



HAL
open science

Bioaccumulation dans les tissus des espèces marines fréquentant les sites d'immersion

Pascal Grégoire, Nor-Edine Abriak, Abdeljalil Zri

► To cite this version:

Pascal Grégoire, Nor-Edine Abriak, Abdeljalil Zri. Bioaccumulation dans les tissus des espèces marines fréquentant les sites d'immersion. Environnement, Ingénierie & Développement, 2008, N°51 - Juillet-Aout-Septembre 2008, pp.11-17. 10.4267/dechets-sciences-techniques.1472 . hal-03174067

HAL Id: hal-03174067

<https://hal.science/hal-03174067v1>

Submitted on 18 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Biocumulation dans les tissus des espèces marines fréquentant les sites d'immersion

Pascal Grégoire * - Nor-Edine Abriak ** - Abdeljalil Zri ***

* Port autonome, Dunkerque, France - Pgregoire@portdedunkerque.fr

** Ecole nationale supérieure des mines de Douai -

941, rue Charles-Bourseul, BP 10838 – 59508 DOUAI Cedex - abriak@ensm-douai.fr

***Ecole nationale supérieure des mines de Douai, France - zri@ensm-douai.fr

Résumé

L'activité portuaire joue un rôle stratégique pour l'économie nationale ou internationale et de nombreux ports réalisent des travaux de dragage conduisant à l'évacuation en mer de volumes importants de sédiments pour garantir l'accès des chenaux, des avant-ports et des bassins à la navigation commerciale.

Ces pratiques sont indispensables aux activités portuaires pour la sécurité maritime. Néanmoins, des préoccupations nouvelles basées sur la protection de l'environnement montrent que certaines opérations posent problème en regard des impacts potentiels sur les milieux aquatiques.

Les sédiments portuaires sont des mélanges complexes chargés le cas échéant de contaminants qui ne permettent plus systématiquement d'adopter le scénario classique de l'immersion pour évacuer les produits dragués, compte tenu des risques de transfert des contaminants vers le milieu marin.

Ces opérations doivent faire l'objet d'évaluation des risques sur l'environnement afin d'apprécier les impacts potentiels et d'étudier des scénarios alternatifs dans l'hypothèse d'une contamination excessive des sédiments à draguer.

L'objectif est donc de présenter notre démarche d'expertise basée sur l'évaluation de la bioaccumulation des espèces marines fréquentant les zones d'immersion en rendant plus transparent le processus d'évaluation environnementale qui peut influencer la méthode de mise en dépôt et le pilotage des opérations de dragage dans un contexte de développement durable.

Mots clés :

Sédiments, dragage, impact, immersion, contamination, bioaccumulation, espèces marines, développement durable.

I. Introduction

Le littoral portuaire de Dunkerque s'étend sur une longueur de côte de près de 20 km et constitue un instrument de transport commercial, point de jonction de la voie maritime et de la voie terrestre par où transitent de nombreuses marchandises (hydrocarbures, vracs industriels, agroalimentaire, produits manufacturés, conteneurs...).

Pour maintenir les capacités d'accueil, des travaux de dragage sont nécessaires. Les dragages d'entretien sont des opérations répétitives conduisant à l'évacuation de volumes importants de sédiments fins pour garantir l'accès des chenaux, des avant-ports et des bassins à la navigation commerciale.

Les sédiments portuaires constituent des mélanges complexes chargés le cas échéant de contaminants tels que métaux lourds et polluants organiques persistants qui peuvent générer des risques de transfert des contaminants vers le milieu marin.

L'étude de la bioaccumulation des espèces marines en lien avec les sédiments dragués et immergés au large du port de Dunkerque doit permettre d'évaluer le risque environnemental lié à un éventuel transfert des contaminants dans les espèces marines fréquentant les différentes zones d'immersion.

