveau sédimentaire situé directement sous la couche de surface composée de sables fins à moyens. Il est donc très probable que cette couche ait été mise à l'affleurement par l'activité d'extraction. Sur la

concession D, le sédiment était composé de sables fins à moyens et, dans une moindre mesure, de sables grossiers. La concession E présentait des sables fins à moyens. Cependant, selon les experts de l’Ifremer (avis du 11 mai 2012), « *la localisation des prélèvements bio-sédimentaires n’est pas très adaptée pour l’étalonnage des faciès acoustiques. Les zones qui présentent de fortes variabilités au sonar à balayage latéral n’ont pas été échantillonnées, comme le faciès acoustique à graviers* ».

La comparaison entre les analyses granulométriques des suivis 2006 et 2011 a mis en évidence une forte similitude entre les stations échantillonnées. Seule une station, située sur la concession D présentait un taux de sable plus important en 2011 (62,89%) par rapport à 2006 (21,58%). Trois stations situées hors de la concession montraient une diminution du taux de sables fins entre les deux suivis et une augmentation du taux de sables moyens à grossiers.

3. Impact sur le volet hydrodynamique

En 2006, l’influence du creusement au sein de la concession E sur les conditions de courant et d’agitation a été étudiée par le biais de la modélisation. Plusieurs scénarios météorologiques et de marées ont été simulés et différents scénarios de creusement ont été testés par rapport au niveau moyen du fond marin, correspondant aux mesures bathymétriques réalisées en 2006. Le premier scénario de creusement considérait un fond uniformément abaissé jusqu’à une profondeur de 20,5 m C.M. et le deuxième scénario, un creusement jusqu’à -23,5 m C.M. (correspondant à un abaissement de 5 m par rapport au niveau moyen du fond marin). Enfin, le troisième scénario correspondait à un creusement jusqu’à -27 m C.M. et un approfondissement de 8,5 m par rapport au niveau moyen du fond.

Le modèle prédisait une légère diminution de la vitesse des courants au niveau de la souille d’extraction et une légère augmentation de la vitesse des courants à ses abords. Ces modifications représentaient moins de 10% de la vitesse des courants actuels, excepté lorsque le surcreusement atteignait 8,5 m par rapport au niveau moyen du fond (troisième scénario de creusement). Dans ce cas, la diminution de l’intensité des courants au niveau de la souille atteignait 15-20% de la vitesse des courants actuels (diminution de 0,1-0,5 m.s⁻¹). Quel que soit le scénario, l’impact du creusement sur les courants était essentiellement restreint au périmètre de la concession. Les modifications de l’intensité des courants au niveau des côtes du Pertuis d’Antioche, de l’île de Ré et de l’île d’Oléron étaient considérées comme négligeables (<10%).

Les modifications de la hauteur de la houle par le creusement de la concession étaient inférieures à 10% par rapports aux valeurs actuelles. Seules des houles d'une hauteur exceptionnelle, observées à une fréquence annuelle, pouvaient entraîner des modifications supérieures à 10%. Ces modifications correspondaient à une diminution de l'agitation au niveau de la souille (diminution > 0,6 m). Les modifications d'agitation aux niveaux des côtes adjacentes sont observées lorsqu'une houle longue (d'occurrence annuelle) est imposée au large. Elles restaient toutefois inférieures à 5% (< 0,15 m) par rapport aux valeurs actuelles.

La modélisation des courants et des conditions d'agitations a ensuite été utilisée pour modéliser le transport sédimentaire. En accord avec ce qui a été précédemment énoncé, la modification du transport sableux par le creusement d'une souille était faible et limitée à la zone d'extraction ou à ses abords proches.

Sur ce dossier, l'Ifremer (avis du 1^{er} Mars 2008) regrettait seulement « *que les volumes extraits correspondant aux 3 scenarii ne soient pas fournis, et comparés aux prévisions d'extraction sur la zone. Notons que pour le seul périmètre « Chassiron E », le volume maximal exploité sur la durée de la concession est de 14 000 000 m³ sur une surface de 2 km², ce qui correspond à un surcreusement moyen de 7 m. Il semblerait donc que le scénario 3 se rapprocherait au mieux de la situation en fin d'exploitation de la concession* ».

4. Impact sur les peuplements macrobenthiques

La comparaison entre les suivis de 2006 et 2011 a mis en évidence une augmentation de la richesse spécifique et des abondances au cours du temps. Ainsi, la richesse spécifique était passée de 98 espèces en 2006 à 121 espèces en 2011. Les abondances ont augmenté de 170-568 ind.m⁻² en 2006 à 606-2926 ind.m⁻² en 2011. Il semble, au regard des données fournies dans le dossier de suivi environnemental de 2012, que ces différences étaient dues à un plus grand nombre d'individus juvéniles en 2011 (oursin irrégulier *Echinocardium cordatum* et bivalve *Macra stultorum*), du fait d'une période de recrutement plus précoce qu'en 2006. Par conséquent, les auteurs du suivi quinquennal de 2011 avaient conclu que « *les extractions n'ont pas impacté les peuplements benthiques situés de part et d'autre des concessions accordées* ». Leurs conclusions étaient renforcées par l'utilisation de l'indice M-AMBI qui qualifiait la qualité écologique des stations prospectées de « *bonne à très bonne* ».

Il convient toutefois de rester très prudent quant à ces conclusions, probablement hâtives. Les auteurs du suivi quinquennal de 2011 indiquaient « *il est vraisemblable que le soin apporté au tri sous binoculaire en 2011 ait permis de récolter plus de petites espèces, en particulier des*

crustacés amphipodes et annélides ». Or, comme exprimé par les experts de l’Ifremer lors de l’avis du 11 mai 2012, « ces deux groupes représentent jusqu’à 80% des espèces. Il est difficile, dans ce cas, de comparer objectivement des résultats obtenus de deux manières différentes et d’en tirer des conclusions ». L’abondance à elle seule n’est de plus pas informative : son augmentation peut être due à une explosion d’espèces opportunistes, reflétant une dégradation du milieu. Il est donc capital d’étudier la variation de la composition faunistique des communautés en place. L’indicateur M-AMBI utilisé pour qualifier l’état des communautés benthiques repose sur l’hypothèse d’un enrichissement en matière organique des sédiments. Or, les affleurements de graviers mis à jour par l’extraction sont peu propices à la rétention de la matière organique. Dans ce cas, on ne peut donc conclure, après utilisation de cet indice inadapté, qu’à un bon, voire très bon état écologique. Il est de surcroît préconisé d’utiliser cet indice à partir de 50 stations alors que seules 11 stations ont été échantillonnées sur le secteur de Chassiron. Enfin, selon les experts de l’Ifremer, le choix des stations était peu pertinent car aucune station n’était véritablement localisée dans une zone draguée. En effet, sur les 11 stations échantillonnées, 9 stations étaient situées hors des concessions. Elles peuvent donc être considérées comme des stations « témoins » (non-draguées). Les 2 stations restantes étaient localisées dans la concession D, sur laquelle la pression extractive a été, à ce jour, la moins importante, comme le montre les levés et différentiels bathymétriques.

5. Incidence sur les sites Natura 2000

L’étude d’incidence sur le site Natura 2000 dans lequel le périmètre d’extraction est inclus a été réalisée en 2007 pour la concession E. Cette étude d’incidence repose sur une analyse purement bibliographique. Par conséquent, les principales conclusions sont données à titre indicatif. Elles suggèrent que :

- l’incidence d’ordre trophique est relativement limitée, le suivi de 2006 n’ayant pas montré d’impact sur le compartiment macrobenthique (propos qu’il convient de nuancer vu les remarques formulées dans l’avis Ifremer du 11 mai 2012) ;
- la gêne occasionnée pour les mammifères marins et les reptiles est réelle mais limitée en raison du nombre réduit de ces organismes et de leur présence occasionnelle à proximité du site d’extraction ;
- l’incidence sur les phases biologiques sensibles (reproduction, phase larvaire, nourricerie) des aloses et de la lamproie marine ne sera pas significative.

6. Conclusion

L'effort entrepris pour suivre les quatre concessions du site de Chassiron, de manière conjointe a été reconnu et souligné par l'Ifremer, qui avait encouragé cette initiative : « *Il doit être poursuivi et maintenu, l'Ifremer considérant l'ensemble comme un site unique d'exploitation de matériaux et ne l'examinera qu'ainsi désormais* » (avis du 11 mai 2012). En raison du caractère récent du suivi conjoint, il n'est pas possible, *de facto*, d'avoir une idée de l'évolution à long terme de l'environnement sur le site de Chassiron. Contrairement aux suivis réalisés de manière indépendante pour chaque site, certains volets environnementaux (dynamique du panache turbide, volet hydrodynamique, suivi halieutique) restent encore à étudier de manière conjointe entre les quatre concessions.

Malgré cela, il aurait été possible d'étudier l'effet de l'extraction en comparant les variables environnementales (*e.g.* granulométrie, paramètres biologiques...) entre les zones exploitées et adjacentes (non-draguées), au moyen d'analyses statistiques. Cette démarche n'ayant pas été réalisée, Il est difficile au regard des suivis analysés pour la rédaction de la présente synthèse d'avoir un aperçu (même à court terme) de l'impact de l'extraction sur l'environnement de Chassiron. De nombreuses questions demeurent :

- Quelle est la distance de dispersion du panache turbide et quel est son impact (i) sur la nature du fond marin, (ii) les peuplements benthiques et (iii) les peuplements halieutiques ?
- Quel est l'impact de l'extraction sur les peuplements benthiques et halieutiques ? Par quel ratio les paramètres biologiques sont-ils réduits sur la concession par rapport aux zones adjacentes ? Quelles sont les espèces favorisées / défavorisées par l'extraction ?
- Quel est le temps de résilience des souilles d'extraction, de la nature du fond marin et des peuplements benthiques et halieutiques ?

Aujourd'hui, les stratégies d'échantillonnages mises en place sur les sites d'extraction de Chassiron ne permettent pas de répondre à ces questions. En effet, trop peu de stations sont situées à l'intérieur des concessions, ce qui ne permet pas de tester statistiquement l'hypothèse d'un impact de l'extraction sur l'environnement de Chassiron, ni d'étudier la résilience environnementale, à l'issue de l'exploitation de ce site. Ainsi, **une refonte des stratégies d'échantillonnage est à prévoir sur les sites de Chassiron**. Les auteurs des prochains suivis devront s'appuyer sur des cartes de distribution de l'intensité de dragage,

comme cela est couramment réalisé en Angleterre (*e.g.* Boyd et al., 2005; Cooper et al., 2007b, 2008). Des zones fortement draguées, des zones peu draguées et des zones non-exploitées devront ainsi être identifiées. Des stations devront également être ajoutées hors des périmètres d'extraction et dans l'axe des courants dominant (Est-Ouest) afin d'étudier l'impact potentiel du panache turbide. Enfin, les caractéristiques environnementales de ces zones devront être comparées, au moyen de tests statistiques appropriés.

Annexe 3. Synthèse sur l'impact de l'extraction de granulats marins sur le site des Duons

La présente synthèse se base sur l'analyse des documents suivants :

- a. « **Étude d'impact de l'exploitation du gisement de sables calcaires des Duons – Baie de Morlaix, Finistère** » (ASTERIE, 220 pages, 2007). Cette étude représente le premier « état de référence » sur le site des Duons ;
- b. « **Étude d'impact de l'exploitation du gisement de sables calcaires des Duons – Baie de Morlaix, Finistère – Note complémentaire – Décembre 2008** » (Astérie, 46 pages, 2008) ;
- c. « **Étude d'impact de l'exploitation du gisement de sables calcaires des Duons – Baie de Morlaix, Finistère – 2^{ème} Note complémentaire – Janvier 2009** » (Astérie, 32 pages, 2009) ;
- d. « **Étude hydro-sédimentaire sur le site des Duons** » (SAFEGE, 100 pages, 2009) ;
- e. « **Extraction de granulats : site des Duons – Analyse benthique** » (Hémisphère sub, 23 pages, 2009. Etude réalisée pour le compte du bureau d'étude Astérie) ;
- f. « **Demande de concession minière, d'autorisation domaniale et d'autorisation d'ouverture de travaux – Gisement des Duons – Evaluation des incidences Natura 2000 en mer** » (Astérie, 73 pages, 2009) ;
- g. « **Suivi environnemental du gisement des Duons – Cartographie morpho-sédimentaire, inventaire benthique et suivi de la turbidité** » (Hemisphere sub, 75 pages, 2012) ;
- h. « **Mémoire de fin de travaux partiels sur le gisement des Duons** » (Hemisphere sub, 57 pages, 2013) ;
- i. « **Variabilité spatio-temporelle d'une communauté macrobenthique de sables fins exposée à une extraction de granulats** » (C. Poitrimol, E. Thiebaut, C. Houbin, rapport de stage de master 1, 5 pages, 2017).

Les rapports préalablement cités traitent principalement des études morpho-sédimentaires et de la faune benthique réalisées sur le site. Ils intègrent également une étude d'incidence sur le site Natura 2000 en mer, qui englobe le périmètre exploité. Les suivis environnementaux ne présentent pas d'étude halieutique *sensu stricto*, mais s'appuient essentiellement sur une

analyse bibliographique. L'ensemble des avis formulés par l'Ifremer a été pris en compte dans la rédaction de cette synthèse.

1. Caractéristiques du site d'extraction des Duons

1.1. Caractéristiques environnementales

Le site des Duons est situé au centre de la baie de Morlaix, à une profondeur comprise entre 11 et 29 m C.M. Il est localisé entre la pointe de Primel (à 4 km) et la pointe de Carantec (à 5 km). Les courants de marée maximums (pour une marée de coefficient 80) oscillent aux alentours de 0,5-0,6 m.s⁻¹. Le plateau des Duons protège partiellement le site d'extraction des houles venant du large.

L'extraction de granulats marins est focalisée sur la dune hydraulique de la Pierre Noire ou « dune du Rater ». Celle-ci est composée de sables moyens à fins, calcaires (« trez »), dans lesquels la fraction fine est quasiment absente. Le volume de la dune est estimé à 115 millions de m³ (Ifremer, 1990). Ce sable est essentiellement destiné à l'amendement des terres agricoles et constitue un produit de substitution au maërl. Le sable extrait est principalement déchargé sur le port de Roscoff, où il est vendu en l'état.

Depuis 2008 (arrêté ministériel du 31 octobre 2008), le site d'exploitation des Duons est inclus dans une zone Natura 2000 en mer. Celle-ci englobe la baie de Morlaix qui abrite des habitats remarquables tels que des herbiers à zostères et des fonds de maërl. Par ailleurs le site est situé à 1,3 km d'une zone Natura 2000 terrestre.

1.2. Caractéristiques de l'activité minière

Historique de l'activité

La dune du Rater est exploitée depuis 1965. Le site des Duons représente donc un secteur d'extraction historique en France. L'extraction est règlementée depuis 1989 (arrêté préfectoral du 3 août 1989), *via* une autorisation d'exploitation de 5 ans. Celle-ci a été reconduite sur des durées variables, jusqu'en 2011, date à partir de laquelle la Compagnie Armoricaine de Navigation (CAN ; seule compagnie présente depuis 2000 sur le site) s'est vue octroyer une concession minière pour une durée de 25 ans (décret du 19 Juillet 2011). Une commission de suivi, d'information et de concertation a également été constituée à cette époque (arrêté préfectoral du 20 Octobre 2011). L'attribution d'une concession a mis un terme à la procédure judiciaire qui avait été engagée par les associations « Force 5 » et « Sauvegarde du Trégor » à son encontre, en raison d'un défaut de titre minier. En effet, jusqu'en 1997, les sables

calcaires étaient considérés comme des produits de la pêche. Leur prélèvement n'était donc pas régi par le code minier.

La concession représente une surface de 0,18 km². Elle recouvre partiellement les anciens périmètres d'extraction (0,12 km²), sur lesquels les travaux ont cessé en 2011. L'extraction de sable sur la concession a débuté en janvier 2012 (arrêté préfectoral du 21 Octobre 2011).

Modalités d'extraction

Jusqu'en 2004, l'extraction de sable était réalisée à point fixe (grue ou élinde fixe) et au moyen de dragues aspiratrices en marche. Depuis, seuls les dragues aspiratrices en marche opèrent sur le site.

L'exploitation des sables calcaires des Duons est limitée à -20 m C.M. et doit être aussi homogène que possible afin de ne pas créer de souille trop importante et permettre de maintenir une couverture sédimentaire suffisante.

Le volume de sable extrait avant 1989 n'est pas connu précisément. Entre 1990 et 1997, la quantité de matériel ponctionnée n'a cessé d'augmenter (de 7000 à 17000 m³ par an environ). Entre 1998 et 2009 (hormis l'année 2006), le volume des extractions s'approchait des quotas autorisés, soit 30000 m³ par an. La suspension de l'activité par l'arrêté préfectoral de mai 2010 a entraîné une réduction du volume extrait en 2010 et un arrêt total de l'activité en 2011 (suite au défaut de titre minier). Depuis l'attribution de la concession en janvier 2012, les quotas autorisés à l'extraction s'élèvent à 50000 m³ par an.

La pêche n'est pas interdite sur le site des Duons. Aussi, afin de limiter les conflits d'usage, une convention a été signée entre la CAN et le comité local des pêches du Nord-Finistère. Celle-ci prévoit que les extractions soient réalisées préférentiellement en hiver, l'après-midi et la nuit. Elles doivent être réduites au minimum durant les mois de juin à août inclus. Durant cette période, la CAN doit privilégier la première partie de la nuit. Enfin, il ne peut y avoir qu'un seul navire extracteur présent à la fois sur la zone d'extraction.

Les prochains paragraphes s'attachent à décrire les principaux impacts de l'extraction de sables calcaires sur l'environnement des Duons.

2. Volet morpho-sédimentaire

Dynamique du panache turbide

Dans le cadre du suivi des incidences Natura 2000, la commission de suivi, d'information et de concertation a sollicité une étude sur la turbidité générée par les dragues. Celle-ci a été réalisée en septembre 2012 pour le navire « Côte d'Armor » (principal navire opérant sur la zone).

Les mesures de matière en suspension réalisées (i) au cœur du panache turbide durant l'extraction et (ii) à proximité de la drague, 10 à 15 minutes après la fin des travaux, ont montré des concentrations maximales en surface. Cependant, les mesures réalisées dans le panache, ½ heure et 1 heure après le début de l'extraction, montraient une concentration maximale à mi-hauteur d'eau, suggérant une décantation rapide du panache de surface. Après 1h15 de suivi en dérive, les concentrations maximales étaient observées sur le fond. Enfin, des mesures réalisées 1h30 après l'arrêt du dragage montraient toujours des concentrations supérieures (jusqu'à 2.5 fois, au fond comme dans la colonne d'eau) à celles enregistrées avant les travaux ; sans que n'ait pu être mesuré le temps nécessaire pour un retour aux conditions initiales.

En parallèle des mesures de matière en suspension, des analyses ont été réalisées à l'aide d'un turbidimètre. Celles-ci ne montraient pas de véritable signal. Ce résultat est relativement surprenant dans la mesure où la turbidité est souvent fortement corrélée à la concentration de matière en suspension. L'Ifremer, dans son avis formulé en 2013, suspectait que cela soit imputable à une défaillance du turbidimètre utilisé : *« Il est hasardeux de se fier aux résultats fournis par le turbidimètre et il serait nécessaire, avant les prochaines campagnes, de s'assurer de l'étalonnage de cet instrument et d'en vérifier la fiabilité, en particulier pour la mesure de turbidité d'un mélange sableux »*. La réponse de l'exploitant (19 décembre 2013) rappelait que *« l'étude a été réalisée à titre expérimental. Le protocole mis en place a été discuté avec la station biologique de Roscoff et a été soumis pour avis à la DREAL »*.

Le modèle hydro-sédimentaire réalisé par SAFEGE en 2009 simulant différents scénarios de marée et de houle, prédit que les particules sédimentaires rejetées par les eaux de déverse se déposeraient essentiellement au niveau du périmètre d'exploitation. En surface, le panache s'estomperait rapidement après la fin du chargement, quel que soit le scénario. Cela va dans le sens des conclusions tirées des mesures de matière en suspension. Le modèle a également permis de préciser le temps de persistance du panache turbide sur le fond. En effet, cette durée

varierait autour de 24 à 70 heures, dans les conditions courantes (marée de coefficient 80 et houle d'ouest).

Le modèle suggère également que les dépôts peuvent être remis en suspension par les courants. Ils s'estomperaient alors en suivant des cycles d'engraissement et d'érosion. Cela entraînerait un export des particules hors du site d'extraction et des frontières du modèle de calcul (15,3 x 11,5 km, à peu près centré sur le site d'extraction). Dans les conditions courantes (marée de coefficient 80 et houle d'ouest), jusqu'à 54% des particules pourraient être exportées; la direction de leur transport étant conditionnée par la houle. Toutefois, les particules ne s'approcheraient pas à moins d'1 km de la cote, sauf au niveau du plateau des Duons. Par temps calme, la matière en suspension issue des eaux de déverse pourrait se maintenir pendant plus de 90 heures à proximité du fond et sur une surface d'environ 6 ha. Le panache se déplacerait au gré des courants de marée, autour du site d'extraction.

Dans les conditions testées, les dépôts maximaux obtenus sont inférieurs à 200 g.m^{-2} , ce qui peut être considéré comme faible : 70 chargements dans les mêmes conditions par an aboutiraient donc à une hauteur de dépôt total de moins de 9 mm.an^{-1} sur le site d'extraction.

Modification de la topographie

Les levés bathymétriques réalisés au cours des suivis successifs ont révélé la présence d'une souille d'extraction de 6 ha, qui scinde la dune du Rater en deux parties. Suite à la demande de l'Ifremer, un différentiel bathymétrique (note complémentaire de décembre 2008) a été réalisé entre les données acquises par le SHOM en 1931 et le levé de 2007. Celui-ci indique que la profondeur de la souille est supérieure à 5 m dans la zone centrale de l'exploitation. Elle s'estompe progressivement jusqu'à 0-1 m en périphérie du site exploité. Dans son avis du 15 avril 2013, l'Ifremer s'interrogeait sur le devenir de la dune à l'issue des 25 ans de la concession, craignant un déséquilibre du système ; les apports sédimentaires naturels ne pouvant contrebalancer les pertes de matériaux engendrées par l'extraction.

Contrairement à ce qui est souvent observé dans les études scientifiques (e.g. Birchenough et al., 2010; Hitchcock and Bell, 2004), aucun sillon généré par le passage de l'élinde n'a été observé au sonar à balayage latéral. Elle pourrait s'expliquer par le fait que les passages répétés de l'élinde, sur une surface réduite (concession de $0,18 \text{ km}^2$) conduisent à former une série de sillons accolés, puis une dépression généralisée.

Modification de la nature des fonds

Les analyses granulométriques indiquent que le faciès sédimentaire au sein de la souille reste similaire au faciès de la partie supérieure de la dune (sables fins à moyens). L'extraction n'aurait donc pas entraîné d'affleurement d'un sédiment sous-jacent de nature différente, et par conséquent, aucune modification de la nature des fonds ne serait décelable. Cependant, l'Ifremer, dans son avis formulé le 15 avril 2013, estime que « la carte de nature des fonds aurait certainement pu être plus riche en information » (échantillons sédimentaires prélevés à la drague et non à la benne ; simplification et analyse superficielle). L'Ifremer regrette également l'absence de carte de différentielle de nature des fonds et invalide la justification par le bureau d'étude de cette absence en soulignant que « *les différences d'interprétation n'interdisent pas un travail d'harmonisation par la reprise des données de 2007, qui aurait permis de fournir les éléments pour la mise en place d'éventuelles variations de la nature des fonds* ».

3. Volet hydrodynamique

Un modèle hydrodynamique simulant plusieurs scénarios de houle et de vent et considérant un arasement homogène jusqu'à -20 m C.M. a été utilisé. L'objectif était d'estimer l'impact de l'extraction sur les courants, la houle et le transport sédimentaire potentiel.

Le modèle suggère que le creusement de la dune du Rater entraîne une réduction de la vitesse du courant au niveau de la souille d'extraction. En revanche, le courant serait accéléré sur les bords de la souille du fait de la diminution des forces de frottement. Suivant les différents scénarios, le creusement modifierait la vitesse du courant de 10 à 20%, soit des fluctuations équivalentes à $\pm 5 \text{ cm.s}^{-1}$. Ces modifications seraient restreintes au périmètre de la concession et à ses abords proches (quelques centaines de mètres).

Les modifications de la houle par réfraction conduiraient à une diminution de l'agitation dans l'ombre du site d'extraction et à une augmentation de l'agitation de part et d'autre de cette ombre.

Dans les conditions courantes (marée de coefficient 80 et houle d'ouest), le modèle hydro-sédimentaire prédit que les conditions d'agitation seraient modifiées de quelques centimètres et sur des distances maximales d'environ 2 km. Dans un cas extrême (houle de 10 m au large), la souille engendrerait des variations d'agitation de plusieurs dizaines de cm à moins d'un

kilomètre du périmètre. A la côte, cela se traduirait par des variations inférieures à 10 cm, soit environ 1% de la houle incidente.

Le ralentissement des courants et l'atténuation de l'agitation au-dessus de la dépression auraient un effet sur le transport potentiel et les bilans sédimentaires. En effet, le modèle suggère que, quel que soit le scénario étudié, la souille d'extraction aurait tendance à diminuer l'intensité du transport potentiel. Cela favoriserait ainsi l'engraissement de la concession et de ses abords immédiats. Le transport potentiel serait de l'ordre de 40 à 100 t.m⁻¹.an⁻¹ lors des conditions courantes. Il pourrait dépasser 200 t.m⁻¹.an⁻¹ dans les cas extrêmes. Enfin, le bureau d'étude suggère que l'intensité du transport sédimentaire ne serait pas modifiée hors de la concession. L'avis formulé par l'Ifremer en date du 2 juillet 2013 relativise les conclusions tirées par cette étude et suggère qu'au regard de la quantité de matériel potentiellement ponctionnée par l'activité minière (quota autorisé de 50000 m³.an⁻¹ ou 80000 t.an⁻¹), il est peu probable que le dépôt de sédiment (apports évalués à 7000 m³.an⁻¹ sur la base du différentiel bathymétrique 1931-2007) contribue à combler la souille. L'Ifremer, rappelle également que « *le volume ponctionné aurait pu contribuer à une dynamique sédimentaire qui s'étend au-delà du périmètre exploité* ».

4. Evolution de la macrofaune benthique

Au cours de ses évaluations, l'Ifremer n'a eu de cesse de soulever les graves défauts d'ordre méthodologique des suivis benthiques. Parmi ceux-ci, on peut citer :

- **des protocoles différents entre les suivis.** En effet, la puissance d'échantillonnage était variable d'un suivi à l'autre. Ainsi, l'état initial réalisé en 2007 comprenait cinq stations, complétées en 2009 par cinq stations supplémentaires. A chaque fois, cinq répliqués par stations ont été réalisés. En revanche, le suivi de 2012, n'intégrait que six stations et quatre répliqués pour chacune d'elles. Seulement trois stations échantillonnées en 2012 étaient communes avec celles suivies en 2009 et une station était commune avec celles suivies en 2007. Les bennes utilisées pour prélever la macrofaune benthique ont également varié entre les suivis (benne Van Veen en 2007 ; benne Smith Mc Intyre en 2009 ; benne Day en 2012). Celles-ci ne présentent pas la même efficacité pour capturer les organismes benthiques. Les différences dans les protocoles utilisés ne permettent pas de suivre l'évolution à long terme du peuplement benthique. Il est donc impossible de différencier

l'effet de la dynamique naturelle d'un peuplement de celui qui est induit par l'extraction de granulats ;

- **des analyses de données peu pertinentes.** Les habitats ont été qualifiés à l'aide de la classification EUNIS. Cependant, cette classification est trop grossière pour permettre de suivre l'évolution du peuplement benthique. Des indicateurs ont également été calculés afin de qualifier l'état écologique du peuplement. Or, ces indicateurs reposent sur des hypothèses aberrantes telles (i) qu'un enrichissement en matière organique dans des sables exposés qui, par nature, ne retiennent pas la matière organique, ou (ii) l'assimilation de la perturbation générée par le dragage à une pollution. Enfin, à aucun moment les auteurs des suivis environnementaux n'ont testé les différences dans la structure du peuplement benthique entre le site d'extraction et les zones de références non-draguées ;
- **des identifications taxonomiques douteuses et des erreurs dans le nom des espèces.** Ceci est révélateur d'un manque de rigueur scientifique.

Au vu de l'ensemble des biais méthodologiques évoqués, l'Ifremer (15 avril 2013) indique « **qu'il est inenvisageable de réaliser un suivi dans ces conditions d'échantillonnage** ».

5. Impact sur les ressources halieutiques

Les études halieutiques sont essentiellement basées sur l'analyse bibliographique de thèses et sur un rapport de l'Ifremer (Forest, 2001)¹⁰. Cette analyse indique qu'une partie du site des Duons empiète sur une nurricerie de juvéniles de bar (*Dicentrarchus labrax*) et d'araignée (*Maja squinado*). De plus, le site d'extraction fait partie d'une très vaste zone de frayère du sprat (*Sprattus sprattus*). Il existe également un gisement de coquilles Saint-Jacques (*Pecten maximus*) en baie de Morlaix, comprenant le site d'extraction des Duons. Dans sa lettre adressée au préfet du Finistère et datée du 27 Octobre 2008, l'Ifremer soulignait que le « *secteur des Duons est capital pour la pêche au chalut à lançon car il représente la zone de traîne la plus proche et la plus productive de la baie. Le déplacement du périmètre*

¹⁰Ressources halieutiques hors quotas du Nord-Est Atlantique : bilan des connaissances et analyse de scénarios d'évolution de la gestion (Forest A., 2001, 2 volumes de 212 et 215 pages chacun).

d'exploitation vers le Nord-Est [zone de la concession] accentuera cette interaction entre les deux activités concurrentes ».

A ce jour, aucune étude testant l'hypothèse d'un impact de l'extraction de granulats sur les ressources halieutiques n'a été conduite sur le site des Duons.

6. Incidence sur les sites Natura 2000

La classification de la baie de Morlaix en tant que zone Natura 2000 était due -entre autres- à la présence d'habitats remarquables (herbiers de zostère, maërl), à une avifaune utilisant le milieu marin pour une part significative de son cycle de vie et à la présence de mammifères marins (marsouin et phoque gris). En 2009, le bureau d'étude a fourni une évaluation des incidences du site d'extraction des Duons sur les zones Natura 2000. Celle-ci suggère que :

- la destruction des habitats est restreinte à la zone exploitée, de taille relativement modeste. La sédimentation du panache turbide ne devrait pas atteindre les habitats remarquables ;
- la probabilité de collision entre les navires extracteurs et les mammifères marins est peu probable en raison de la faible surface exploitée, de la capacité de fuite des mammifères et de la faible vitesse du navire extracteur (2 nœuds) ;
- la nuisance sonore pour l'avifaune et les mammifères marins est relativement limitée grâce à la présence de silencieux d'échappement et/ou de moteurs relativement peu puissants. De plus, le temps passé sur le site est relativement faible avec une occupation annuelle maximale limitée à 1.6% du temps ;
- les oiseaux migrateurs sont susceptibles d'être impactés par la pollution lumineuse, en particulier les oiseaux migrateurs qui peuvent être désorientés par les lumières artificielles. L'étude d'incidences précise que cet impact potentiel peut être limité en aménageant les périodes d'activité en prenant en considération les périodes où l'avifaune est la plus vulnérable et/ou en utilisant des signaux lumineux de longueur d'onde moins perturbantes. Les auteurs du document estiment cependant, que si de telles mesures devaient être adoptées, elles devraient s'appliquer à l'ensemble des activités (et pas uniquement à l'extraction de granulats marins).

Les conclusions de l'étude d'incidence sont données ici à titre indicatif. En effet, elles ne reposent essentiellement que sur une analyse bibliographique et aucune étude d'impact sur l'avifaune, en particulier l'avifaune migratrice, et/ou sur les mammifères marins n'a été réalisée.

7. Conclusion

En raison de nombreux biais méthodologiques et/ou d'erreurs dans les interprétations, l'apport de connaissances sur l'impact de l'extraction de granulats marins sur le site des Duons est très restreint, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. Les remarques formulées de l'Ifremer et réitérées à chaque suivi environnemental ne semblent pas avoir été entendues.

Résumé des impacts sur l'environnement physique

L'extraction de granulats marins semble impacter l'environnement physique sur le site des Duons, notamment *via* la formation d'une souille scindant la dune du Rater en deux et modifiant les conditions de courant, d'agitation et de transport sédimentaire. A l'heure actuelle, aucun élément présenté dans les études d'impact ne permet de prédire quelle sera, à l'issue de l'extraction, la vitesse de résilience morphologique du site (comblement de la souille) et quelles seront les conséquences de l'extraction sur l'équilibre dynamique de la dune du Rater.

L'effet du panache turbide sur l'environnement n'est pas restreint à la zone d'extraction et concerne également les zones adjacentes via l'export d'une partie des dépôts. L'aire d'influence du panache ne devrait pas atteindre les littoraux, à l'exception du plateau des Duons.

Les données produites dans les suivis environnementaux ne permettent pas d'exclure de possibles effets de l'extraction sur la modification de nature du substrat.

Impact sur l'environnement biologique

Au regard des nombreux biais méthodologiques, il n'est pas possible, sur la base des rapports fournis dans le cadre de l'instruction et du suivi du site, de conclure sur l'impact de l'extraction de granulats sur le compartiment macrobenthique.

Cependant, dans le cadre du projet scientifique IMPECAPE (évaluation des impacts écologiques engendrés par pressions physiques sur les habitats benthiques : cas de la pêche et de l'extraction), des analyses préliminaires n'ont pas révélées de différences significatives dans la structure de la communauté macrobenthique entre la zone d'extraction, les zones sous influence du panache turbide et les zones situées à l'abri du panache. Ces résultats suggèrent que l'extraction de sables calcaires sur le site des Duons n'aurait pas d'impact sur la concession et sur les zones adjacentes non-draguées. Ce résultat tranche avec un grand nombre d'études scientifiques ayant mis en évidence de profonds changements dans la

structure de la communauté macrobenthique sur le site d'extraction (Boyd et al., 2005, 2004; Cooper et al., 2011; Desprez, 2000; Desprez et al., 2010; Newell et al., 2004; Robinson et al., 2005) et/ou liés au dépôt du panache turbide (Boyd and Rees, 2003; Desprez, 2000; Desprez et al., 2010; Newell et al., 2004; Robinson et al., 2005). Les auteurs de l'étude préliminaire conduite sur les Duons ont suggéré que le faible impact de l'extraction sur le site des Duons pouvait être lié (i) aux perturbations naturelles fréquentes auxquelles la communauté macrobenthique est exposée (l'effet d'une perturbation physique d'origine anthropique est généralement inversement proportionnelle à l'intensité des perturbations naturelles ; voir van Denderen et al., 2015) et (ii) au volume de sédiment relativement faible extrait chaque année. Il convient de souligner que ce site est exploité depuis 1965 et que l'état des communautés observé aux abords de la zone de concession correspond vraisemblablement à un état déjà perturbé, certainement éloigné de l'état de référence.

Les futurs suivis environnementaux devront prendre en compte le compartiment halieutique et en particulier les lançons.

Des investigations plus poussées que l'analyse portée dans le rapport d'étude d'incidence Natura 2000 en mer, notamment sur l'avifaune (riche en baie de Morlaix) pourraient être intéressantes à mener. En effet, les auteurs de l'étude d'incidence ne se prononcent pas sur l'impact de l'extraction sur l'avifaune, invoquant le fait que les perturbations provoquées sont du même ordre que celles générées par d'autres usages (avis Ifremer du 9 novembre 2009).

Vers une quantification de la perturbation générée par l'extraction

Il n'y a pas, à ce jour, d'indicateur d'intensité de dragage calculé sur le site des Duons. Ce type d'indicateur est pourtant communément employé dans les études Anglaises (Boyd et al., 2005; Cooper et al., 2007a, 2008). Il correspond au nombre d'heure de dragage par hectare et par an. Ce type d'indicateur apporterait une information précise sur la pression de l'activité d'extraction sur le site des Duons, en remplaçant l'activité dans la classification proposée par Boyd et al. (2005) (traîne extensive $<15 \text{ mn} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$; 15mn.ha⁻¹.an⁻¹ <traîne semi-intensive $<10 \text{ h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$; traîne intensive $>10 \text{ h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$).

Le projet IMPECAPE a notamment pour objectif de compléter le projet ANR (Agence Nationale de la Recherche) BenthVal pour la validation et la calibration d'un nouvel indicateur en fonction de la pression physique sur le fond et pour identifier les seuils de

dégradation des habitats benthiques. A ce titre, le site des Duons est un site expérimental de ce projet financé par l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB).