2. Problématique de l'immersion

La pratique des dragages n'est pas à remettre en cause, du fait des entraves à la navigation ou de l'incidence économique qui en résulteraient, mais elle ne peut être poursuivie qu'en prenant en considération les contraintes de préservation des écosystèmes côtiers. En effet, les immersions sont une voie de transfert des contaminants vers le milieu marin et il convient de prendre les dispositions de nature à en limiter les impacts sur les écosystèmes [Alzieu et al., 1999]. Les sédiments forment des dépôts chimiquement instables soumis à l'activité des bactéries et aux réactions susceptibles de modifier les stabilités chimiques et de favoriser la transformation des polluants tels que les métaux lourds qui peuvent être libérés dans la colonne d'eau et deviennent éventuellement biodisponibles [Boust et al., 1999]. Alzieu rappelle les valeurs extrêmes des variations des médianes annuelles des concentrations en contaminants dans les sédiments dragués pour les grands ports français des trois façades maritimes (tableau 1).

Tableau 1 - Concentrations en contaminants (mg/kg sec) [Alzieu et al., 1999]

Substances	N1	N2	Manche, Mer du Nord	Atlantique	Méditerranée
Mercuré	0,4	0,8	0,15-1,45	0,05-0,19	1,16-2,51
Cadmium	1,2	2,4	0,5-0,95	0,27-0,64	1-1,25
Arsenic	25	50	3,9-13,8	4,4-28,7	10,4-11,2
Plomb	100	200	36-59	41-75	93-357
Chrome	90	180	38-65	37-75	56-74
Cuivre	45	90	18-35	10-53	107-745
Zinc	276	552	105-175	60-180	274-506
Nickel	37	74	7,2-17	6-39	25

Les valeurs N1 et N2 correspondent aux seuils de qualité des sédiments réglementés par l'arrêté du 14 juin 2000.

Les lignes directrices OSPAR sur la gestion des sédiments de dragage définissent la surveillance comme l'ensemble des mesures effectuées qui permettent de vérifier les modifications constatées sur la zone d'immersion correspondant à l'hypothèse d'impact sur laquelle est basée la délivrance du permis d'immersion.

Notre stratégie de surveillance appliquée au Port autonome de Dunkerque est donc basée sur la vérification de l'hypothèse d'impact dans le cadre d'une démarche ascendante qui satisfait aux lignes directrices.

La méthodologie est fondée sur la détection des signes de perturbation de l'écosystème par l'analyse des tissus des espèces marines fréquentant les zones d'immersion pour caractériser les conditions du milieu et estimer d'éventuels impacts sanitaires.

3. La bioaccumulation

La bioaccumulation désigne la capacité des organismes à concentrer et accumuler des substances chimiques à des concentrations supérieures à celles où elles se trouvent dans l'eau du milieu naturel.

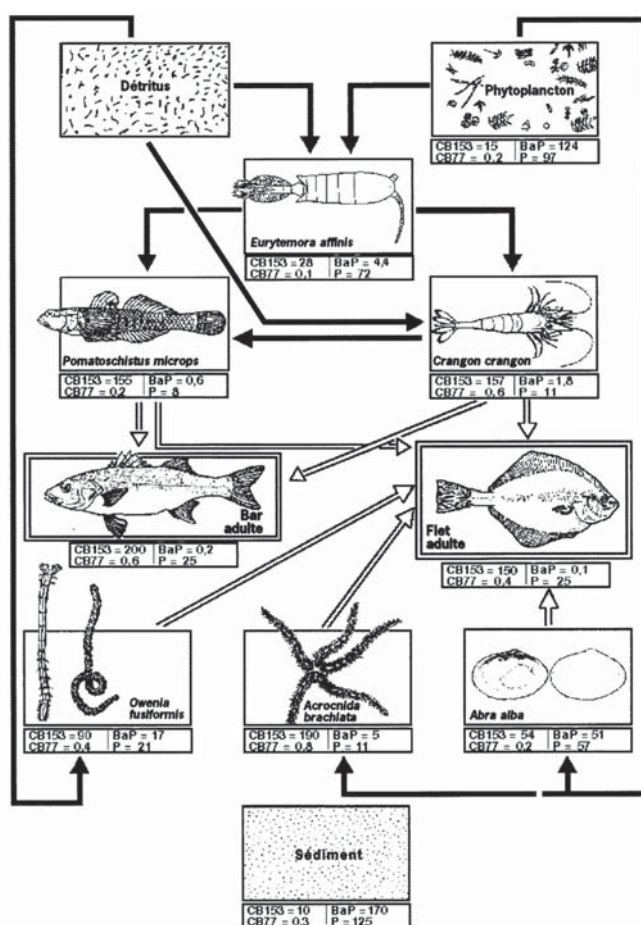
La bioaccumulation dépend des caractéristiques des substances chimiques et des facteurs biologiques propres à chaque espèce :

- une substance hydrophobe et liposoluble est potentiellement bioaccumulable dans les tissus des espèces ;
- une substance persistante résiste au processus de dégradation physique, chimique ou métabolique et favorise la bioaccumulation.