Annexe 4. Synthèse sur l'impact de l'extraction de granulats marins sur le site de la Horaine

La présente synthèse se base sur l'analyse des documents suivants :

- « **Étude d'impact de l'exploitation du gisement de sables coquilliers de la Horaine** » (Asterie, 2005, 159 pages). Il est important de préciser que, contrairement à ce qui est annoncé, ce document n'est pas une étude d'impact *sensu stricto* mais une notice d'impact ;
- « **Suivi environnemental du gisement de sables coquilliers de la Horaine – Rapport technique** » (Astérie, 2008, 65 pages) ;
- « **Demande d'autorisation d'ouverture de travaux d'exploitation – Gisement de La Horaine – Étude d'impact** » (Astérie, 2010, 189 pages). Une attention particulière a été portée aux annexes de ce dossier et notamment sur l'« **Analyse benthique La Horaine** » (Ecosub, 2010, 26 pages) et sur l'« **Étude hydrosédimentaire du banc de la Horaine – Rapport final** » (SAFEGE, 2010, 84 pages) ;
- « **Évaluation des incidences Natura 2000** » (Astérie, 2010, 68 p) ;
- « **Gisement de la Horaine – Demande d'ouverture de travaux d'exploitation – Compléments biologiques** » (Astérie, 2011, 38 pages) ;
- « **Projet de modification du périmètre d'une zone d'extraction de granulats marins sur le gisement de la Horaine – Étude de l'impact du projet sur le secteur de la pêche professionnelle – Rapport final** » (OCEANIC Développement, 2011, 24 p) ;
- « **Suivi environnemental et État de référence – Cartographie morpho-sédimentaire – Inventaires benthique et halieutique – Suivi de la turbidité** » (Hémisphère Sub – Oceanic développement, 2012, 114 pages) ;
- « **Mémoire de fin de travaux partiels sur le gisement de La Horaine** » (Hémisphère sub, 2013, 67 pages).

L'ensemble des avis formulés par les experts de l'Ifremer mandatés pour évaluer les dossiers de suivis précédemment cités, ont été consultés. Certains commentaires sont rappelés dans cette synthèse.

1. Caractéristiques du site d'extraction de la Horaine

1.1. Caractéristiques environnementales

Le site d'extraction de la Horaine est situé dans la baie de Saint Briec, au sud-est de l'île de Bréhat et au-nord-est de l'anse de Paimpol. Les courants sont relativement forts, avec une vitesse maximale comprise entre 1,5 et 1,8 m.s⁻¹.

L'activité minière est concentrée sur le banc de la Horaine, une dune hydraulique composée de sables grossiers coquilliers (« trez ») à mégarides, qui s'étend sur près de 8 km de long et 1,8 km de largeur. Ce banc repose sur un fond d'environ -30 m C.M. et, en raison de son épaisseur, remonte à des profondeurs comprises entre -7 et -20 m C.M. Les suivis morpho-sédimentaires ont révélé la quasi-absence de sables fins (granulométrie comprise entre 0,05 et 0,18 mm) et de pélites (granulométrie inférieure à 0,05mm). Ces fractions représentent moins de 1% de la masse totale du sédiment. Le sud du banc, qui n'est plus exploité depuis 2012, est caractérisé par des graviers et des galets hétérogènes.

Les sables coquilliers prélevés sur le banc de la Horaine, sont exclusivement destinés à l'amendement des terres agricoles, en substitution au maërl. Ils sont débarqués dans les ports de Roscoff, de Tréguier, de Saint-Briec, de Pontrieux et de Saint-Malo.

Le périmètre de la concession est inclus dans une vaste zone Natura 2000. Il représente 0,15% de la superficie d'un Site d'Intérêt Communautaire et 0,14% de la Zone de Protection Spéciale du Trégor-Goëlo. La zone classée Natura 2000 héberge plusieurs habitats remarquables tels que des herbiers à zostères, des bancs de maërl, des récifs et des placages d'hermelles (*Sabellaria spinulosa*). De plus, la baie de Saint-Briec est fréquentée par des mammifères marins (grand dauphin, dauphin commun, marsouin commun et phoque gris) et des oiseaux de mer nicheurs et hivernants, susceptibles de se nourrir sur le site. Enfin, les estuaires du Trieux et du Jaudy représentent des axes majeurs de migration pour le saumon Atlantique.

1.2. Caractéristiques de l'activité minière

Historique de l'activité

Le banc de la Horaine est exploité depuis 1994 par la Compagnie Armoricaine de Navigation (CAN). L'extraction était initialement réalisée sur un périmètre de 1,32km², localisé dans la

partie centrale du banc. Après reconduction jusqu'en 2010 de l'autorisation d'extraction par plusieurs arrêtés préfectoraux, la CAN a obtenu une concession pour une durée de 25 ans (décret du 25 mai 2010) ainsi qu'une autorisation d'occupation du domaine public maritime (arrêté préfectoral du 20 décembre 2010). L'autorisation d'ouverture des travaux miniers a été accordée par l'arrêté préfectoral du 20 juillet 2012. Par rapport à l'ancien site d'extraction, le nouveau périmètre de la concession (surface de 1,17 km²) a été déplacé vers le nord-ouest du banc occasionnant la mise en place d'une procédure de fermeture d'une partie (0,7 km²) de l'ancien site d'exploitation.

Modalités d'extraction

En raison du relief accidenté du banc de la Horaine, l'extraction est réalisée à point fixe et non à l'aide d'une élinde trainante.

La quantité de matériel autorisé à l'extraction a évolué au cours du temps. Ainsi, entre 1996 et 1998, les quotas ont augmenté de 20000 tonnes à 100000 tonnes par an et sont restés stables entre 1998 et 2011. A partir de 2012, sur le nouveau périmètre d'extraction, les quotas ont été fixés à 156250 tonnes par an (soit 125000 m³.an⁻¹).

De manière générale, la quantité de matériel extrait atteignait les quotas fixés, sauf en 1996, 1997 et 2002 où ils ont été dépassés.

Contrairement au site des Duons, il n'y a pas, à notre connaissance, de convention entre la CAN et le comité local des pêches, qui permettrait de limiter les conflits d'usage sur le site de la Horaine. L'impact potentiel de l'activité d'extraction sur la pêche professionnelle, et en particulier pour la pêche au chalut de fond et la drague à coquille Saint-Jacques, n'est d'ailleurs pas bien défini dans l'étude d'impact réalisée en 2010.

2. Volet morpho-sédimentaire

Impact lié au dépôt du panache turbide

En 2010, le bureau d'étude SAFEGE a utilisé un modèle hydro-sédimentaire (logiciel Seamer) pour prédire le devenir du panache turbide après la déverse (volume total des eaux de déverse fixé à 1850 m³, concentration fixée à 1 g.L⁻¹), sous différentes conditions météorologiques (définies à partir de la base de données nationale CANDHIS) et différentes conditions de marnage. Le début des extractions a été fixé entre 3 et 4 heures après la pleine mer et la bathymétrie utilisée correspondait au levé de 2010.

Les sorties du modèle suggèrent que par temps calme (coefficient de marée de 45, sans vent ni houle), environ 30% des particules décanteraient lors de l'étale de basse mer. Cependant, elles seraient remises en suspension par les courants de marée, lors du flot suivant. Par conséquent, il n'y aurait pas de risque d'accumulation sur une zone privilégiée. De plus le volume des dépôts seraient très faibles (maximum de 1 g.m^{-2} , soit une hauteur de 10^{-3} mm) et éphémères. L'élévation de la turbidité serait inférieure à $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$. Pour comparaison, la concentration naturelle de matière en suspension varie entre 1 et 10 mg.L^{-1} à l'échelle de la baie de Saint-Brieuc (source Ifremer). Les simulations par flux d'ouest (marée de 80, vent d'ouest de 10 m.s^{-1} et une houle de 2,5 m venant du nord-ouest avec une période de 12 s) et flux d'est (marée de 80, vent d'est de 10 m.s^{-1} , houle d'est de 1,5 m et d'une période de 4,5 s), conduisent à des résultats similaires.

D'un point de vue spatial, le modèle prédit que, lors des cycles de marée successifs, le panache s'étendrait sur une distance d'environ 6 à 7 km, en direction du nord mais ne s'approcherait pas à moins de 4 km de la cote. Par temps agité et dans des « conditions d'est », l'export des particules serait plus important, et une partie d'entre elles pourrait quitter les frontières du modèle de calcul (rectangle d'environ 20 km x 25 km, centré sur le périmètre d'extraction) après trois jours de simulation. Cependant, les teneurs en matière en suspension du panache qui atteignent les frontières du modèle ne seraient plus significatives car inférieures aux valeurs naturelles de turbidité.

Les données issues de la modélisation ont été en partie confirmées lors du suivi mené en 2012, par des mesures *in situ* du panache turbide *via* un suivi lagrangien. La concentration de matière en suspension enregistrée avant, pendant et après l'extraction, était inférieure à 2 mg.L^{-1} , en accord avec les résultats de la modélisation. Les auteurs du suivi de 2012 avaient suggéré que la faible turbidité enregistrée lors des opérations de dragage était peut-être le fruit (i) de mesures réalisées à côté du panache turbide si celui-ci était de taille réduite, ou alors (ii) d'une décantation rapide des particules déversées en raison de la faible teneur en particules fines. Cependant, « *pour lever le doute sur les très faibles concentrations enregistrées (réalistes vu que le sédiment de surverse est effectivement très grossier et chute très vite) il aurait été instructif d'opérer un tri granulométrique sur cette surverse* » (avis Ifremer du 18 Juillet 2013).

Seules les concentrations enregistrées 2h30 après l'arrêt du dragage dépassaient le seuil de 2 mg.L^{-1} . Elles suivaient un gradient positif vers le fond : inférieur à 2 mg.L^{-1} en surface, égal à

3,2 mg.L⁻¹ à mi-hauteur d'eau et enfin égal à 6,9 mg.L⁻¹ près du fond. Cela n'avait pas été prédit par la modélisation. Les auteurs du suivi expliquaient ces différences par le caractère local de la remise en suspension par le flot, alors que la valeur fournie par le modèle était donnée pour l'ensemble du secteur d'étude. Les experts de l'Ifremer (avis du 18 Juillet 2013) précisent que « *pour en être certain, il aurait été plus judicieux d'effectuer une mesure au point fixe à haute fréquence durant quelques marées, pour avoir une idée de la dynamique de la turbidité ambiante* ».

Modification de la topographie

Le différentiel bathymétrique entre les levés de 2008 et de 2012 montre des variations de profondeurs comprises entre -9 et +9 mètres. Celles-ci étaient essentiellement localisées dans la moitié nord du périmètre d'extraction. Chaque zone d'érosion était quasi-systématiquement associée à une zone d'accrétion, d'amplitude et de surface équivalentes. Les auteurs du suivi environnemental de 2012 avaient suggéré que ces variations étaient dues à l'évolution naturelle de la dune hydraulique sous la contrainte de la marée.

Sur l'ancien périmètre d'extraction (périmètre sud du banc), les variations présentaient des dépressions de forme circulaire de profondeurs comprises entre -1 et -5,5 mètres. Ces dépressions n'étaient toutefois pas associées à des zones d'accrétions d'amplitude et de surface équivalentes. La présence de ces dépressions circulaires sur l'ancien périmètre d'extraction atteste donc très certainement de l'effet de l'activité minière sur la morphologie des fonds marins. En effet, certaines études Anglaises (*e.g.* Boyd et al., 2004) rapportent l'existence de formes similaires dans le cas d'une extraction à point fixe, comme c'est le cas sur le site de la Horaine. Toutefois, les auteurs du suivi ont modéré ce lien probable en affirmant que « *leur surface [des zones d'érosion] ainsi que leur amplitude restent faibles au regard des différences bathymétriques observées au nord de la zone d'étude et que l'origine certaine est liée aux phénomènes naturels* ». Cet argument était relativement fallacieux. L'Ifremer, dans son avis du 18 Juillet 2013, rappelait « *que la dynamique sédimentaire, si elle affecte de plus grandes surfaces et amplitudes, ne correspond pas à une ponction du stock de sédiments qui participe à la dynamique d'un système. Il ne faut pas lier l'évolution générale naturelle à l'évolution locale sur le périmètre extrait. Minimiser l'impact de l'extraction sur la base des volumes mis en jeu n'est pas un argument recevable* ». En outre, un tel jugement de la part des auteurs du suivi de 2012 aurait mérité d'être étayé en calculant, sur la base du différentiel volumétrique entre les levés de 2008 et de 2012, le volume sédimentaire mis en

jeu par la dynamique sédimentaire naturelle et celui exploité durant la même période. Cela aurait permis de différencier la part des variations liée à la dynamique naturelle de celle imputable à l'extraction.

Enfin, il n'existe pas, à notre connaissance, de différentiel bathymétrique entre le levé de 2012 et des données historiques, ce qui ne permet pas de juger de l'évolution à long terme du banc de la Horaine.

Modification de la nature des fonds

La comparaison entre les suivis de 2003 et de 2008 suggère que la nature du fond marin a peu évolué en six ans. La répartition des sables grossiers coquilliers est restée relativement similaire entre les deux suivis. Quelques zones de sables coquilliers ont cependant été remplacées par des graviers et des galets au nord-est du périmètre exploité. Les auteurs du mémoire de fin de travaux partiels suggéraient que ces variations pouvaient être imputables à la dynamique sédimentaire naturelle et/ou aux effets de l'extraction si l'épaisseur de la strate superficielle de sables coquilliers était faible.

3. Volet hydrodynamique

La modélisation hydro-sédimentaire réalisée par SAFEGE en 2010 a également permis d'étudier l'impact du creusement du fond marin sur les courants, les conditions d'agitation, les mouvements sédimentaires et le risque d'érosion côtière. Plusieurs scénarios de marée, de vent, de houle et de creusement des fonds (situation actuelle et future, correspondant à un abaissement uniforme des profondeurs sur le périmètre d'extraction après 25 ans d'activité) ont été simulés.

Les résultats du modèle ont prédit que le creusement du banc de la Horaine aurait un impact limité sur les conditions hydrodynamiques. En effet, les modifications des courants seraient comprises entre -15 cm.s^{-1} et $+11 \text{ cm.s}^{-1}$ et les conditions d'agitation ne seraient modifiées que de quelques centimètres. De plus, les modifications de l'hydrodynamisme seraient essentiellement limitées au niveau du périmètre d'extraction et à ses abords proches. Quel que soit le scénario, l'impact de l'extraction serait négligeable sur le littoral. Le risque d'érosion côtière ne serait pas accru et la modification de la morphologie des fonds n'aurait pas d'effet direct sur le transport sédimentaire à distance.

Enfin, considérant qu'il existait trois sites d'extraction en baie de Saint-Brieuc (Horaine, Cormorandière et Lost Pic), une modélisation de l'effet cumulé de l'approfondissement des

fonds marins sur ces trois sites a été mise en œuvre sans qu'aucun effet préjudiciable n'ait pu être mis en évidence.

4. Impact sur les peuplements benthiques

Impact sur les peuplements macrobenthiques

Le suivi de 2012 montre que les paramètres biologiques de la communauté des sables moyens et grossiers coquilliers (richesse spécifique, abondance et diversité de Shannon) présentaient des valeurs comparables entre le site exploité et les stations situées en dehors du périmètre d'extraction. Un patron similaire avait été observé pour les stations relatives aux faciès de graviers sableux. Toutefois, ces conclusions doivent être considérées avec beaucoup de prudence, compte tenu du fait que les extractions sont réalisées en point fixe. Leur impact est donc potentiellement très localisé. Au regard des cartes fournies dans le suivi environnemental de 2012, il est impossible de déterminer si les échantillons benthiques ont été prélevés dans les puits d'extraction ou bien dans les zones non-exploitées.

Bien que ces résultats suggèrent un impact négligeable de l'extraction sur le peuplement macrobenthique, il est très délicat d'évaluer l'évolution à long terme du peuplement benthique (ce qui est pourtant le but d'un suivi environnemental) au regard des nombreux biais méthodologiques entre les différents suivis. En effet, l'avis des experts de l'Ifremer (18 Juillet 2013) avait soulevé :

- **Des différences dans la puissance d'échantillonnage.** En effet, cinq réplicats ont été échantillonnés par stations lors des suivis de 2010 et 2011, alors que seuls quatre réplicats ont été échantillonnés en 2012 ; ce choix n'étant d'ailleurs pas justifié. Pour rappel, l'Ifremer, dans son avis du 27 avril 2012, avait préconisé d'échantillonner dix réplicats par station ;
- **Une période d'échantillonnage différente.** En effet, le suivi de 2012 avait été réalisé au mois de septembre (période durant laquelle les abondances augmentent drastiquement suite à l'arrivée des jeunes recrues) alors que les suivis précédents avaient été réalisés en juillet ;
- **Une mauvaise fixation des échantillons biologiques.** Lors du suivi de 2010, les prélèvements benthiques n'avaient pas été formolés, ce qui avait conduit à une dégradation rapide des organismes. L'identification taxonomique s'en est trouvée fortement biaisée ce qui invalidait les résultats de ce suivi. Ainsi, et comme exprimé par

les experts de l’Ifremer, « *il est absolument inexplicable d’avoir recensé 140 espèces en 2010 et 224 en 2012 sans tenir compte de l’erreur de protocole que fut l’absence de fixation au formol en 2010* » ;

- **Une précision taxonomique différente entre les suivis.** En effet, en 2002, l’identification taxonomique s’était arrêtée au niveau de la famille alors que pour les suivis suivants (2010-2011 et 2012) l’identification avait été réalisée au niveau spécifique ;
- **L’utilisation d’indicateurs peu pertinents** comme l’indice M-AMBI destiné à qualifier l’état d’un peuplement face à un enrichissement en matière organique. Or, les sables grossiers composant le banc de la Horaine sont peu propices à la rétention de la matière organique. Les experts de l’Ifremer ont rappelé que « *ce point est souligné et répété systématiquement dans chacun de nos avis mais visiblement sans aucun effet car jamais pris en compte* ».

Lors de l’évaluation du dossier de suivi de 2012, l’Ifremer avait conclu que : « *pour être en mesure d’ajuster les modalités d’exploitation, il n’est pas acceptable de ne pouvoir disposer d’un suivi correct du milieu. Le suivi de la Horaine montre donc l’importance de la rigueur lors de l’application du protocole. Que tirer d’un suivi où les protocoles diffèrent sans cesse ?* ».

Impact sur les peuplements halieutiques

Au même titre que pour les peuplements benthiques, le suivi des ressources halieutiques réalisé en 2012 ne permet pas véritablement de juger de l’impact des extractions. Un premier résultat de ce suivi était l’absence de capture de coquilles Saint-Jacques dans le périmètre d’extraction (abondance nulle). Les auteurs du suivi suggéraient un impact indirect de l’extraction sur la coquille Saint-Jacques, *via* des modifications de l’hydrodynamisme sur la dune. Cependant, les experts en halieutique de l’Ifremer, mandatés pour évaluer ce suivi, regrettaient le manque de précision sur cet impact potentiel : « *S’agit-il d’une modification de la distribution spatiale des juvéniles et adultes de coquilles Saint-Jacques et/ ou de la fixation des larves ?* ».

Ce suivi a permis de récolter et d’identifier deux espèces de lançons sur le périmètre de la concession: le lançon commun (*Hyperoplus lanceolatus*) et le jolivet (*Hyperoplus immaculatus*). Le lançon aiguille (*Gymnammodytes semisquamatus*) a été capturé à proximité

de la concession, mais pas directement à l'intérieur du périmètre d'exploitation. Cependant, les abondances de lançons ont probablement été sous-estimées car la période choisie en 2012 (automne) pour réaliser le suivi environnemental, correspondait à la période où l'abondance de ces espèces est minimale (diminution forte entre le printemps et l'automne). Comme rappelé dans le suivi environnemental de 2012, les trois espèces de lançons capturées dans et à proximité de la concession de la Horaine ont fait l'objet de peu d'études scientifiques. En effet, la majorité des travaux se sont focalisés sur le lançon nordique (*Ammodytes marinus*) qui est exploité de manière industrielle en Mer du Nord. Il est cependant utile de préciser que les travaux de thèse de Laugier, (2015)¹¹, financés par la CAN, ont permis de mieux comprendre la relation entre les poissons côtiers, dont les lançons (*Ammodytes tobianus*, *Hyperoplus immaculatus*, *Hyperoplus lanceolatus* et *Gymnammodytes semisquamatus*) et leur habitat écologique mais ces travaux n'incluaient pas la Baie de Saint-Brieuc. La CAN finance actuellement une étude sur la dynamique de population des trois espèces de lançons présentes sur les sites de la Pointe d'Armor et de la Horaine. Sur ce dernier site, l'objectif est d'étudier la relation entre les lançons et leur habitat, la dynamique naturelle inter-annuelle des populations de lançons *via* les suivis menés en 2012 (octobre), 2014 (mai-septembre) et 2017 (mai-septembre). Enfin, et dans la mesure du possible, il est envisagé d'étudier l'impact de l'extraction sur les populations de lançons.

L'utilisation du chalut à lançon, qui n'est pas réputé pour capturer d'autres espèces de manière efficace, a conduit à des captures anecdotiques des espèces autres que les lançons, les auteurs du suivi ont utilisé l'abondance des lançons qui représentent des proies préférentielles pour certaines espèces à hautes valeurs commerciales telles que le bar, le lieu et le turbot, comme proxy de l'abondance de ces dernières (en se basant sur l'hypothèse d'une corrélation positive entre l'abondance des lançons et de leurs prédateurs). Ainsi, en suivant cette hypothèse, les abondances de certaines espèces commerciales devraient décroître du sud vers le nord du banc de la Horaine. Cependant, l'analyse des résultats est un non-sens écologique à l'échelle d'une zone si restreinte telle que le banc de la Horaine, dans la mesure où les abondances des espèces à haute valeur commerciale sont également régies par d'autres facteurs comme la pêche et la dynamique naturelle qui leur est propre. Ainsi, lors de l'évaluation du dossier de suivi de 2012 (avis du 18 juillet 2013), les halieutes de l'Ifremer

¹¹ Histoires de vie et connectivité entre les habitats écologiques essentiels de poissons des mers côtières tempérées : le cas des lançons (Ammodytidae) et du bar européen (*Dicentrarchus labrax*, Linnaeus, 1758) dans le Golfe Normand Breton, une approche par les marqueurs environnementaux.

avaient estimé « *qu'il est totalement utopique de présenter une opération ponctuelle, qui ne constitue qu'une première approche de l'abondance d'une des proies (lançons) de ces ressources halieutiques, comme une méthode susceptible d'évaluer, de façon indirecte, la richesse de la zone considérée en bar, lieu ou turbot* ».

Les éléments fournis pour caractériser l'état de référence sur le site de La Horaine n'ont pas tenu compte des recommandations inscrites dans le protocole Ifremer pour la description des ressources halieutiques ; les prochains suivis devront donc s'attacher à prendre en considération la saisonnalité des peuplements halieutiques. Enfin, et comme prévu par l'arrêté préfectoral du 20 Juillet 2012, ils devront, le cas échéant, permettre la formulation de propositions visant à réduire l'impact.

5. Incidence sur les sites Natura 2000

En 2010, le bureau d'étude Astérie a fourni une évaluation de l'incidence de l'extraction sur le site Natura 2000 englobant le périmètre d'extraction de la Horaine. Les conclusions de l'étude d'incidence sont données ici à titre indicatif. En effet, elles reposent essentiellement sur une analyse bibliographique et aucune étude d'impact sur l'avifaune, et/ou sur les mammifères marins n'a été réalisée.

L'étude d'incidence suggère que :

- La destruction de « l'habitat de banc de sable à faible couverture permanente d'eau marine » est restreinte au périmètre d'extraction ; celui-ci représentant 0,3% de la surface de cet habitat ;
- La probabilité de collision avec des mammifères marins est négligeable en raison de leur capacité de fuite. Par ailleurs ce type d'incident est inhérent à toute navigation ;
- La nuisance sonore pour l'avifaune et les mammifères marins est relativement limitée grâce à la présence de silencieux d'échappement et au faible temps passé sur le site d'extraction (2% du temps annuel) ;
- La perturbation lumineuse sur les oiseaux migrateurs est considérée comme minime en raison de leur large aire de distribution par rapport à la surface du périmètre d'extraction ;
- Les résultats de la modélisation du panache turbide suggèrent que la déverse pourrait potentiellement impacter le banc de maërl situé au sud du périmètre d'extraction. Cependant l'étude d'incidence affirme que ce dépôt est négligeable au regard des turbidités naturelles et qu'il n'affecte qu'une partie limitée du banc ;
- La réduction de l'intérêt trophique des fonds sur le passage de la drague reste limitée dans l'espace et dans le temps. Les excavations créées par la drague à point fixe devraient permettre de

conserver des zones de colonisateurs potentiels entre les excavations et ainsi faciliter la recolonisation. Par ailleurs la nature du sédiment et la forte énergie hydrodynamique habituelle de cet habitat entraînent généralement un comblement rapide des excavations et les détériorations des fonds à long terme restent limitées. Toutefois, cette dernière affirmation doit être nuancée en raison des manquements dans les suivis bio-sédimentaires mis en exergue par les avis de l’Ifremer.

6. Conclusion

Les études conduites par le biais de la modélisation pour la caractérisation de la dynamique hydro-sédimentaire sont, pour ce site, les informations les plus robustes ayant été fournies. Elles suggèrent que le creusement du banc de la Horaine aura un impact minime sur les conditions hydrodynamiques, le dépôt des particules issues de la déverse et le littoral. Le suivi du panache turbide, *via* un suivi lagrangien suggère également un impact relativement faible de l’extraction sur la turbidité et les dépôts sédimentaires et ce, malgré le fait que certains points restent à éclaircir.

En revanche, les suivis portant sur la topographie, la nature des fonds, les peuplements macrobenthiques et halieutiques ne permettent pas, à ce jour, de tirer de conclusions sur l’impact de l’extraction, ni sur la capacité de résilience du milieu. Il n’est donc pas possible de proposer d’aménagements de l’activité d’extraction afin de limiter son impact. A l’issue de l’évaluation du suivi mené en 2012, l’Ifremer concluait que « *la recommandation majeure pouvant être faite à l’issue de cette étude est qu’une stratégie d’échantillonnage soit clairement définie et appliquée à l’identique lors de chaque étude, y compris si l’opérateur diffère* ».

Annexe 5. Synthèse sur l'impact de l'extraction de granulats marins sur le site de la Baie de Seine

La présente synthèse se base sur les résultats des extractions expérimentales conduites par le GIS SIEGMA (Groupement d'Intérêt Scientifique de Suivi des Impacts de l'Extraction de Granulats Marins). L'analyse a porté sur le document intitulé « **Suivi des impacts de l'extraction de granulats marins. Synthèse des connaissances 2012 (GIS SIEGMA)** » (Desprez et al., 2012, Éditions PURH, Université de Rouen, 43 pages) et sur le mémoire de thèse de Pierre Arnaud Duclos intitulé « Impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats marins : application au bassin oriental de la Manche » (thèse effectuée sous la direction de [Robert Lafite](#), 2012, 272 pages).

Les résultats du projet SCOOTER ont également été pris en compte. Cette étude, conduite en 2015 par l'Ifremer, avait pour objectif de déterminer l'impact de l'extraction de granulats marins sur la qualité de l'eau en Baie de Seine : « **État chimique des sédiments et influence d'une extraction de granulats sur l'état chimique de l'eau de mer dans le cadre du PER GMH - Étude SCOOTER (Etude sur la remobilisation de Sédiments potentiellement Contaminés induite par une Opération d'ExtRaction de granulats en baie de Seine)** » (MENET-NEDELEC et al., 2015, Ifremer, 47 pages).

Le « **Dossier de demande d'autorisation d'ouverture de travaux miniers - Concession des Granulats Marins de la baie de Seine** » (2013) a également été consulté. L'attention a été portée sur les rapports d'études thématiques portés en annexes de ce dossier, et qui fournissent une information plus exhaustive sur les analyses menées que ce qui peut être rapporté dans le corps de texte de l'étude d'impact :

- Annexe 4 : « **Périmètre du permis d'exploitation de sables siliceux marins du GIE GMN - État initial de la ressource halieutique - Bilan de l'année d'état initial 2012/2013** » (De Roton et al., 2013, Cellule de suivi du littoral normand, 72 pages) ;
- Annexe 5 : « **Quatrième étape du suivi sédimentaire et benthique du site expérimental d'extraction "Granulats marins de la Baie de Seine" - Permis d'exploitation de sables siliceux marins du G.I.E. "Granulats Marins de Normandie"** » (Desprez 2012, Cellule de suivi du littoral normand et UMR CNRS 6143 Université de Rouen, 48 pages) ;

- Annexe 6 : « **Analyse de données issue des campagnes COMOR entre 1999 et 2012 relatives au périmètre d'extraction expérimentale des granulats marins de la baie de Seine** » (TBM SARL-Chauvaud, 2013, 17 pages) ;
- Annexe 7 : « **Étude géophysique : Sismique sondeur de sédiment INNOMAR – Sismique Très Haute Résolution SPARKER – Le Havre – Rapport d'étude** » (Hocer, 2011, 28 pages) ;
- Annexe 8 : « **Études dans le cadre de la demande d'AOTM – Prospection morpho-bathymétrique** » (G-tec, 2012, 12 pages) ;
- Annexe 9 : « **Extraction de granulats en Baie de Seine – Étude d'impact sur l'hydrodynamique et l'agitation** » (Artelia, 2013, 23 pages).

Enfin, les comptes rendu des **cinq réunions de concertation**, présentés dans les annexes du dossier de demande d'ouverture des travaux miniers, ont été examinés. Ces comptes rendus illustrent la démarche ayant amené à l'élaboration d'une stratégie d'extraction innovante, sur la base des résultats des extractions expérimentales.

Certains commentaires formulés dans les avis de l'Ifremer sont également rappelés lorsque nécessaire.

1. Caractéristiques du site d'extraction

1.1. Caractéristiques environnementales

Le site d'extraction est situé au centre de la baie de Seine, dans l'alignement de l'estuaire de la Seine. Il est éloigné de 20 km des côtes de Haute et Basse Normandie. La profondeur du site d'extraction est comprise entre -19,5 m et -22,5 m C.M. et les courants y sont inférieurs à 1m.s^{-1} .

L'étude géophysique, conduite par Hocer en 2011, a mis en évidence deux unités sédimentaires couvrant le substratum rocheux. Une première strate, épaisse de 8,40 m et formée de sédiments graveleux, repose directement sur le substratum rocheux. Elle est surmontée par une couche de surface composée de sables grossiers coquillers, d'une épaisseur d'1,90 mètre.

Le site d'extraction de la baie de Seine n'est inclus dans aucune zone de protection environnementale ou de servitude réglementaire.

1.2. Historique du site

Le GIE « Granulats marins de Normandie » (GMN) dispose d'un permis d'exploitation de 8,6 km² depuis 1989 (arrêté ministériel du 28 Juin 1989). Dès 1993, différentes phases de concertation avec les acteurs locaux ont abouti à la mise en place d'une exploitation expérimentale. Cependant, les travaux scientifiques n'ont véritablement débuté qu'en 2006, suite à l'obtention d'une autorisation d'ouverture des travaux miniers (arrêté préfectoral du 18 juillet 2005). Le suivi a été réalisé par le GIS SIEGMA, dont le GIE GMN était membre.

L'extraction expérimentale a été conduite selon un protocole BACI (Before After Control Impact), c'est-à-dire que les propriétés physiques et biologiques ont été suivies avant, pendant et après des dragages expérimentaux. Deux sites de 0,6 km² ont été choisis à l'intérieur du périmètre du permis. Le premier site a été dragué pendant un an, puis laissé en jachère pendant 3 ans. Le second site a été exploité de manière continue pendant trois ans, avec une alternance entre ses parties nord et sud. Selon la classification de Boyd et al. (2004), chaque site a subi une intensité de dragage moyenne à faible (<5h.ha⁻¹.an⁻¹). Seul le sud du secteur exploité en continu a été dragué à une intensité qualifiée de moyenne à forte (environ 7h30.ha⁻¹.an⁻¹) au cours de la 3^{ème} année d'extraction. L'intensité de ces extractions expérimentales était comparable aux intensités d'extractions envisagées de la cadre de l'exploitation industrielle du site.

En 2013, une concession, d'une durée de validité de 25 ans a été accordée (décret du 28 novembre 2013). La quantité maximale pouvant être extraite a été fixée entre 0,5 et 1,65 millions de tonnes par an.

Les prochains paragraphes résument les impacts constatés de l'extraction expérimentale de granulats marins sur l'environnement physique et biologique de la baie de Seine. Les études conduites par le GIS SIEGMA, l'Ifremer et les différents bureaux d'études n'ont pas été dissociées afin de conserver une structure cohérente entre les différents volets.

2. Impact de l'extraction de granulats sur l'environnement physique de la baie de Seine

2.1. Impact lié à la formation d'un panache turbide

La thèse de Duclos¹² (2012), réalisée dans le cadre du GIS SIEGMA, a permis de comprendre la dynamique du panache turbide généré lors des opérations de dragage. Les résultats indiquent que les eaux de surverse se diluent rapidement dans la colonne d'eau lorsqu'elles sont rejetées, une forte réduction de la concentration de matière en suspension ayant été observée entre les eaux de surverse et le panache turbide. Sur la base de suivis lagrangiens, l'auteur a montré qu'environ 10 minutes après la surverse, le panache s'étendait sur une largeur de 100 m et que les fractions sableuses décantaient rapidement pour se déposer à environ 400 m de la drague. En revanche, les particules fines étaient dispersées sur une plus grande distance (jusqu'à 7 km) en suivant le déplacement de la drague. Enfin, l'étude a montré que la durée de vie du panache était d'environ 2 heures. Au-delà, les concentrations de matière en suspension dans la colonne d'eau atteignaient les valeurs naturelles.

La remise en suspension des sédiments, *via* la formation d'un panache turbide, est susceptible de libérer des métaux et des contaminants dans la colonne d'eau. Ce phénomène, qui a fait l'objet de plusieurs études dans le cadre du chalutage de fond (*e.g.* fjords Norvégiens : Bradshaw et al., 2012), reste relativement méconnu pour l'extraction de granulats marins. Les sites exploités souvent composés de sédiments grossiers, sont en effet considérés comme peu propices à la rétention des métaux et des contaminants.

Le projet SCOOTER¹³ (remobilisation de Sédiments potentiellement COntaminés induite par une OpéraTion d'ExtRaction de granulats en baie de Seine), mené par l'Ifremer (Menet-Nedelec et al., 2015), avait pour objectif de pallier ce manque de connaissance. Pour rappel, la Seine fait partie des cours d'eau les plus contaminés d'Europe. Les résultats de cette étude indiquent que la formation d'un panache turbide entraîne une remise en suspension de certains métaux traces (chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, vanadium, zinc). Cependant, il y aurait peu de transfert vers la phase dissoute. La concentration en contaminants dans la colonne d'eau atteignait rapidement les niveaux naturels avec la disparition du panache

¹² « Impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats marins : application au bassin oriental de la Manche » (thèse rédigée par Pierre Arnaud Duclos sous la direction de Robert Lafite, 2012, 272 pages).

¹³ Cette étude ne fait pas partie des obligations de suivi fixées par l'arrêté préfectoral d'ouverture de travaux du PER GMH.

turbide. Par conséquent, cet impact était relativement limité dans le temps. Les auteurs de cette étude avaient conclu « *que l'extraction n'a pas d'influence à long terme sur la qualité globale de l'eau* » et « *qu'un suivi à long terme de la qualité de l'eau ne semble pas pertinent pour suivre l'impact de l'extraction sur le site du PER- GMH* ».

2.2. Impact lié à la modification de la topographie du fond marin

Les levés bathymétriques, réalisés à l'issue des extractions expérimentales, ont révélé la présence de sillons sur le fond marin. Ceux-ci étaient larges d'environ 5 m pour moins d'1 m de profondeur. Leur pente était supérieure à 5 degrés. Les sillons étaient partiellement remplis de sables fins à grossiers, parfois ridés. Les dépressions, générées par le passage répété de l'élinde sur le fond, étaient plus larges, plus pentues et plus profondes en comparaison aux sillons isolés. Sur le site exploité en continu pendant trois ans, le creusement atteignait 2 m par rapport à la profondeur moyenne du fond marin.

En 2013, le bureau d'étude Artelia a utilisé un modèle hydrodynamique pour prédire l'impact du creusement sur les conditions d'agitation et les courants de la baie de Seine. Le périmètre de la concession a été subdivisé en sept bandes de taille équivalente. Puis, deux scénarios de creusement ont été testés. Le premier constitue une configuration intermédiaire, c'est-à-dire un approfondissement de 2,5 m pour quatre bandes sur sept. Le second scénario correspondait à la configuration attendue en fin d'exploitation, soit un approfondissement généralisé de 2,5 m sur l'ensemble des sept bandes. Pour chaque scénario, les pentes marquant la limite entre la zone d'extraction et les zones non-draguées ont été fixées à 10% (environ 5 degrés). Le modèle prenait également en compte différents états de mer.

Les prévisions du modèle hydrodynamique suggèrent que le creusement du fond marin entraînera une réduction de l'agitation et de la vitesse des courants au niveau du site d'extraction. Cependant, quel que soit le scénario, ces modifications seront inférieures à $\pm 10\%$ (de l'ordre du cm.s^{-1} pour la vitesse du courant) par rapport aux conditions naturelles. De plus, l'extension de cet impact serait essentiellement limitée en-dessous de l'isobathe - 10m C.M. Au niveau du littoral, l'impact de l'approfondissement sera plus faible : les modifications des conditions d'agitations y seront inférieures à $\pm 0,5\%$ par rapport aux conditions naturelles.