Le processus de bioaccumulation résulte d'un déséquilibre entre l'absorption liée à l'assimilation et la détoxification liée à l'excrétion ou la métabolisation. Il est lié aux grandes fonctions biologiques (alimentation, respiration, excrétion, reproduction) et reste propre à chaque espèce tout en dépendant de l'âge des individus, de leur poids et des conditions particulières du milieu.

La bioaccumulation intervient sur l'exposition des espèces par les relations trophiques et détermine donc des effets toxiques d'une substance vis-à-vis des espèces supérieures (Figure 1).

Figure 1 - Niveaux de contamination aux PCB et HAP dans les réseaux trophiques du bar et du flet (ng/g) (Programme scientifique Seine Aval)

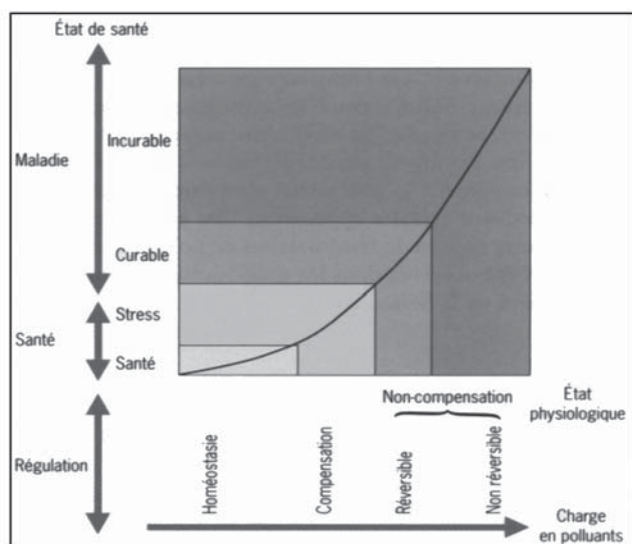


Chacune des grandes fonctions biologiques des espèces est assurée par des interactions bien spécifiques entre composés biochimiques. Des molécules étrangères sont susceptibles de perturber cette organisation car elles produisent une nouvelle réactivité imprévue dans le système. Face à ce stress, des réactions de défense vont alors se déclencher. Cependant, celles-ci sont limitées et l'intrusion d'une substance étrangère peut alors provoquer des effets secondaires, plus ou moins graves.

Le stress est caractérisé par différents niveaux physiologiques selon la charge en polluants (Figure 2). Quand la charge est faible, on assiste simplement à une réaction de défense consistant à un ajustement biologique, suivi d'un retour à la normale lorsque le stress disparaît. En revanche, si la contamination est plus importante, des mécanismes physiologiques ou biochimiques interviennent pour une détoxification ou une excrétion des polluants : c'est le phénomène de compensation.

Au-delà, il y a la phase de non-compensation, quand la charge en contaminants dépasse les capacités de résistance de l'organisme, pouvant provoquer l'apparition de pathologies ou même la mort.

Figure 2 - Etat de santé d'un organisme selon la charge en polluants (Programme scientifique Seine Aval) [Burgeot, 1999]