Les sorties du modèle ont permis d'estimer l'impact potentiel de l'extraction sur le transport solide et sur les conditions de navigation en baie de Seine. Les modifications du transport

solide pourraient conduire à un adoucissement des pentes et une réorganisation locale des sédiments sur le site d'extraction. En revanche, elles auraient peu d'impact sur le littoral (modification du transport solide inférieure à 0,1% par rapport aux valeurs annuelles naturelles). Les auteurs ont ainsi conclu que l'extraction n'aura pas d'impact sur le littoral de la baie de Seine et, en particulier, sur les plages, les falaises et les chenaux de navigation. Sur les sites de clapage des sédiments portuaires d'Octeville, du Kannik et de Machu, les modifications du transport solides seront également faibles (<1%), voire négligeables. Au sein du paléo-lit de la Seine, une suragitation de 10% a été modélisée dans des conditions de mer déjà formée (5 à 10% du temps annuel), périodes durant lesquelles les petits navires de pêche à la coquille Saint-Jacques restent généralement au port. En outre, La sur-agitation se situerait principalement sur des fonds variant entre -25 et -30 m C.M., peu favorables à l'utilisation de drague à coquilles. Ainsi, les auteurs ont conclu que l'extraction aura peu d'impact sur la navigation et, en particulier, des navires utilisant des dragues.

2.3. Modification de la nature des fonds

En 2011, soit trois années après la fin des extractions sur le site mis en jachère après une année de dragages expérimentaux, la granulométrie et la nature des fonds étaient relativement homogènes sur l'ensemble du site. La granulométrie ne montrait pas de différence significative par rapport aux sites de référence, non-dragués. Aucune trace des dépôts de surverse, souvent caractérisés par une couche de sédiment fins (*e.g.* Boyd and Rees, 2003) n'a été observée. Ces résultats ont été confirmés par le suivi de 2012. Les auteurs avaient suggéré que l'absence d'impact sur la nature des fonds était probablement imputable à la courte durée d'exploitation. En effet, au sein du site exploité en continu pendant trois ans, les sédiments étaient plus grossiers et plus hétérogènes qu'avant le début des extractions expérimentales. Des blocs de petite taille ont notamment été mis à jour au cours de l'extraction. Lors des campagnes réalisées pour le suivi des ressources halieutiques, ces blocs ont entraîné des difficultés à effectuer des chalutages, interrogeant sur le maintien à long terme de l'accessibilité des zones draguées à la pêche professionnelle.

3. Impact de l'extraction de granulats sur l'environnement biologique de la baie de Seine

3.1. Impact sur les peuplements macrobenthiques

Impact sur la structure du peuplement benthique

Les suivis réalisés par le GIS SIEGMA ont montré que l'extraction de granulats marins entraîne une réduction forte des paramètres biologiques de la macrofaune benthique. Après une année de dragage sur le site destiné à la mise en jachère, la richesse spécifique, l'abondance et la biomasse montraient une réduction de -22%, -66% et de -74% par rapport aux valeurs initiales. Cet impact était encore plus élevé sur le site exploité en continu pendant trois ans ; les réductions de la richesse spécifique, de l'abondance et de la biomasse atteignant respectivement -42%, -71% et -81%.

Afin d'estimer l'impact lié au dépôt du panache de surverse, les paramètres biologiques des sites dragués ont été comparés à ceux de stations non-draguées mais situées dans l'axe des courants dominants. Cette analyse a mis en évidence que, sur le site dragué pendant un an, les paramètres biologiques étaient très inférieurs à ceux des sites adjacents, situés à 250 et 750 m des zones d'extraction (-42% pour la richesse spécifique, -71% pour l'abondance et -77% pour la biomasse). Les auteurs avaient alors conclu que l'impact de la surverse sur la macrofaune était relativement limité. Cependant, selon les experts de l'Ifremer (avis du 28/07/2014), l'impact de la surverse a peut-être été écarté trop hâtivement : « *dans la zone périphérique, les valeurs de richesse spécifique, d'abondance et de biomasse sont similaires à celles observées au sein des sites « jachères nord » et « jachère sud », et inférieures à celles observées sur le site de référence. Un tel résultat pourrait laisser penser que la zone périphérique est impactée par le panache de surverse* ». Par conséquent, des analyses complémentaires doivent être menées afin de déterminer si le rejet des eaux de surverse a bel et bien un impact sur la macrofaune.

Résilience biologique

Les suivis réalisés *sur le site en jachère* suggèrent que la résilience biologique est relativement rapide. En effet, deux ans après l'arrêt des extractions, les paramètres biologiques ont considérablement augmentés. La richesse spécifique a atteint les niveaux caractérisant les stations de référence et est restée stable en 2012 (soit un an après la fin du suivi « officiel », prévu par l'arrêté préfectoral d'ouverture des travaux miniers du 18 juillet 2005). La biomasse a également considérablement augmenté entre 2009 et 2012 pour s'approcher du niveau de référence, sans toutefois l'atteindre (93% de la valeur de référence mesurée en 2012). Les valeurs d'abondance (nombre d'individus.m⁻²) montraient un patron différent. Si le nombre d'individus avait quasiment doublé entre 2009 et 2011, il a stagné à

53% des valeurs d'abondance de référence les années suivantes (2011-2012). Cela pose donc la question de la résilience de l'abondance à long terme. Est-elle véritablement possible ? Et si oui, quel est le temps nécessaire pour retrouver les niveaux de référence ? Des suivis supplémentaires sont donc nécessaires pour statuer sur le temps de résilience de l'abondance macrobenthique.

Il convient de rester prudent quant aux conclusions sur la résilience biologique. Lors de l'évaluation du dossier de demande d'ouverture des travaux miniers, les experts de l'Ifremer ont soulevé des biais d'ordre méthodologique, pouvant potentiellement invalider les résultats obtenus. L'étude d'impact précisait que « *les résultats des campagnes sont issus du même site d'étude, mais les stations et les techniques de prélèvements diffèrent selon les opérateurs* » (légende du tableau 19, à la page 107). Par conséquent, l'augmentation de la richesse spécifique, de l'abondance et de la biomasse à l'issue des extractions est-elle due à la résilience biologique ou à une différence dans les protocoles mis en place ?

Enfin, les conclusions de l'étude d'impact stipulant que (i) le site laissé en jachère est restauré au bout de 2,5 ans et (ii) qu'aucune perte de fonctionnalité au sein de la communauté n'est observée à l'issue des exploitations expérimentales sont probablement inexactes et hâtives, car ces résultats ne s'appuient pas sur une analyse de l'identité des espèces et/ou des groupes fonctionnels présents avant et après l'exploitation. La synthèse de Desprez (2012) et l'étude d'impact ne présentent pas les différences ou les similarités dans l'identité des espèces entre les zones de référence et les zones exploitées. Par conséquent, il n'est pas possible de déterminer, à la lecture de ces rapports, qu'elles sont les espèces favorisées/défavorisées par l'extraction de granulats marins.

3.2. Impact sur la ressource halieutique

Impact sur la structure du peuplement halieutique

Le suivi halieutique, réalisé par le GIS SIEGMA entre 2007 et 2011, suggère que l'extraction de granulats marins a un impact plus élevé sur les ressources halieutiques que sur le macrobenthos. Selon les sites, l'extraction expérimentale a entraîné une réduction de la richesse spécifique variant entre -50 et -70%. L'abondance a diminué de 90% tandis que la biomasse a été réduite de l'ordre de 80 à 90%. Cependant, la cartographie de ces paramètres biologiques suggère que l'impact de l'extraction de granulats marins est restreint au périmètre d'extraction et à ses abords proches (quelques centaines de mètres).

Si de nombreuses espèces montraient des abondances réduites dans les secteurs d'extraction, la sole et la plie exhibaient en revanche une fréquentation accrue dans ces secteurs (jusqu'à 50 fois supérieure pour la plie). Ceci pourrait être dû à une attraction de ces espèces dans les zones perturbées : l'analyse des contenus stomacaux a révélé que les estomacs des soles présentent un taux de remplissage plus élevé sur le site d'extraction en comparaison aux sites de référence. De plus, il semble que le régime alimentaire de cette espèce ait été modifié sur le site d'extraction, avec une contribution accrue des bivalves et des espèces de l'épifaune des graviers (au détriment des annélides et des crevettes). Cette modification de régime alimentaire pourrait être liée à la destruction mécanique de la faune benthique au passage de l'élinde et le dépôt de ces nouvelles proies rejetées par les eaux de surverse. Cependant, ce phénomène d'attraction du site pour certaines espèces (sole et plie notamment) pourrait n'être que temporaire puisque conditionné à l'apport de nourriture par la destruction de la faune benthique lors des phases d'extraction de granulats marins. Les modifications dans la fréquentation des autres espèces de poissons n'ont pas pu être reliées à des changements dans leur régime alimentaire, probablement en raison du faible nombre d'année d'extraction.

La baie de Seine est connue pour son gisement de coquilles Saint-Jacques. L'analyse de données issue des campagnes COMOR (Ifremer) entre 1999 et 2012 a montré que le périmètre d'extraction ne faisait pas partie des secteurs les plus productifs de la baie. Des variations interannuelles de la valeur du stock à l'intérieur et l'extérieur du périmètre ont été observées pour l'ensemble de la série temporelle (donc avec ou sans influence des extractions de granulats marins). Par conséquent, il est difficile d'établir un lien direct entre l'activité d'extraction et l'évolution, négative ou positive, de la dynamique locale du stock de coquilles Saint-Jacques. Si un impact de l'extraction de granulats sur la population de coquille Saint-Jacques peut exister, celui-ci ne semble pas perceptible à l'échelle géographique à laquelle l'étude a été réalisée. La pêche à la coquille Saint-Jacques représente, avec la sole, la seiche et le bar, un important segment économique en Normandie en raison des tonnages débarqués et de sa valeur marchande (plus de 50% des ventes en criées à Grandcamp et Dieppe). Ainsi, et malgré le fait que la concession ne fasse pas nécessairement partie des zones les plus productives de la baie, des investigations supplémentaires mériteraient d'être conduites à l'échelle du site d'extraction afin de statuer sur l'effet de l'extraction sur cette espèce et plus largement, sur l'activité de pêche.

Résilience biologique

Sur la zone laissée en jachère, la richesse spécifique totale a atteint des valeurs proches des niveaux de référence 1,5 an après l'arrêt de l'extraction. Ce processus était plus lent pour l'abondance, qui a retrouvé sa valeur initiale au bout de 2,5 ans.

De ce fait, le processus de recolonisation suivrait plusieurs étapes avec (i) une reprise des fluctuations saisonnières des paramètres faunistiques (richesse spécifique, abondance, ...) sans que leurs valeurs initiales n'aient été restaurées, puis (ii) un retour de leurs niveaux de référence en conditions de minima saisonnier et enfin, (iii) la restauration du niveau d'abondance (valeurs identiques à celles des stations de référence) en conditions de maxima saisonniers.

Le site exploité de manière continue pendant 3 ans a été étudié par la Cellule de Suivi du Littoral Normand, en 2012 et 2013, soit entre un et deux ans après la fin des extractions expérimentales. Comme sur le site laissé en jachère, les auteurs ont observé un retour relativement rapide aux valeurs de référence pour le nombre d'espèce dans la partie nord, entre 16 et 21 mois après la fin des dragages. En revanche, dans la partie sud la richesse spécifique restait 18 à 31% inférieure au niveau de référence. Quel que soit le secteur nord ou sud, la composition faunistique était toujours différente des stations de référence, avec seulement 1/3 d'espèces communes, deux ans après la fin des dragages. Des espèces inféodées à des fonds durs étaient plus fréquentes ou abondantes, en raison de la mise à nu de galets, de cailloutis et de blocs.

4. Conclusion

Les échanges entre les différents acteurs et les travaux scientifiques réalisés au sein du GIS, avant le début de l'extraction industrielle ont conduit l'acquisition d'un socle de connaissances solides sur l'impact de l'extraction de granulats marins sur l'environnement physique et biologique de la baie de Seine et à l'élaboration d'un protocole de suivi rigoureux, outil indispensable à une meilleure gestion des activités d'extractions des granulats marins. Des précisions, notamment sur le temps de résilience de la macrofaune, restent toutefois à fournir. De plus, les aspects fonctionnels n'ont pas été pris en compte et des questions demeurent (l'extraction de granulats marins modifie-t-elle le fonctionnement de l'écosystème et de quelle manière ?).

Les connaissances apportées par les travaux du GIS SIEGMA, ont permis de proposer des modalités d'exploitation destinées à limiter l'impact de l'extraction sur l'environnement de la

baie de Seine. Le concept d'exploitation avec périodes de jachère, c'est-à-dire en maintenant des sous-secteurs du périmètre de la concession au repos avant de reprendre l'extraction quelques années après, a été écarté afin d'éviter de renouveler un impact après plusieurs années sur un sous-secteur en cours de recolonisation ou d'ores et déjà restauré.

Sur les cinq scénarios d'exploitation proposés par le GIE GMN lors de la seconde réunion de concertation du 22 octobre 2012 à Rouen, le choix s'était porté sur une extraction en bandes non contiguës. La concession a donc été subdivisée en sept bandes. Chaque bande ne sera exploitée que trois à quatre années consécutives puis abandonnée au profit d'une nouvelle bande. Pendant toute la durée d'exploitation d'une bande, les six autres bandes seront fermées à l'extraction de granulats. Chaque bande devrait ainsi bénéficier, à l'issue de sa période d'extraction, d'une superficie maximale de secteurs limitrophes non impactés, en cours de restauration ou recolonisés. Ces mesures sont de nature à limiter l'emprise spatiale des impacts et faciliter le retour de sédiments sableux et la recolonisation par des espèces adultes mobiles.

Compte tenu de la direction des courants dominants et du sens de la résultante du transit sédimentaire local, l'exploitation se fera préférentiellement selon une direction ouest-est afin de faciliter le comblement des sillons d'extraction et de limiter les effets du panache turbide. Les bandes seront successivement exploitées en migrant d'ouest en est, tant dans la succession des bandes que dans l'extraction progressive de chaque bande pour faciliter le processus de recolonisation par l'ouest mis en évidence lors de l'expérimentation (le suivi de 2012 a montré que la restauration du nord-ouest du site laissé en jachère était plus rapide que dans sa partie sud-est qui avait pourtant été exploitée en premier).

Annexe 6. Synthèse sur l'impact de l'extraction de granulats marins sur le site de Dieppe – « Granulats marins de Dieppe (anciennement Graves de Mer) »

La présente synthèse se base sur le « **Dossier de demande d'autorisation d'ouverture de travaux miniers – Concession des granulats marins au large de Dieppe – Pièce n°3 – Étude d'impact** » rédigé par le bureau d'étude Hocer en 2010 (255 pages). Ce dossier reprend l'ensemble des suivis environnementaux réalisés antérieurement. Il intègre également une abondante littérature scientifique.

Le document intitulé « **Suivi des impacts de l'extraction de granulats marins. Synthèse des connaissances 2012 (GIS SIEGMA)** » (Desprez *et al.*, 2012. Éditions PURH, Université de Rouen, 43 pages) a également été examiné. En effet, depuis 2003, le site « Granulats marin de Dieppe » bénéficie des apports de connaissance du GIS SIEGMA (Groupement d'Intérêt Scientifique de Suivi des Impacts de l'Extraction de Granulats Marins). Enfin, les différents avis formulés par l'Ifremer ont été analysés pour la rédaction de cette synthèse.

1. Caractéristiques du site d'extraction

1.1. Localisation et conditions environnementales

Le site d'extraction « Granulats marins de Dieppe » est situé à 5,5 km au nord-nord-est du port de Dieppe, à une profondeur variant entre -10 à -20 m C.M.

L'environnement hydrodynamique du site est plutôt de type **énergétique**, avec des courants de fonds atteignant 1 m.s^{-1} en période de vive-eau.

L'épaisseur totale de sédiment au-dessus du substratum crayeux est de l'ordre de 4 à 5 mètres. Toutefois, seule une couche de 3 m est véritablement exploitable. Elle représente un volume d'environ 20,4 millions de m^3 . Ce gisement se compose de **galets de silex** (fossiles) et de **sable graveleux** de remplissage, plus ou moins coquillier, dont la teneur moyenne en carbonate est de 47%. La majorité du matériel extrait est déchargé, traité puis stocké au port de Dieppe.

Le site d'extraction n'est concerné par aucune zone de protection du patrimoine naturel (*e.g.* Natura 2000 en mer). Depuis le 7 novembre 1996, il est mitoyen d'un autre périmètre d'extraction : le site « Gris Nez ».

1.2. Historique de l'activité minière du site « Granulats marins de Dieppe »

Le 2 février 1977, le Groupement d'Intérêt Économique (GIE) « Graves de Mer » a reçu l'autorisation d'exploiter une surface de 0,5 km², pour une durée de 20 ans. Les travaux d'extraction ont débuté en 1979 (arrêté préfectoral du 28 novembre 1979).

En 1993, le GIE a obtenu un permis d'exploitation de mines (PEX) de 5 ans sur une surface de 5,5 km² (arrêté ministériel du 22 mars 1993). Les modalités d'extraction étaient régies par les arrêtés préfectoraux du 11 Juillet 1994 et du 19 octobre 1998. Puis deux prolongations successives, en 1997 et en 2004 (arrêtés ministériels du 23 novembre 2001 et du 29 janvier 2004), ont permis de poursuivre l'activité d'extraction sur le site de « Graves de Mer ».

En 2006, la prorogation de 15 ans du PEX arrivant à son terme, une demande de concession a été adressée par le GIE. Celle-ci a été acceptée en 2010 (décret du 16 avril 2010), pour une durée de 30 ans. La concession, renommée « Granulats marins de Dieppe », englobe la zone de l'ancien PEX et couvre un périmètre de 5,9 km².

1.3. Modalité d'exploitation sur la concession

Les modalités d'exploitation de la concession fixent la quantité de matériel ponctionné pendant les 15 premières années à un maximum de 600000 tonnes par an. Pendant les 15 années suivantes, la quantité maximale autorisée sera de 800000 tonnes par an.

Dans le but de faciliter la résilience environnementale, plusieurs mesures visent à laisser, à l'issue de l'exploitation, le site dans l'état le plus proche possible des conditions initiales. Ainsi, une épaisseur de galets d'1,5 m doit être maintenue au-dessus du substratum. Le tamisage et/ou le traitement des granulats à bord sont proscrits afin de limiter l'ensablement du site. L'emploi d'une élinde trainante, plutôt que le dragage à l'ancre, a été retenu pour limiter la profondeur de la souille. Toutefois, dans le cas où les sillons créés par l'extraction dépassent 3 m de profondeur et/ou que leur pente excède 15%, un nouveau levé bathymétrique doit être réalisé l'année suivante afin de permettre une rectification du profil des sillons.