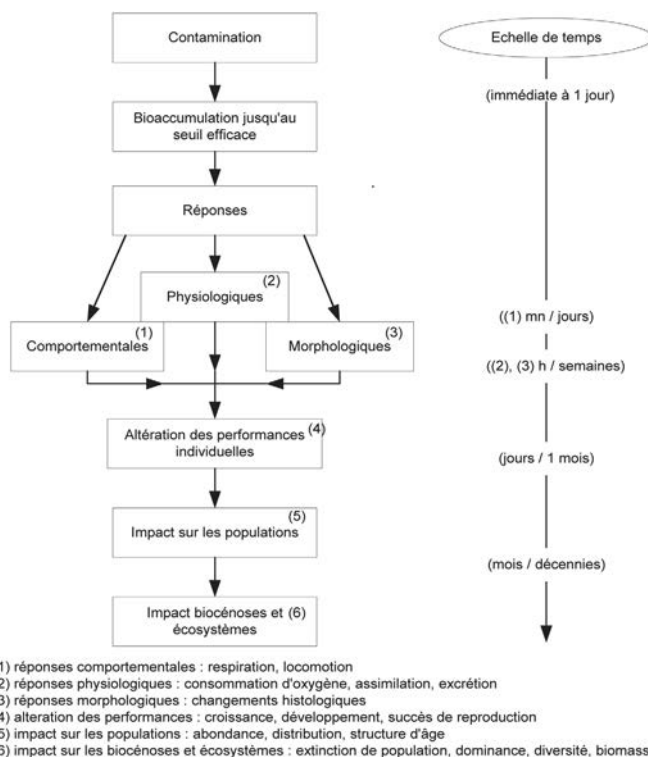


Les réponses à la bioaccumulation peuvent être de nature physiologique (consommation d'oxygène, assimilation, excrétion), comportementale (respiration, locomotion) ou morphologique (changements histologiques).

Cette bioaccumulation n'est pas nécessairement un signe de toxicité, laquelle dépend notamment de la source de contamination (eau, nourriture), de la nature des contaminants (composés utiles ou toxiques), de l'exposition des espèces (concentrations, temps) et des réponses variables en fonction des individus et des espèces.

L'impact des contaminants sur les organismes est évalué en fonction des paramètres bioaccumulation et toxicité, qui peuvent conduire à des réponses biologiques d'effets croissants sur les individus, espèces et écosystèmes dans l'espace temps (Figure 3).

Figure 3 - Chronologie des effets sur les individus et les populations (Ramade, [Pruvot, 1999])



4. Méthode d'analyse

Le choix des espèces étudiées est fondé sur la localisation géographique, la valeur marchande et la capacité des espèces à servir d'indicateur quantitatif de la contamination du milieu.

Les prélèvements ont été réalisés au chalut par un pêcheur professionnel sur les zones d'immersion les plus utilisées (vidage Sud-Ouest du port Ouest et vidage Est du port Est) ainsi que sur les bouées de balisage les plus proches des zones correspondantes.

Trois zones de référence spécifiques permettent de couvrir l'ensemble du littoral nord.

Les espèces échantillonnées sont :

- des moules, en raison de leur potentiel de bioaccumulation et de leur résistance à différents stress ;
- des poissons plats (plies), espèces benthiques vivant dans les sédiments et exposées à la pollution ;
- des bars, poissons lipidiques qui vont avoir tendance à accumuler les contaminants.

Ces espèces ont également été choisies car elles sont des vecteurs de contamination pour l'homme puisqu'il s'agit de produits de consommation.

La détermination des concentrations en contaminants a été effectuée sur des aliquots de tissus, minéralisés et analysés par spectrophotométrie d'absorption atomique pour les métaux et par chromatographie en phase gazeuse pour les composés organochlorés. Les techniques d'assurance de la qualité (CIEM, 1989) ont été appliquées aux différentes étapes de l'expertise.

Les analyses chimiques ont porté sur les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphényles (PCB), les pesticides organochlorés, les métaux et les dioxines-furannes, soit au total soixante-neuf composés identifiés. L'analyse et l'interprétation des résultats portent sur les concentrations supérieures aux limites de détection des appareils de mesure utilisés. Les observations rassemblées ne constituent pas une conclusion définitive mais bien un aperçu des problèmes de salubrité des espèces et un état relatif de la contamination des sites étudiés.

5. Caractéristiques des individus

Il est nécessaire d'évaluer l'âge des individus prélevés à partir de leurs otolithes (laboratoire Ifremer) ou à partir des courbes de croissance empirique puisque les concentrations en contaminants évoluent généralement avec l'âge :

- les deux carrelots prélevés au niveau de la zone de vidage Est et de la zone de vidage Ouest mesuraient respectivement 32 et 31 cm et avaient environ 3 ans ;
- le bar prélevé sur la seule zone de vidage Est mesurait 55 cm et avait environ 9 ans.

L'âge des moules prélevés sur les bouées a été déterminé à partir de la date de la dernière mise à l'eau permettant

le développement naturel de l'espèce :

- les moules de la zone de vidage Est avaient environ 9 mois ;
- les moules de la zone de vidage Sud-Ouest avaient environ 28 mois.

L'espérance de vie de la moule commune est de 10 ans.

6. Les seuils sanitaires

Les seuils sanitaires ne sont pas définis aujourd'hui pour l'ensemble des composés chimiques identifiés dans le cadre de la présente étude. Néanmoins, le règlement de la Commission européenne n° 466/2001 du 8 mars 2001 fixe les teneurs maximales en contaminants tolérables dans les produits de la pêche pour le plomb, le cadmium, le mercure et les dioxines (tableau 2).

D'autres valeurs seuils font appel à la grille qualité établie par l'Ifremer (tableau 3).

7. Campagne d'analyses 2006

La zone de vidage Est du port Est a fait l'objet d'une expertise sur trois espèces, le bar, le carrelot et les moules (tableau 4)

Tableau 2 – Teneurs maximales autorisées dans les denrées alimentaires

Métaux (mg/kg poids sec)	Poissons	Mollusques
Plomb	1	5
Cadmium	0,25	5
Mercure	2,5	2,5
Dioxines (pg/g poids humide)	4	4

Tableau 3 – Grille de qualité des moules [Joanny et al., 1993]

Evaluation de la qualité (poids sec)	Très bonne	Bonne	Médiocre	Mauvaise
Cuivre	< 5 mg/kg	5-10	10-15	> 15
Zinc	< 100 mg/kg	100-150	150-200	> 200
PCB totaux	< 250 µg/kg	250-800	800-1350	> 1350
HAP totaux	< 4 mg/kg	4-12	12-20	> 20
DDT	< 50 µg/kg	50-125	125-200	> 200

Tableau 4 - contaminants sur la zone de vidage Est du Port Est [PAD, 2006]

Métaux (mg/kg poids sec)	Bar (9 ans)	Carrelot (3 ans)	Moules (9 mois)
Al	11	8.1	270
As	6	53	24
Cd	< 0.005	< 0.005	0.35
Cr(t)	< 0.25	< 0.25	0.37
Cu	2.8	< 0.05	5.3
Hg(t)	3.1	0.28	0.044
Ni	< 0.25	< 0.25	1.3
Pb	< 0.25	< 0.25	1.1
Zn	20	32	50
Dioxines (pg/g poids frais)	0.83	0.96	0.35

Les niveaux HAP, PCB indicateurs et pesticides organochlorés restent en dessous des seuils de détection.

Sur la base des seuils réglementaires non exhaustifs, et d'après les bulletins d'analyses de l'Institut Pasteur, aucun seuil critique n'est atteint sauf pour le mercure et le cuivre :
— dépassement mercure (Hg) pour le bar : 3.1 > 2.5 mg/kg PS

— déclassement lié au cuivre (Cu) pour les moules : 5.3 > 5 mg/kg PS

La zone de vidage Ouest du port Ouest a fait l'objet d'une expertise sur deux espèces, le carrelet et les moules (tableau 5).

Les niveaux en HAP, PCB indicateurs et pesticides organochlorés restent en dessous des seuils de détection.

Sur la base des seuils réglementaires non exhaustifs, et d'après les bulletins d'analyses de l'Institut Pasteur, aucun seuil critique n'est atteint sauf pour le cuivre :

— déclassement lié au cuivre (Cu) pour les moules : 6.1 > 5 mg/kg ps.

L'expertise sur les moules a porté également sur trois zones de référence éloignées des sites de dragage et des différentes zones d'immersion des ports Est et Ouest de Dunkerque. La zone située à l'Ouest du port Ouest est dénommée bouée Dyck Est. Les deux zones situées à l'Est du port Est sont dénommées bouées Zuydcoote E4 et E8 et sont situées au pied du banc de Hills dans le chenal de navigation de la passe de Zuydcoote. Le point E8 est le plus proche de la zone d'implantation des concessions de cultures marines sur filières subflottantes de haute mer. La campagne a permis de détecter la présence de métaux traces et dioxines (tableau 6).

Sur la base de la grille de qualité Ifremer, et d'après les bulletins d'analyses de l'Institut Pasteur, aucun seuil critique n'est atteint sauf pour le cuivre :

— déclassement lié au cuivre (Cu) pour les moules : 6.6 > 5 mg/kg PS.