Le site est inclus dans une zone de pêche aux engins dormants (filet, trémail, casier) et de pêche au chalut. Afin de limiter les conflits d'usage avec les pêcheurs professionnels, et en particulier les fileyeurs, des règles d'occupation de l'espace maritime ont été adoptées (30

août 2007). Elles consistent à **alterner l'exploitation entre le Nord et le Sud de la concession**. Un calendrier d'exploitation a également été mis en place afin de limiter l'impact sur la ressource halieutique. Ainsi, l'activité minière est suspendue pendant la période de frai du hareng, du 1^{er} novembre au 31 janvier. De même, le dragage n'est pas autorisé en-deçà de la bande des 3 milles nautiques au printemps, lors des périodes de pêche à la seiche (arrêté préfectoral du 20 octobre 1998).

1.4. Intensité de dragage

Un **indicateur d'intensité** de dragage a été estimé entre 2004 et 2006 par le GIS SIEGMA. Il correspond à la durée de dragage par hectare et par an. Ce type d'indicateur est communément employé dans les études Anglaises (Boyd et al., 2005; Cooper et al., 2007b, 2008) et représente une véritable avancée dans la compréhension de l'impact du dragage. En effet, la spatialisation de cet indice a permis de qualifier 4 zones présentant un contexte d'extraction différent : (i) une zone d'extraction intensive où, le cumul de l'extraction sur 3 ans atteint **3h35.ha⁻¹** (ii) une zone en jachère où l'extraction est faible, (iii) une zone subissant l'effet de la surverse et (iiii) une zone en cours de recolonisation, correspondant à l'ancien périmètre d'extraction qui n'est plus exploité depuis 15 ans. A l'échelle du périmètre autorisé à l'extraction, l'intensité est faible, inférieure à 1h.ha⁻¹.an⁻¹ sur plus de 95% de la surface autorisée.

Les prochains paragraphes résument les impacts constatés de l'extraction de granulats marins sur les compartiments physiques (panache turbide, topographie, nature du fond, incidence sur le littoral voisin) et biologiques (macrofaune benthique, ressource halieutique) de l'environnement du site « Granulats marins de Dieppe ».

2. Impact lié à la génération d'un panache turbide

Les premières études portant sur la génération d'un panache turbide lors des opérations de dragage sont anciennes et datent de la fin des années 80. Les mesures de la concentration de matière en suspension avaient permis de différencier le panache turbide généré par le passage de l'élinde sur le fond et le panache de surface, formé par la surverse.

Dans le panache généré par le frottement de l'élinde sur le fond, la concentration de matière en suspension était 14 fois supérieure aux valeurs naturelles. Cependant, la formation de ce

panache était très éphémère en raison de sa faible hauteur : 1 à 2 m au-dessus du fond. Ainsi, la majorité des sédiments remis en suspension décantait presque instantanément à proximité de la drague. Toutefois, la queue du panache, composée de particules fines, pouvait s'étendre à plus de 3 km de la drague.

En surface, le panache généré par les eaux de surverse présentait, durant l'extraction, une concentration de matière en suspension 15 fois supérieure à la concentration naturelle. **Le panache de surface, composé de particules fines pouvait également s'étendre jusqu'à 3 km de la drague.**

Les auteurs de l'étude suggéraient que le maintien et l'étendue du panache pouvaient être liés aux courants et aux mouvements d'aller-retour de la drague ainsi qu'à la granulométrie du tout-venant ; cette dernière pouvant varier à l'échelle de la zone d'extraction. Environ 5% des sédiments superficiels présents sur le site d'extraction à la fin des années 80, dont les particules étaient de taille inférieure à $130\mu\text{m}$, étaient susceptibles d'être remis en suspension par la drague.

La thèse réalisée par Duclos (2012), et intégrée dans le cadre du GIS SIEGMA, fait suite aux études conduites à la fin des années 80. Ce travail a notamment permis de préciser la dynamique du panache turbide généré par les dragues modernes et de distinguer le panache de surface et le panache benthique. Des mesures de la concentration de matière en suspension ont ainsi été effectuées (i) dans les eaux de surverse de la drague aspiratrice en marche « Scelveringhe » (fort débit d'aspiration, équivalent à $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) et (ii) dans la colonne d'eau.

Le panache de surface était formé par la dilution des eaux de surverse lors de leur rejet à la mer. Une forte diminution (3 à 40 fois) de la concentration de matière en suspension a donc été observée entre les eaux de surverse et les eaux de surface, au moment de l'entrée de la surverse dans le milieu marin. La concentration de matière en suspension continuait de diminuer dans les minutes suivant la surverse et restait légèrement supérieure aux niveaux naturels au bout d'une heure. La masse de sédiment rejetée par la surverse a été estimée à 58 t ($19,0\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$), soit $2,3\cdot 10^3\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$. **Par temps calme (morte eau et absence de houle), cela représentait une remise en suspension 5 à 6 fois supérieure à la remise en suspension naturelle.**

Le panache de fond était mineur en comparaison au panache de surface. En effet, il montrait une faible extension latérale et une concentration de matière en suspension relativement faible.

Les panaches de surface et benthique se mélangeaient rapidement (environ 10 minutes après le passage de la drague) à l'arrière de la drague pour former un panache global. Le panache global décantait en suivant une loi de type puissance. En même temps, l'obliquité des courants par rapport au cap de la drague entraînait une dispersion latérale du panache (jusqu'à 200 m), et la formation d'un nouveau tronçon de panache à chaque changement de cap de la drague. La succession de tronçons donnait une forme en chevron à l'ensemble du panache.

Pour un coefficient de marée de 80, la distance maximum des dépôts des sables de 225 µm et des fines sont respectivement de 550 m et de **3,2 km** pour un chargement débuté au flot, 2-3 h après la basse mer. Ces valeurs rejoignent les résultats acquis à la fin des années 80. Une heure après la surverse, la concentration de matière en suspension atteignait les valeurs naturelles. **Par conséquent, la durée de l'impact lié à la génération d'un panache turbide (durée de chargement x durée de vie d'une section de panache) était équivalente à 3-4 heures.**

3. Modification de la topographie du fond marin

L'étude réalisée pour caractériser les impacts morpho-sédimentaires sur le site « Granulats marins de Dieppe » a été menée, toujours dans le cadre du GIS SIEGMA, par l'UMR CNRS 6143, avant 2010 (Desprez, 2000; Desprez et al., 2010; Le Bot et al., 2010).

3.1. Impact à l'échelle du périmètre d'extraction

Les différents levés bathymétriques montrent que sur le site de « Granulats marins de Dieppe », l'extraction ne génère pas de véritable souille. Elle entraîne plutôt un abaissement général des reliefs existants, en érodant les cordons de galets fossiles et tend donc, à une homogénéisation de la topographie. La comparaison des levés bathymétriques, montre qu'entre 2007 et 2009, les zones en érosion correspondaient une surface d'environ 4,5 km² et les zones d'accrétion à une surface d'environ 1,5 km². Sur l'ensemble du périmètre de la concession, la différence moyenne de profondeur entre 2007 et 2009 était d'environ 20 centimètres. Seules deux zones présentaient une érosion maximale de 2 m et les zones où l'érosion était supérieure à 1 m étaient restreintes à des bandes de 50-100 m de long. **Les**

conclusions du rapport stipulent que l'extraction de granulats marins a un impact direct et permanent sur la topographie du fond marin en ponctionnant les cordons de galets fossiles qui ne peuvent être rechargés par le transit sédimentaire naturel. Les mesures effectuées en 2007 n'étant pas aussi précises et réalistes que celles de 2009, une homogénéisation de la résolution des données a été nécessaire. Cependant, les experts de l'Ifremer regrettaient que la méthode utilisée pour comparer les deux jeux de données ainsi que la méthode de correction des biais éventuels n'aient pas été décrites plus en détail.

Il n'y a, à notre connaissance, pas eu de comparaison entre les levés historiques et le levé bathymétrique de 2009 (le plus récent). Par conséquent, il est difficile d'avoir un véritable aperçu de l'impact à long terme de l'extraction sur la topographie du fond marin.

3.2. Impact à l'échelle des sillons d'extraction

Les données de réflectivité des fonds marins acquises par sonar à balayage latéral révèlent la présence de sillons sur le fond marin. Cependant, les sillons des dragages isolés n'ont pas été repérés et **seuls les sillons laissés par des dragages répétés ont été détectés.** Ils présentaient des pentes inférieures à 10%. Ainsi, à haute résolution, **l'extraction augmente la rugosité du fond marin.**

Les études conduites par le GIS SIEGMA renseignent sur l'évolution des sillons dans le temps. Ceux-ci **se combleraient rapidement de sable** entre deux campagnes et/ou en hiver (arrêt des dragages et conditions hydrodynamiques plus intenses). La pente des sillons récents variait entre 5 et 10° tandis que celle des sillons anciens était comprise entre 2 et 5 degrés. Le dépôt de sables fins dans les zones de dépression (*e.g.* sillons) et/ou les cordons de galets peut s'accompagner de la formation de mégarides. Environ 10 ans après l'arrêt des extractions, les sillons étaient intégralement remplis à certains endroits et recouverts par des corps sédimentaires sablo-graveleux (rubans, dunes) mais restaient visibles à d'autres endroits, entre les crêtes de galets.

Les auteurs de l'étude d'impact portée au dossier de demande d'autorisation d'ouverture de travaux miniers de la Concession « Granulats marins de Dieppe » (2010) concluaient que le creusement de sillons est temporaire. Cependant, cette conclusion est probablement abusive au vu des résultats des travaux menés par le GIS SIEGMA signalant que les sillons restaient visibles 10 ans après l'arrêt des extractions et que le dépôt de sables (piégeage dans les sillons) participant à la dynamique sédimentaire, s'il peut conduire à atténuer l'empreinte

morphologique des extractions, contribue aussi à la modification de la nature des fonds marins.

4. Modification de la nature du fond marin

La comparaison des mosaïques d'imagerie acoustique obtenue grâce au sonar à balayage latéral en juillet 2002 et en janvier 2007, montre que **l'activité minière modifie la nature du fond marin**, selon les secteurs et l'intensité du dragage. Ainsi, dans la zone d'extraction intensive, 40% de la surface restait stable entre les deux périodes, tandis que 40% de la surface tendait vers une augmentation de la taille des grains sédimentaires. Enfin, 20% de la surface montrait un affinement des sédiments entre 2002 et 2007. Dans les zones sous influence de la surverse et en cours de recolonisation (depuis 15 ans), la taille des grains avait diminué entre les deux périodes suivies (2002 et 2007). Pour résumer, à **l'échelle du périmètre de la concession, le dragage augmente l'hétérogénéité des habitats avec (i) des sillons en partie comblés par des sables fins, (ii) des crêtes de galets préservées entre chaque sillon, (iii) des zones sableuses provenant de la décantation des eaux de surverse.** Les sables fins représentent, selon les experts de l'Ifremer, « *des habitats temporaires dont l'existence ne tient qu'à l'activité de dragage* ».

La synthèse des études conduites par le GIS SIEGMA (Desprez et al., 2012) conclut que **l'accroissement de l'hétérogénéité de la couverture sédimentaire est identifié comme un marqueur de perturbation des fonds par l'extraction tandis qu'une teneur en sables fins supérieurs à 10% constitue un indicateur du dépôt des panaches de surverse.**

5. Incidence de l'extraction sur le littoral

Dans son courrier du 28 octobre 2011, l'Ifremer précisait que l'institut n'était pas en mesure d'apporter une expertise sur l'incidence de l'extraction sur l'érosion littorale en raison de l'absence de programme de recherche y étant dédié. Par conséquent, les résultats portant sur ce volet sont seulement fournis à titre indicatif.

L'étude conduite par Baas (Université d'Utrecht - Pays-Bas) et Lafite (Université de Rouen) et dont les résultats sont présentés dans l'étude d'impact, modélise l'effet de plusieurs scénarios de creusements (1, 2 et 3 m) sur les conditions hydrodynamiques. Cette étude suggère que, quel que soit le scénario d'approfondissement, **l'extraction aurait un effet relativement faible sur les houles à la côte.** De plus, la préservation d'une partie du cordon de galet sur le site d'extraction devrait atténuer l'énergie de la houle. Cependant, il demeure

un certain nombre d'inconnus et/ou de biais dans la paramétrisation du modèle (absence de prise en compte de la rugosité induite par les sillons et du haut-fond de la partie sud du cordon fossile). Cette étude avait conduit à la formulation de recommandations telles que (i) procéder à une extraction par taches, (ii) maintenir du sédiment grossier en couverture et (iii) réaliser préférentiellement les extractions en suivant des routes parallèles à la côte.

6. Impact sur le compartiment benthique

Impact sur le compartiment benthique

Les résultats obtenus *via* les suivis GIS SIEGMA sont présentés dans la synthèse de Desprez (2012). Trois secteurs ont été étudiés. Le premier correspondait à un secteur de dragage, le deuxième correspondait à une zone de jachère, peu exploitée, et le troisième secteur n'a pas fait l'objet de dragage mais subissait l'influence de la surverse provenant du site mitoyen « Gris-Nez ». Les paramètres biologiques (richesse spécifique, abondance, biomasse) estimés dans chaque secteur ont été comparés à ceux d'un secteur de référence, non-impacté (non dragué et non exposé à la surverse de « Gris-Nez »).

Les résultats indiquent que, sur le site de dragage, la richesse spécifique, l'abondance et la biomasse étaient réduites de 77%, 92% et de 96% par rapport au secteur de référence, respectivement. Sur le site en jachère (peu exploité), la réduction de richesse spécifique et de biomasse était relativement limitée (réduction d'environ 40% et 50% par rapport au secteur de référence). En revanche, l'abondance était nettement supérieure à celle du secteur de référence en raison d'une recolonisation de type opportuniste (les espèces responsables de cette augmentation d'abondance ne sont pas indiquées dans la synthèse de Desprez). Dans le secteur non dragué mais exposé à la surverse, la richesse spécifique, l'abondance et la biomasse étaient considérablement réduites par rapport au site de référence. Cette diminution était de l'ordre de 30%, 50% et 20%, respectivement.

Résilience des peuplements benthiques

La synthèse de Desprez indique que, sur un quatrième site (en cours de recolonisation), anciennement exploité et suivi entre 1995 et 2010, la résilience de la richesse spécifique était relativement rapide. En effet, 2 ans après l'arrêt des extractions, la richesse spécifique était 20% inférieure à l'état de référence. Au bout de 7 ans, la résilience de la richesse spécifique était totalement achevée. Un suivi réalisé 15 ans après l'arrêt des extractions confirmait le retour aux valeurs de l'état initial.

Par contre, la résilience de l'abondance et de la biomasse n'étaient pas achevée au bout de 15 ans. En effet, l'abondance était nettement supérieure à l'état de référence (+150%, les espèces responsables de cette augmentation ne sont pas précisées dans la synthèse). La biomasse présentait un patron différent. En effet, malgré une augmentation brutale 2 ans après la fin des extractions, la biomasse restait encore à 60% des valeurs de références, 15 ans après la fin des extractions.

Les peuplements benthiques restaient donc toujours dans un état altéré 15 ans après la fin des extractions.

7. Impact sur les ressources halieutiques

Impact sur la structure du peuplement halieutique

Les campagnes halieutiques, conduites entre 2004 et 2006 par le GIS SIEGMA, ont révélé que la richesse spécifique était plus élevée au sein du site d'extraction et du site sous influence de la surverse par rapport aux stations de référence. Cependant, il convient de rester prudent quant à cet effet « positif » lié à l'extraction, qui pourrait résulter de l'attraction de certaines espèces s'alimentant de façon opportuniste au dépens des organismes morts et/ou extraits du sédiment lors du dragage ainsi que des organismes rejetés avec les eaux de surverse. Cette attraction est largement documentée dans le cas du passage d'un chalut sur le fond marin (e.g. Bergmann et al., 2002; Catchpole et al., 2006) et les études scientifiques s'accordent sur le caractère temporaire des attractions. De plus, selon les experts de l'Ifremer mandatés pour évaluer l'étude d'impact (qui reprend largement les études conduites par le GIS SIEGMA) « *l'échelle d'échantillonnage (dans l'espace et dans le temps) ne permet pas d'être aussi affirmatif* ». Les autres paramètres biologiques, abondance et biomasse, montraient, à l'inverse de la richesse spécifique, une diminution dans le périmètre exploité et le site exposé à la surverse. Pour l'abondance, cette diminution était respectivement de 35% et 47% sur les deux sites. La biomasse présentait une diminution de 29% sur le site de surverse par rapport aux stations de référence. L'identité des espèces dominant le peuplement halieutique était également variable selon le secteur étudié. Le lançon dominait le secteur de référence, la dorade grise présentait l'abondance et la biomasse les plus élevées dans le secteur d'extraction et enfin, la plie dominait le secteur exposé à la surverse.

L'analyse des contenus stomacaux des poissons démersaux a permis de relier les changements de la fréquentation des différents secteurs aux modifications dans la distribution spatiale de leur proie. Par exemple, les proies des dorades grises (petits crabes) sont essentiellement inféodées aux galets caractérisant le secteur d'extraction. A l'inverse, la plie et la sole se

nourrissent préférentiellement des annélides et des bivalves colonisant les sables fins du secteur de surverse. L'analyse des contenus stomacaux réalisée pour le rouget barbet a révélé un régime alimentaire très varié et des proies inféodées à différentes faciès sédimentaires. Ainsi, le rouget barbet, serait peu impacté par les extractions en raison de sa plasticité alimentaire.

Résilience des peuplements halieutiques

Suite à la mise en jachère d'une partie du PEX, la richesse spécifique a rapidement augmenté pour atteindre une valeur légèrement supérieure au niveau de référence (environ +20%), 2 ans après l'arrêt des extractions. En revanche, l'abondance et la biomasse restaient 30% et 20% inférieures aux valeurs de référence. Sur la zone en recolonisation depuis 15 ans, la richesse spécifique était très proche de celle des stations de référence. L'abondance et la biomasse présentaient quant à elles des valeurs très supérieures aux valeurs de référence (environ +80% et +60%, respectivement). Ainsi, les auteurs de l'étude d'impact avaient conclu qu' « *alors que le processus de recolonisation par la faune benthique est seulement en cours d'achèvement, il est important de souligner l'intérêt de ce secteur de recolonisation pour les poissons* ». De telles conclusions sont toutefois très hâtives car les données fournies dans l'étude d'impact rédigée par Hocer en 2010, montrent que les espèces dominantes ne sont pas les mêmes entre le site de référence et la zone en cours de recolonisation.

8. Conclusion

8.1. Un site unique en France et à l'international

La collaboration étroite avec les scientifiques et en particulier avec le GIS SIEGMA permet, même si certains éléments restent à approfondir, d'apporter des connaissances solides sur l'impact de cette activité sur les différents volets environnementaux. Toutefois, les résultats de ces études restent difficilement extrapolables à d'autres sites d'extraction dans la mesure où le site présente un environnement particulier (cordon de galets fossiles et environnement de haute énergie).

Il convient également de souligner que l'analyse des résultats et la compréhension des processus a été rendue possible grâce au croisement des données physiques et biologiques avec un indicateur spatialisé d'intensité de dragage. On ne peut donc qu'encourager l'utilisation d'un tel indicateur pour chaque suivi environnemental et ce, pour l'ensemble des sites d'extraction français.

8.2. Conclusion sur l'environnement physique

Les suivis environnementaux ont mis en évidence que l'extraction de granulats marins sur le site « Granulats marins de Dieppe » avait un fort impact sur l'environnement physique en modifiant la topographie du fond marin et la nature des fonds. Cet impact ne serait pas restreint au périmètre d'extraction mais pourrait s'étendre au-delà (jusqu'à 3km), en raison de la dispersion du panache turbide par les courants forts qui caractérisent cette région.

Il reste, à ce jour, difficile d'estimer le temps de résilience de l'environnement physique et de juger de la pérennité des dépôts de sédiments fins venant combler les sillons ou se déposant sur le fond par la décantation des eaux de surverse. La fréquence des événements de remise en suspension et d'advection de ces sables fins facilement remobilisables n'est en effet pas spécifiée. Des suivis complémentaires sont donc nécessaires pour déterminer si les dépôts de sédiments fins se maintiennent dans le temps.

8.3. Conclusion sur le compartiment benthique

L'extraction entraîne un impact fort, pouvant tendre vers une défaunation. L'arrêt de l'activité est suivi par une recolonisation rapide par des espèces pionnières. La résilience est quasiment achevée au bout de 7 ans. Cependant, le retour des peuplements à leur état initial n'est possible qu'à la condition que les changements dans la structure sédimentaire restent dans des limites acceptables car les zones où la surverse avait modifié la nature du fond marin montraient des paramètres biologiques réduits par rapport à l'état de référence. L'étude conduite par Cooper (2012) en Angleterre propose d'ailleurs une méthode permettant de définir un taux de modification de l'habitat « tolérable » permettant une résilience du milieu.

Le dépôt des sédiments de surverse et le piégeage des sédiments transportés naturellement (venant combler les sillons) conduisent à un affinement de la granulométrie et freine la résilience biologique dans des secteurs de sédiment grossiers. Les experts de l'Ifremer précisent que « *les cordons de galets sont très riches du côté français. Leur intérêt écologique est encore méconnu et potentiellement important. La suppression de cette strate correspondra donc bien à une perte d'habitat de rôle non-négligeable et dont la restauration ne pourra s'opérer, compte tenu du caractère fossile du substrat qui le compose* ».

Les objectifs des suivis étaient variables d'une année à l'autre ce qui a conduit à une modification des protocoles d'échantillonnage. Par conséquent, il est relativement difficile de comparer les suivis entre eux et donc d'avoir une idée de l'évolution à long terme du site de « Granulats marins de Dieppe ». Comme le souligne les experts de l'Ifremer, « *la volonté de conduire un suivi bio-sédimentaire annuel standardisé pendant toute la durée de la*

concession ne peut être que soutenue. La stratégie proposée, basée sur 20 stations, doit être considérée comme minimale. Si d'autres objectifs apparaissaient pertinents [...] une ou des grilles(s) complémentaire(s) de stations devront être mis(es) en œuvre sans empiéter en aucun cas sur la stratégie de base proposée ».

8.4. Conclusion sur le compartiment halieutique

Contrairement à ce qui a été observé pour la macrofaune benthique, l'impact de l'extraction de granulats marins est limité sur les peuplements benthodémersaux. L'impact maximal est observé dans la zone affectée par les dépôts de surverse. Les modifications de la nature des fonds couplées aux changements dans la composition des espèces benthiques, ont conduit à des modifications dans le régime alimentaire des poissons ainsi qu'à des changements de fréquentation entre les différents habitats générés par l'activité d'extraction.

Annexe 7. Extraction de granulats marins : cadre réglementaire et évolution au cours des vingt dernières années

Rédigé par Jean-François MORAS (DGALN/DEB/EARM2) et Laure SIMPLET (Ifremer Brest PDG/REM/GM/LGS)

1. Présentation de l'encadrement réglementaire en vigueur concernant l'extraction de granulats marins¹⁴

Depuis la codification opérée par l'ordonnance n° 2011-91 du 20 janvier 2011 portant codification de la partie législative du code minier, les extractions de granulats marins relèvent des sections 1 et 2 du chapitre 3 du titre III du livre Ier du code minier (articles L. 133-1 à L. 133-13 du code minier).

Cette activité est subordonnée à l'obtention de plusieurs actes administratifs :

- un titre minier ;
- une autorisation d'ouverture de travaux.

Les dispositions réglementaires relatives aux conditions d'instruction des demandes correspondantes sont précisées par le décret n° 2006-798 du 6 juillet 2006 relatif à la prospection, à la recherche et à l'exploitation de substances minérales ou fossiles contenues dans les fonds marins du domaine public et du plateau continental métropolitains.

Lorsque le périmètre sollicité se situe à l'intérieur du domaine public maritime (soit jusqu'à 12 milles nautiques de la ligne de base).

Une autorisation d'occupation temporaire du domaine public maritime, dite "autorisation domaniale", est également requise. Ses modalités d'instruction sont elles aussi définies par le décret du 6 juillet 2006 précité.

Ces trois procédures peuvent être conduites simultanément. En effet, si les demandes de titre minier pour l'exploitation de granulats marins doivent systématiquement être accompagnées d'une demande d'autorisation d'occupation temporaire du domaine public maritime lorsque celui-ci est concerné par le périmètre sollicité, les textes offrent également aux pétitionnaires la faculté de présenter conjointement à la demande de titre minier une demande d'autorisation

¹⁴ Pour plus d'informations se reporter au site [mineralinfo.fr](http://www.mineralinfo.fr/page/reglementation-applicable-lextraction-materiaux-marins) : <http://www.mineralinfo.fr/page/reglementation-applicable-lextraction-materiaux-marins>

d'ouverture de travaux miniers. Dans ce cas, l'instruction des différentes demandes est coordonnée par le préfet et, lorsqu'elle est différente, l'autorité compétente en matière d'occupation du domaine public maritime, qui sont alors tenus de délivrer les autorisations d'ouverture de travaux minier et d'occupation temporaire du domaine public dans les deux mois qui suivent l'octroi du titre minier, en cas d'issue favorable de la procédure.

La durée de cette procédure est variable d'un projet à un autre. Si les textes prévoient que le silence gardé par le ministre sur la demande de titre d'exploitation vaut rejet au bout de trois ans, les dossiers ayant fait l'objet de décisions récentes révèlent des durées d'instruction qui peuvent atteindre les sept ans.

2. Prise en compte de l'environnement et de la séquence Eviter-Réduire-Compenser pour ce qui concerne spécifiquement l'extraction de granulats marins

Lorsqu'une demande d'autorisation d'ouverture de travaux est déposée, il est nécessaire, entre autre, de fournir une étude d'impact sur l'environnement afin, notamment, de décrire l'état de référence du site, d'analyser les effets du futur projet sur l'environnement et de définir des mesures d'évitement, de réduction et de compensation (ERC) de ces effets. Cette étude d'impact est établie conformément aux dispositions du code de l'environnement.

MESURE "ERC" inscrites dans les arrêtés préfectoraux d'ouverture de travaux miniers	INTERET	NOMBRE DE SITE (sur 19)
Interdiction du traitement des matériaux à bord	Eviter un changement de nature des fonds et limitation du panache turbide	19
Réalisation d'une extraction homogène, atténuation des pentes bordières de la souille, dragage de finition	Limiter les effets sur la morphologie des fonds notamment pour maintenir les pratiques de pêches	17
Garantir que la couche sédimentaire restituée en fin d'extraction sera similaire à celle qui prévalait	Favoriser la recolonisation par la faune benthique	17
Maintien d'une épaisseur sédimentaire minimum	Eviter la mise à nu du substratum rocheux (modification des habitats et gêne à la pratique de la pêche),	12
Limitation de la profondeur d'extraction	Limiter les effets sur la morphologie des fonds et donc sur l'hydrodynamique, éviter de mettre à jour le substratum ou une couche sédimentaire de nature différente	11
Période(s) d'arrêt des extractions	Respecter les cycles de vie des ressources halieutiques (période de frai,...) et éviter une gêne lors de périodes de pêche (coquille saint-jacques par ex.)	9
Zonage de l'extraction (par bandes, jachère)	Favoriser la recolonisation par la faune benthique	6
Extraction réalisée dans la direction des courants dominants	Limiter les effets du panache turbide, favoriser le comblement des sillons par la dynamique sédimentaire naturelle	5

Tableau 1 : Synthèse des mesures ERC inscrites dans les arrêtés préfectoraux d'ouverture de travaux miniers des 19 sites ayant une concession valide en 2017.

L'autorisation d'ouverture de travaux impose un suivi environnemental (à minima tous les 5 ans) afin de s'assurer de la pertinence des mesures ERC mises en œuvre, de contrôler que les effets du projet sont en cohérence avec les prévisions faites dans l'étude d'impact sur l'environnement et éventuellement de détecter des dégradations qui n'auraient pu être anticipées.

TYPE DE SUIVI (Inscrit dans l'arrêté préfectoral d'ouverture de travaux miniers ; des mesures de suivi ont donc pu être préconisées et mises en place ultérieurement)	NOMBRE DE SITE (sur 19)
Suivi Quinquennal morpho-bathymétrique et morpho-sédimentaire (*triennal ou quadriennal = durée d'exploitation d'une bande)	19 (dont 2 [*])
Suivi Quinquennal bio-sédimentaire (*triennal ou quadriennal = durée d'exploitation d'une bande)	19 (dont 2 [*])
Suivi Quinquennal halieutique (*triennal ou quadriennal = durée d'exploitation d'une bande)	16 ^{**} (dont 2 [*])
Suivi Quinquennal de l'hydrodynamique et de la dynamique sédimentaire/ du trait de côte (modélisation sur la base de l'approfondissement mesuré)	4
Suivi Quinquennal de la chimie des sédiments ou des masses d'eaux	2
Suivi Quinquennal d'incidence sur zones Natura2000	1
Suivi Quinquennal de la turbidité	1
Suivi Quinquennal de l'épaisseur des sédiments	1
Suivi Intermédiaire morpho-bathymétrique (annuel ou bis- à trisannuel)	5
Suivi Intermédiaire bio-sédimentaire (annuel, bisannuel ou trimestriel pendant 2 ans puis annuel pendant 3 ans)	5
Suivi Annuel de la turbidité	2
Suivi Annuel de la ressource halieutique, de l'activité de pêche ou d'une espèce particulière (<i>ie. lançon</i>)	2
Suivi post-exploitation généralement jusqu'à 5 ans après fin des extractions (seul le site "Baie de Seine" indique jusqu'à recolonisation)	13 ^{***}

*** les sites Chassiron C et E non comptabilisés ont pourtant un suivi halieutique quinquennal dans le cadre du suivi conjoint des périmètres Chassiron*

**** les sites n'ayant pas obligation d'un suivi post-extraction ont toutefois obligation de réaliser un état de référence de fin de travaux*

Tableau 2 : Synthèse des thématiques faisant l'objet d'un suivi environnemental et inscrites dans les arrêtés préfectoraux d'ouverture de travaux miniers des 19 sites ayant une concession valide en 2017.

Au cours des vingt dernières années le cadre réglementaire accompagnant les activités d'extraction en mer a évolué et a conduit à dessiner une nouvelle configuration du paysage « extractif ». Cette évolution s'est opérée dans un contexte de prise en considération croissante des préoccupations d'ordre environnemental. Le contenu des documents à produire (étude d'impact sur l'environnement, suivi environnemental) a donc été étoffé par l'augmentation d'éléments justificatifs devant être apportés au dossier ; de nouvelles pratiques ont également été adoptées afin de suivre les évolutions techniques et les recommandations issues des travaux scientifiques.

3. Bref historique des évolutions réglementaires concernant les granulats marins

Historiquement, c'est la loi n° 68-1181 du 31 décembre 1968, relative à l'exploitation du plateau continental, qui a soumis la recherche et l'exploitation des substances minérales des fonds du plateau continental, quelles qu'elles soient, au régime des mines.

Pour ce qui concerne la mer territoriale, c'est-à-dire à l'époque la bande côtière des 3 milles, la dualité du régime entre les substances des mines et les substances de carrières, qui prévalait, a été conservée. L'exploitation des substances de carrières y relevait donc de l'article 106 du code minier¹⁵. L'exploitation de certaines algues ou débris d'algues (cas du

¹⁵ Art. 106 du code minier :

- rédaction en vigueur de 1956 à 1970 : « L'exploitation d'une carrière doit être déclarée au maire de la commune, qui transmet la déclaration au préfet ».

maërl) étant par ailleurs encadrée par de simples « autorisations de pêche » délivrées au profit de marins pêcheurs, inscrits maritimes.

L'extension de la mer territoriale de 3 à 12 milles, du fait de la loi n° 71-1060 du 24 décembre 1971 relative à la délimitation des eaux territoriales françaises, a eu pour résultat de soustraire au régime du plateau continental et, par conséquence, du code minier, les fonds marins sur une largeur de 9 milles supplémentaires, c'est-à-dire en fait sur la partie du plateau qui est la plus accessible à la recherche et à l'exploitation des sables et graviers. Afin de corriger cette situation, la loi n° 76-646 du 16 juillet 1976 relative à la prospection, à la recherche et à l'exploitation des substances minérales non visées à l'article 2¹⁶ du code minier et contenues dans les fonds marins de domaine public métropolitain est alors venue étendre aux granulats marins le régime des mines¹⁷. Cette loi a toutefois exclu de son champ d'application les exploitations d'amendements marins (cf. art. 7¹⁸ de ladite loi). Il s'agissait alors de préserver une activité artisanale, exercée par des personnes de condition très modeste (cf. discussion au Sénat sur l'article 7 du projet de loi¹⁹). Cette activité étant d'ailleurs soutenue par le crédit maritime mutuel²⁰.

Ce n'est alors qu'en 1997, avec l'article 57 de la loi n° 97-1051 du 18 novembre 1997 d'orientation sur la pêche maritime et les cultures marines, que l'application des règles fixées par le code minier a été étendue aux extractions d'amendements marins, en différant leur application au renouvellement de la demande du titre d'exploitation²¹. Elle a également étendu l'application de la loi du 16 juillet 1976 au domaine public maritime des départements d'outre-mer.

- rédaction en vigueur à partir de 1970 : « Sous réserve des cas fixés par décret en Conseil d'État, la mise en exploitation de toute carrière par le propriétaire ou ses ayants droit est subordonnée à une autorisation délivrée par le préfet, après consultation des services ministériels compétents et des collectivités locales. ... »

¹⁶ A présent codifié à l'article L. 111-1 du code minier

¹⁷ Art. 1 de la loi n° 76-646 du 16 juillet 1976 (extrait) : « Sans préjudice des dispositions relatives au domaine public maritime et sous réserve des dispositions de l'article 3 de la présente loi et du deuxième alinéa du présent article, la recherche et l'exploitation des substances minérales non visées à l'article 2 du code minier et contenues dans les fonds marins appartenant au domaine public métropolitain sont soumises au régime prévu par le code minier pour les gisements appartenant à la catégorie des mines. »

¹⁸ https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000000322731&pageCourante=04277

¹⁹ http://www.senat.fr/comptes-rendus-seances/5eme/pdf/1975/06/s19750624_1905_2046.pdf (Sénat - séance du 24 juin 1975 – page 1943).

²⁰ Loi n° 75-628 du 11 juillet 1975 relative au crédit maritime mutuel, art. 1 : « Conformément aux orientations définies par le ministre chargé des pêches maritimes, le crédit maritime mutuel a pour objet de faciliter le financement des opérations et des investissements relatifs aux pêches maritimes, aux cultures marines et aux activités qui s'y rattachent, ainsi qu'à l'extraction des sables, graviers et amendements marins et à la récolte des végétaux provenant de la mer ou du domaine maritime.... ».

²¹ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000751904&categorieLien=id>.

L'application des lois précitées a donc rendu possible, pour les granulats marins, la délivrance des trois types de titres miniers alors en vigueur, à savoir : le Permis Exclusif de Recherches (PER) pour une exploration, le Permis d'Exploitation de Mines (PEX) délivré pour 5 ans et renouvelable 2 fois et la Concession Minière ; la loi limitant cependant, sur le domaine public maritime, la durée des concessions de granulats marins à 50 ans, sans renouvellement possible.

Réglementairement, les modalités d'application du code minier pour l'exploration ou l'exploitation des granulats marins ont été d'abord précisées par le décret n° 80-470 du 18 juin 1980 portant application de la loi n° 76-646 du 16 juillet 1976 relative à la prospection, à la recherche et à l'exploitation des substances minérales non visées à l'article 2 du code minier et contenues dans les fonds marins du domaine public métropolitain.

La loi n° 94-588 du 15 juillet 1994, modifiant certaines dispositions du code minier et l'article L. 711-12 du code du travail, a en particulier supprimé le Permis d'Exploitation de Mines (PEX). Tirant les conséquences de cette loi, les décrets n° 95-427 du 19 avril 1995 relatif aux titres miniers et n° 95-696 du 9 mai 1995 relatif à l'ouverture des travaux miniers et à la police des mines ont supprimé le PEX de l'ordonnancement réglementaire au profit de la Concession Minière²². Les sites d'extraction qui étaient régis par un PEX n'étaient pas contraints à un suivi environnemental au cours de la durée de leur validité (5 ans) et leur renouvellement conduisait à produire une nouvelle étude d'impact qui n'intégrait pas nécessairement les éventuels effets de l'exploitation antérieure (l'état initial pris en référence correspondant à un état « post-exploitation » ayant subi d'éventuelles perturbations)²³. Les sites d'extraction qui ont perduré sous le régime de la concession n'ont donc pas à proprement parler été soumis au suivi environnemental avant l'obtention d'une concession (3 sites concernés).