La campagne a permis également de détecter la présence de HAP et de PCB indicateurs sur les trois zones de référence (tableau 7).

Tableau 5 - Contaminants sur la zone de vidage Sud-Ouest du port Ouest [PAD, 2006]

Métaux (mg/kg poids sec)	Carrelet (3 ans)	Moules (28 mois)
Al	7	230
As	18	24
Cd	< 0.005	0.31
Cr(t)	< 0.25	0.28
Cu	3.8	6.1
Hg(t)	0.12	0.06
Ni	< 0.25	0.79
Pb	0.23	1.3
Zn	28	57
Dioxines (pg/g poids frais)	0.17	0.66

Tableau 6 - Contaminants dans les moules, zones de référence Est-Ouest du Dunkerquois [PAD, 2006]

Métaux (mg/kg poids sec)	Moules Dyck Est (âge NC)	Moules Zuydcoote E4 (22 mois)	Moules Zuydcoote E8 (14 mois)
Al	260	190	270
As	24	31	33
Cd	0.34	0.41	0.40
Cr(t)	0.29	< 0.25	0.30
Cu	6.6	4.5	4.8
Hg(t)	0.055	0.03	0.042
Ni	0.79	0.82	1
Pb	1.4	1.3	1.8
Zn	55	43	66
Dioxines (pg/g poids frais)	0.57	0.23	0.35

Tableau 7 - Contaminants dans les moules, zones de référence Est-Ouest du Dunkerquois [PAD, 2006]

HAP (mg/kg poids sec)	Moules Dyck Est (âge NC)	Moules Zuydcoote E4 (22 mois)	Moules Zuydcoote E8 (14 mois)
Fluoranthene	< 0.005	0.018	0.066
Benzo(a)anthracene	0.005	< 0.005	0.013
Benzo(b)fluoranthene	0.012	0.009	0.021
Benzo(k)fluoranthene	< 0.005	< 0.005	0.009
Benzo(a)pyrene	< 0.005	< 0.005	0.007
Anthracene	< 0.005	0.007	0.017
Chrysene	< 0.005	< 0.005	0.023
HAP totaux	0.017	0.034	0.156
PCB (µg/g poids sec)			
Hexachlorobiphenyle 138		14	19
Hexachlorobiphenyle 153		15	22
PCB totaux		29	41

Sur la base de la grille de qualité Ifremer, et d'après les bulletins d'analyses de l'Institut Pasteur, aucun seuil critique n'est atteint pour les HAP et les PCB détectés.

8. Synthèse par famille de contaminants

Les familles des HAP, des PCB indicateurs et des pesticides organochlorés sont généralement en dessous des seuils de détection sauf sur les zones de référence et notamment sur le prélèvement de la bouée Zuydcoote E8 tout en restant admissibles et non déclassants pour la qualité des moules.

Les métaux lourds, réglementés ou non, sont présents dans tous les prélèvements. Les teneurs maximales autorisées sur les produits de la pêche pour le plomb, le cadmium et le mercure ne sont pas dépassées sauf pour le mercure sur le bar de la zone de vidage Est du port Est. La qualité des moules est déclassée par le cuivre (grille Ifremer) sur les zones de vidage Est et Sud-Ouest ainsi que sur la zone de référence Dyck Est tout en restant de bonne qualité.

La présence de dioxines-furannes est systématique sur l'ensemble des prélèvements du littoral tout en restant nettement en dessous des teneurs maximales autorisées tant sur les poissons que sur les moules. Les valeurs les plus élevées sont détectées sur les poissons (bar, carrelet) de la zone de vidage Est du Port Est. Compte tenu de cette présence systématique sur l'ensemble du littoral, il conviendrait de compléter la campagne d'analyse par la recherche des PCB dioxin like souvent associés aux dioxines-furannes.

Globalement et au stade actuel de l'expertise, seule la présence de mercure identifiée dans le bar est de nature à occasionner un risque sanitaire lié à la consommation humaine.

9. Evolution potentielle du risque sanitaire

Quelques contaminants méritent une attention particulière en raison de leur potentiel de bioaccumulation, de leur présence dans les sédiments dragués-immérgés et de leur niveau de toxicité relative. Il s'agit prioritairement du mercure, du plomb, du cuivre et des dioxines-furannes dont la bioaccumulation est à corrélérer à l'âge des individus pour prévenir tout risque sanitaire. Une extrapolation linéaire entre les teneurs identifiées et l'âge de l'individu permet d'évaluer le risque de dépassement des seuils tolérés sur les produits de la pêche pour les divers contaminants sélectionnés.

Le plomb présent davantage dans les moules atteint le seuil critique de 5 mg/kg au tiers de la durée de vie prévisible de l'espèce soit environ à 36 mois sur la zone de

vidage Est et la bouée Zuydcoote E8. Le cuivre présent davantage dans les moules atteint le seuil de qualité médiocre de 10 mg/kg environ à 18 mois sur la zone de vidage Est et à 29 mois à la bouée Zuydcoote E8. Le mercure présent davantage dans le bar atteint le seuil critique de 2.5 mg/kg à sa demi-vie soit environ 7 ans pour le bar sur la zone de vidage Est. Les dioxines-furannes présentes davantage dans le carrelet atteignent le seuil critique de 4 pg/g au quart de la durée de vie prévisible de l'espèce soit environ à 12.5 ans pour le carrelet sur la zone de vidage Est.

Il découle de l'analyse de l'évolution potentielle du risque sanitaire que la zone de vidage Est du port Est est plus particulièrement concernée par un plan de surveillance du milieu intégrant les contaminants (mercure, plomb, cuivre et dioxines-furannes) sur les trois espèces choisies (moules, bar, carrelet).

Le secteur bouée Zuydcoote E8 mérite également une surveillance particulière sur les contaminants (plomb, cuivre) détectés sur les moules sans qu'il soit possible d'attribuer la présence des métaux à une activité de dragage et d'immersion compte tenu de la situation géographique de la zone de référence. Il importe de souligner également que les moules d'élevage sur filières de haute mer sont récoltés au bout de 8 à 10 mois ce qui minimise fortement tout risque sanitaire lié à des concentrations excessives en contaminants.

10. Conclusions et perspectives

L'étude des espèces marines en lien avec les sédiments dragués et immergés au large du port de Dunkerque a permis d'évaluer l'incidence environnementale sur quelques espèces sentinelles et d'estimer le risque sanitaire potentiel lié à la bioaccumulation des contaminants dans les tissus des espèces choisies. Parmi 69 composés chimiques analysés, quelques contaminants méritent une surveillance spécifique compte tenu du risque sanitaire à moyen terme lié au facteur de bioaccumulation : il s'agit du mercure, du plomb, du cuivre et des dioxines-furannes. Néanmoins, le contexte hydrodynamique intense et le milieu dispersif des zones d'immersion des sédiments de dragage limitent fortement le risque sanitaire lié à la consommation des produits de la pêche. La démarche anticipative d'expertise de la bioaccumulation sur les espèces du milieu marin annonce également des perspectives de recherche complémentaire dont nous proposons un axe prioritaire basé sur la restauration du milieu par la réduction des apports et la connaissance des flux pour alimenter les modèles de dispersion des contaminants.

Références

[Alzieu et al., 1999] Dragages et environnement marin. Etat des connaissances : comportement des polluants, Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer), 223 p.

[Arrêté du 14 juin 2000] Relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire, publié au *Journal officiel* le 10 août 2000 (12415-12416).

[Boust et al., 1999] Cinétique de dissolution des sulfures à partir des sédiments anoxiques de l'estuaire de la Seine. Programme scientifique Seine Aval. Rapport DPRE-SER-NAT-99-13, 7 pp.

[Burgeot, 1999] Des organismes sous stress, programme scientifique Seine Aval n° 14, Ifremer, 36 p.

[Joanny et al., 1993] Qualité du milieu marin, Ifremer, 241 p.

[Ospar, 1995] Commissions d'Oslo et de Paris, immersions en mer en 1991-1992, rapports Commissions d'Oslo et Paris, 151 p.

[PAD, 2006] Bulletins d'analyses géochimiques de l'Institut Pasteur de Lille sur les zones d'immersion et le littoral Dunkerquois.

[Pruvot C., 1999] Contribution à l'évaluation de l'impact des dragages et des immersions sur les communautés macrozoobenthiques du port de Dunkerque et de ses zones de vidage, Thèse de doctorat « Environnement et écosystèmes marins et continentaux », Université de Lille, 315 p.