Comme indiqué supra, en 1997, les substances calcaires dont l'extraction est une spécificité de la région Bretagne, ont été rattachées au code minier par la loi n° 97-1051 du 18 novembre 1997 (elles étaient auparavant considérées comme des produits de « pêche »), nécessitant une mise en conformité des sites historiques d'extraction de matériaux calcaires. Cela a pris près d'une dizaine d'année (2 sites sur 4 concernés par cette évolution sont encore en cours d'instruction pour l'obtention d'un titre minier). Il convient également de préciser que 2 demandes de concessions pour « mise en conformité » ont été abandonnées par les

²² Le PEX reste toutefois toujours en vigueur au large des DROM.

²³ Il ne s'agit pas ici de considérer le PEX comme un titre minier de moindre exigence environnementale mais de rappeler qu'il a eu cours, en France métropolitaine, à une période de prise en compte moindre des effets des activités sur les écosystèmes.

pétitionnaires au cours de leur instruction et qu'en 2013, l'interdiction d'extraire du maërl a conduit à la fermeture de 4 sites d'extraction.

Enfin en 2006, le décret n° 2006-798 du 6 juillet 2006 relatif à la prospection, à la recherche et à l'exploitation de substances minérales ou fossiles contenues dans les fonds marins du domaine public et du plateau continental métropolitains a instauré une harmonisation du régime juridique avec notamment (i) la mise en place de la procédure conjointe permettant au demandeur de **déposer des demandes conjointes pour le titre minier, l'autorisation d'ouverture de travaux (AOT) et le cas échéant l'autorisation d'occupation temporaire du domaine public maritime** (la procédure disjointe, consistant à présenter la demande d'autorisation d'ouverture de travaux après l'obtention du titre minier, reste néanmoins disponible pour les pétitionnaires qui le souhaiteraient), (ii) la création d'une instance de concertation intégrée aux procédures d'autorisation sous l'égide du préfet instructeur et du préfet maritime, avant transmission du dossier de demande au Ministre chargé des mines. Depuis la signature de ce décret, 7 concessions minières ont été accordées selon cette formule, soit le tiers des sites bénéficiant d'un titre minier en France métropolitaine.

Références bibliographiques

- Balvanera, P., Pfisterer, A.B., Buchmann, N., He, J.S., Nakashizuka, T., Raffaelli, D., Schmid, B., 2006. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services 9, 1146–1156. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00963.x>
- Bennett, D., Brown, C., 1983. Crab (*Cancer pagurus*) migrations in the English Channel. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 63, 371–398.
- Bergmann, M., Wiczorek, S., Atkinson, R., Moore, P., 2002. Utilization of invertebrates discarded from the Nephrops fishery by variously selective benthic scavengers in the west of Scotland. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.* 233, 185–198.
- Birchenough, S.N., Boyd, S.E., Vanstaen, K., Coggan, R.A., Limpenny, D.S., 2010. Mapping an aggregate extraction site off the Eastern English Channel: a methodology in support of monitoring and management. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 87, 420–430.
- Birklund, J., Wijsman, J., 2005. Aggregate extraction: A review on the effect of ecological functions. *Sand Pit Rep. WL Z3297*.
- Bolam, S.G., 2012. Impacts of dredged material disposal on macrobenthic invertebrate communities: A comparison of structural and functional (secondary production) changes at disposal sites around England and Wales. *Mar. Pollut. Bull.* 64, 2199–2210.
- Boyd, S., Cooper, K., Limpenny, D., Kilbride, R., Rees, H., Dearnaley, M., Stevenson, J., Meadows, W., Morris, C., 2004. Assessment of the re-habilitation of the seabed following marine aggregate dredging. *Sci. Ser. Tech. Rep. Cent. Environ. Fish. Aquac. Sci.* 121, 154.
- Boyd, S., Limpenny, D., Rees, H., Cooper, K., 2005. The effects of marine sand and gravel extraction on the macrobenthos at a commercial dredging site (results 6 years post-dredging). *ICES J. Mar. Sci.* 62, 145–162.
- Boyd, S.E., Rees, H.L., 2003. An examination of the spatial scale of impact on the marine benthos arising from marine aggregate extraction in the central English Channel. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 57, 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00313-X](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00313-X)
- Bradshaw, C., Tjensvoll, I., Sköld, M., Allan, I.J., Molvaer, J., Magnusson, J., Naes, K., Nilsson, H.C., 2012. Bottom trawling resuspends sediment and releases bioavailable contaminants in a polluted fjord. *Environ. Pollut.* 170, 232–241.
- Bremner, J., 2008. Species' traits and ecological functioning in marine conservation and management 366, 37–47.
- Bremner, J., Frid, C.L., Rogers, S.I., 2005. Biological traits of the North Sea benthos: does fishing affect benthic ecosystem function?
- Bremner, J., Frid, C.L.J., b, S.I.R., 2003. Assessing Marine Ecosystem Health: The Long-Term Effects of Fishing on Functional Biodiversity in North Sea Benthos.
- Cardinale, B.J., Srivastava, D.S., Duffy, J.E., Wright, J.P., Downing, A.L., Sankaran, M., Jouseau, C., 2006. Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems 443, 989–992. <https://doi.org/10.1038/nature05202>
- Catchpole, T.L., Frid, C.L.J., Gray, T.S., 2006. Importance of discards from the English Nephrops norvegicus fishery in the North Sea to marine scavengers. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 313, 215–226. <https://doi.org/10.3354/meps313215>
- Cooper, K., Barry, J., 2017. A big data approach to macrofaunal baseline assessment, monitoring and sustainable exploitation of the seabed. *Sci. Rep.* 7, 12431.

- Cooper, K., Boyd, S., Aldridge, J., Rees, H., 2007a. Cumulative impacts of aggregate extraction on seabed macro-invertebrate communities in an area off the east coast of the United Kingdom. *J. Sea Res.* 57, 288–302.
- Cooper, K., Boyd, S., Eggleton, J., Limpenny, D., Rees, H., Vanstaen, K., 2007b. Recovery of the seabed following marine aggregate dredging on the Hastings Shingle Bank off the southeast coast of England. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 75, 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.06.004>
- Cooper, K., Curtis, M., Hussin, W.W., Froján, C.B., Defew, E., Nye, V., Paterson, D., 2011. Implications of dredging induced changes in sediment particle size composition for the structure and function of marine benthic macrofaunal communities. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 2087–2094.
- Cooper, K., Eggleton, J., Vize, S., Vanstaen, K., Smith, R., Boyd, S., Ware, S., Morris, C., Curtis, M., Limpenny, D., others, 2005. Assessment of the re-habilitation of the seabed following marine aggregate dredging-part II. *Sci. Ser. Tech. Rep. Cent. Environ. Fish. Aquac. Sci.* 130, 82.
- Cooper, K.M., 2012. Setting limits for acceptable change in sediment particle size composition following marine aggregate dredging. *Mar. Pollut. Bull.* 64, 1667–1677.
- Cooper, K.M., Froján, C.R.S.B., Defew, E., Curtis, M., Fleddum, A., Brooks, L., Paterson, D.M., 2008. Assessment of ecosystem function following marine aggregate dredging. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 366, 82–91.
- Crain, C.M., Kroeker, K., Halpern, B.S., 2008. Interactive and cumulative effects of multiple human stressors in marine systems. *Ecol. Lett.* 11, 1304–1315.
- Davies, C., Hitchcock, D., 1992. Improving the Exploitation of Marine Aggregates by a Study of the Impact of Marine Mining Equipment. *Mar. Technol. Dir. Res. Grant GRG 20059*.
- de Jong, M.F., Baptist, M.J., Lindeboom, H.J., Hoekstra, P., 2015. Short-term impact of deep sand extraction and ecosystem-based landscaping on macrozoobenthos and sediment characteristics. *Mar. Pollut. Bull.* 97, 294–308.
- de Jong, M.F., Baptist, M.J., van Hal, R., de Boois, I.J., Lindeboom, H.J., Hoekstra, P., 2014. Impact on demersal fish of a large-scale and deep sand extraction site with ecosystem-based landscaped sandbars. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 146, 83–94.
- de Juan, S., Thrush, S.F., Demestre, M., 2007. Functional changes as indicators of trawling disturbance on a benthic community located in a fishing ground (NW Mediterranean Sea).
- Desprez, M., 2012. Synthèse bibliographique - L'impact des extractions de granulats marins sur les écosystèmes marins et la biodiversité, Les études de l'UNPG - Nature et paysage. Université de Rouen, CIEM.
- Desprez, M., 2000. Physical and biological impact of marine aggregate extraction along the French coast of the Eastern English Channel: short-and long-term post-dredging restoration. *ICES J. Mar. Sci.* 57, 1428–1438.
- Desprez, M., Pearce, B., Le Bot, S., 2010. The biological impact of overflowing sands around a marine aggregate extraction site: Dieppe (eastern English Channel). *ICES J. Mar. Sci.* 67, 270–277. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp245>
- Dickson, R., Rees, J., 1998. Impact of dredging plumes on Race Bank and surrounding areas. CEFAS LOWESTOFT Un-Publ. Final Rep. MAFF UK 15p.
- Duclos, P.A., 2012. Impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats sur les fonds marins de la Manche orientale. Ph. D. thesis. University of Rouen.
- Dutertre, M., Hamon, D., Chevalier, C., Ehrhold, A., 2013. The use of the relationships between environmental factors and benthic macrofaunal distribution in the

- establishment of a baseline for coastal management. *ICES J. Mar. Sci. J. Cons.* 70, 294–308.
- Foden, J., Rogers, S.I., Jones, A.P., 2009. Recovery rates of UK seabed habitats after cessation of aggregate extraction. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 390, 15–26.
- Froján, C.R.B., Cooper, K.M., Bremner, J., Defew, E.C., Hussin, W.M.W., Paterson, D.M., 2011. Assessing the recovery of functional diversity after sustained sediment screening at an aggregate dredging site in the North Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 92, 358–366.
- Glemarec, M., 1969. Les peuplements benthiques du plateau continental Nord-Gascogne. Atelier offset de la Faculté des Sciences.
- Gray, J.S., 1997. Marine biodiversity: patterns, threats and conservation needs. *Biodivers. Conserv.* 6, 153–175.
- Greening, J., Kenny, A.J., 1996. The diet of Fish and Shellfish from Gravel Areas of England and Wales. Report to CEO and MAFF. Directorate of Fisheries Research, Burnham-on Crouch.
- Groenewold, S., Fonds, M., 2000. Effects on benthic scavengers of discards and damaged benthos produced by the beam-trawl fishery in the southern North Sea. *ICES J. Mar. Sci. J. Cons.* 57, 1395–1406.
- Halpern, B.S., Walbridge, S., Selkoe, K.A., Kappel, C.V., Micheli, F., D'agrosa, C., Bruno, J.F., Casey, K.S., Ebert, C., Fox, H.E., others, 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science* 319, 948–952.
- Hitchcock, D., Drucker, B., 1996. Investigation of benthic and surface plumes associated with marine aggregates mining in the United Kingdom. *Glob. Ocean. Oper. Oceanogr.* 221–284.
- Hitchcock, D., Newell, R., Seiderer, L., 1998. Investigation of benthic and surface plumes associated with marine aggregate mining in the United Kingdom—Final Report. Contract Rep. US Dep. Inter. Miner. Manag. Serv. Contract 0001–30763.
- Hitchcock, D.R., Bell, S., 2004. Physical impacts of marine aggregate dredging on seabed resources in coastal deposits. *J. Coast. Res.* 101–114.
- Hooper, D.U., Adair, E.C., Cardinale, B.J., Byrnes, J.E.K., Hungate, B.A., Matulich, K.L., Gonzalez, A., Duffy, J.E., Gamfeldt, L., Oâ€™Connor, M.I., 2012. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature* 486, 105–108.
- Hooper, D.U., Chapin, F., Ewel, J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J., Lodge, D., Loreau, M., Naeem, S., others, 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecol. Monogr.* 75, 3–35.
- Hussin, W.R.W., Cooper, K.M., Froján, C.R.B., Defew, E.C., Paterson, D.M., 2012. Impacts of physical disturbance on the recovery of a macrofaunal community: a comparative analysis using traditional and novel approaches. *Ecol. Indic.* 12, 37–45.
- Hwang, S.W., Lee, H.G., Choi, K.H., Kim, C.K., Lee, T.W., 2013. Impact of Sand Extraction on Fish Assemblages in Gyeonggi Bay, Korea. *J. Coast. Res.* 30, 1251–1259.
- Kaiser, M., Spencer, B., 1994. Fish scavenging behaviour in recently trawled areas. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* Oldendorf 112, 41–49.
- Kenchington, E.L., Kenchington, T.J., Henry, L.-A., Fuller, S., Gonzalez, P., 2007. Multi-decadal changes in the megabenthos of the Bay of Fundy: the effects of fishing. *J. Sea Res.* 58, 220–240.
- Kenny, A.J., Rees, H.L., 1994. The effects of marine gravel extraction on the macrobenthos: Early post-dredging recolonization. *Mar. Pollut. Bull.* 28, 442–447. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(94\)90130-9](https://doi.org/10.1016/0025-326X(94)90130-9)

- Kortekaas, S., Bagdanaviciute, I., Gyssels, P., Huerta, J.M.A., Héquette, A., 2010. Assessment of the effects of marine aggregate extraction on the coastline: an example from the German Baltic Sea coast. *J. Coast. Res.* 205–214.
- Le Bot, S., Lafite, R., Fournier, M., Baltzer, A., Desprez, M., 2010. Morphological and sedimentary impacts and recovery on a mixed sandy to pebbly seabed exposed to marine aggregate extraction (Eastern English Channel, France). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 89, 221–233.
- Limpenny, D., Boyd, S., Meadows, W., Rees, H., 2002. The utility of habitat mapping techniques in the assessment of anthropogenic disturbance at aggregate extraction sites. *ICES CM.*
- Lopes, V., Silva, P., Bertin, X., Fortunato, A., Oliveira, A., 2009. Impact of a dredged sandpit on tidal and wave hydrodynamics. *J. Coast. Res.* 529–533.
- Marchal, P., Desprez, M., Vermard, Y., Tidd, A., 2014. How do demersal fishing fleets interact with aggregate extraction in a congested sea? *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 149, 168–177.
- Menegaki, M., Kaliampakos, D., 2010. European aggregates production: Drivers, correlations and trends. *Resour. Policy* 35, 235–244.
- Newell, R., Hitchcock, D., Seiderer, L., 1999. Organic enrichment associated with outwash from marine aggregates dredging: a probable explanation for surface sheens and enhanced benthic production in the vicinity of dredging operations. *Mar. Pollut. Bull.* 38, 809–818.
- Newell, R., Seiderer, L., Hitchcock, D., 1998. The impact of dredging works in coastal waters: a review of the sensitivity to disturbance and subsequent recovery of biological resources on the sea bed. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 36, 127–178.
- Newell, R., Seiderer, L., Simpson, N., Robinson, J., 2004. Impacts of marine aggregate dredging on benthic macrofauna off the south coast of the United Kingdom. *J. Coast. Res.* 115–125.
- Pearce, B., 2008. The Significance of Benthic Communities for Higher Levels of the Marine Food Web at Aggregate Dredge Sites Using the Ecosystem Approach. *Mar. Ecol. Surv. Ltd. Rep. Prep. Dep. Environ. Food Rural Aff. Aggreg. Levy Sustain. Fund Mar. Environ. Prot. Fund.*
- Phillips, M.R., 2008. Beach erosion and marine aggregate dredging: a question of evidence? *Geogr. J.* 174, 332–343.
- Queirós, A.M., Birchenough, S.N., Bremner, J., Godbold, J.A., Parker, R.E., Romero-Ramirez, A., Reiss, H., Solan, M., Somerfield, P.J., Colen, C., others, 2013. A bioturbation classification of European marine infaunal invertebrates. *Ecol. Evol.* 3, 3958–3985.
- Raoux, A., Tecchio, S., Pezy, J.-P., Lassalle, G., Degraer, S., Wilhelmsson, D., Cachera, M., Ernande, B., Le Guen, C., Haraldsson, M., others, 2017. Benthic and fish aggregation inside an offshore wind farm: Which effects on the trophic web functioning? *Ecol. Indic.* 72, 33–46.
- Robinson, J., Newell, R., Seiderer, L., Simpson, N., 2005. Impacts of aggregate dredging on sediment composition and associated benthic fauna at an offshore dredge site in the southern North Sea. *Mar. Environ. Res.* 60, 51–68. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2004.09.001>
- Schwarzer, K., 2010. Aggregate resources and extraction in the Baltic Sea: an introduction. *J. Coast. Res.* 165–172.
- Simonini, R., Ansaloni, I., Bonini, P., Grandi, V., Graziosi, F., Iotti, M., Massamba-N’Siala, G., Mauri, M., Montanari, G., Preti, M., others, 2007. Recolonization and recovery

- dynamics of the macrozoobenthos after sand extraction in relict sand bottoms of the Northern Adriatic Sea. *Mar. Environ. Res.* 64, 574–589.
- Szymelfenig, M., Kotwicki, L., Graca, B., 2006. Benthic re-colonization in post-dredging pits in the Puck Bay (Southern Baltic Sea). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 68, 489–498.
- Tecchio, S., Chaalali, A., Raoux, A., Rius, A.T., Lequesne, J., Girardin, V., Lassalle, G., Cachera, M., Riou, P., Lobry, J., others, 2016. Evaluating ecosystem-level anthropogenic impacts in a stressed transitional environment: The case of the Seine estuary. *Ecol. Indic.* 61, 833–845.
- Tillin, H., Houghton, A., Saunders, J., Hull, S., 2011. Direct and indirect impacts of marine aggregate dredging.
- Tillin, H.M., Hiddink, J.G., Jennings, S., Kaiser, M.J., 2006. Chronic bottom trawling alters the functional composition of benthic invertebrate communities on a sea-basin scale. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 318, 31–45.
- van Denderen, P.D., Bolam, S.G., Hiddink, J.G., Jennings, S., Kenny, A., Rijnsdorp, A.D., van Kooten, T., 2015. Similar effects of bottom trawling and natural disturbance on composition and function of benthic communities across habitats. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 541, 31–43.
- Van Lancker, V.R., Bonne, W.M., Garel, E., Degrendele, K., Roche, M., Van den Eynde, D., Bellec, V.K., Brière, C., Collins, M.B., Velegrakis, A.F., 2010. Recommendations for the sustainable exploitation of tidal sandbanks. *J. Coast. Res.* 151–164.
- Velegrakis, A.F., Ballay, A., Poulos, S.E., Radzevičius, R., Bellec, V.K., Manso, F., 2010. European marine aggregates resources: Origins, usage, prospecting and dredging techniques. *J. Coast. Res.* 1–14.
- Ware, S.J., Rees, H.L., Boyd, S.E., Birchenough, S.N., 2009. Performance of selected indicators in evaluating the consequences of dredged material relocation and marine aggregate extraction. *Ecol. Indic.* 9, 704–718. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.09.010>