

Maître d'ouvrage



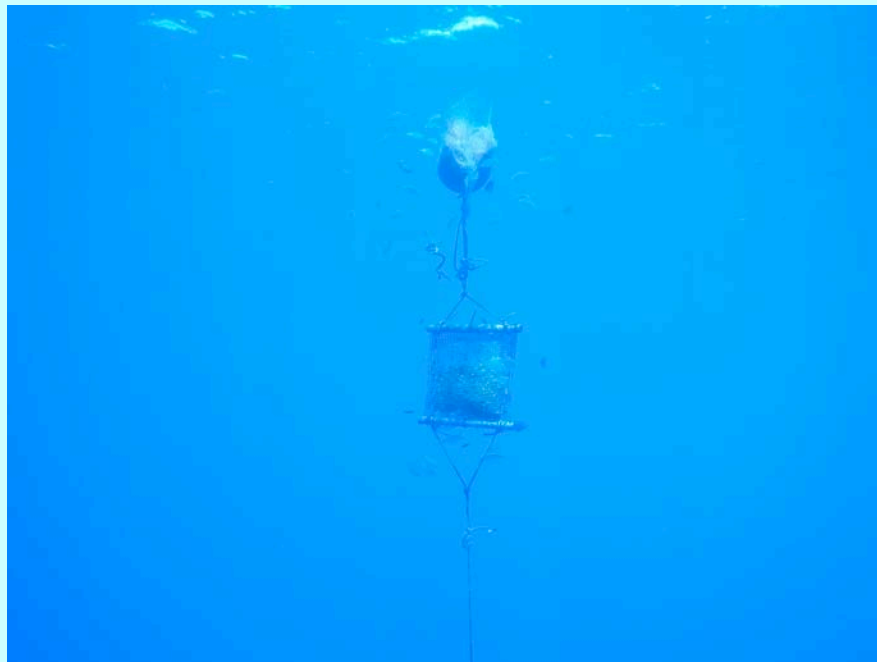
Direction Régionale de l'Environnement
RÉUNION

Maître d'œuvre



Programme MODIOLE (2004-2008)

**Etude pilote pour la mise en place d'un outil de
biomonitoring en milieu marin dans le cadre de la
mise en place de la Directive Cadre Eau à la Réunion**



Partenaire :



- Juillet 2008 -



Agence pour la Recherche et la Valorisation Marines

Maître d'ouvrage : Direction Régionale de l'Environnement de la Réunion	Dossier n° : A. 104
Programme MODIOLE - Etude pilote pour la mise en place d'un outil de biomonitoring en milieu marin dans le cadre de la mise en place de la Directive Cadre Eau à la Réunion Date : Juillet 2008	Nb pages : Nb figures : Nb cartes : Nb photos :
Auteurs principaux: H. CAMBERT, ARVAM, harold.cambert@arvam.com J. TURQUET, ARVAM, jean.turquet@arvam.com J.L. GONZALEZ, Ifremer, gonzalez@ifremer.fr B. ANDRAL, andral@ifremer.fr	Diffusion <ul style="list-style-type: none">• Libre <input checked="" type="checkbox"/>• Restreinte <input type="checkbox"/>• Confidentielle <input type="checkbox"/>

Maître d'ouvrage :



Direction Régionale de l'Environnement
RÉUNION

Diren Réunion

Direction Régionale de l'Environnement
Parc de la Providence
12, allée de la Forêt
97400 St DENIS La Réunion

Tél. 02.62.94.78.12
Fax 02.62.94.72.55

Maître d'œuvre :



ARVAM (Agence pour la Recherche et la Valorisation Marines)
C/O CYROI,
2, rue Maxime Rivière,
97 490 Sainte-Clotilde, La Réunion
Tél : 02 62 28 39 08
Fax : 02 62 28 08 81

Partenaires :



Ifremer Centre de Méditerranée

Laboratoire Environnement Ressources- Provence Azur Corse (LER/PAC)
ZP de Bregailon BP n° 330 - 83507 La Seyne sur Mer
Tél 04 94 30 48 55
Fax : 04 94 30 44 17

GLOSSAIRE

AFSSA	Agence Française de Sécurité Sanitaires des Aliments
ARDA	Association Réunionnaise pour le Développement de l'Aquaculture
ARVAM	Agence pour la Recherche et la Valorisation Marines
IFRECOR	Initiative Française pour les Récifs Coralliens
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

Tableaux et figures

Tableau 1 : Liste des sites prospectés durant la campagne cartographie modiole 2004 et description des principaux paramètres: densité des populations, profondeur, type de substrat (SB, sable basaltique; SC, sable corallien ; AR, affleurement rocheux ; PC, platier corallien ; G, galets ; AA, assemblage algale ; DC, débris coralliens), intensité du régime de houle moyen, présence d'une fausse passe, apports (R, ravine ; P, percolation d'eau douce)	15
Tableau 2 : Concentrations moyenne en ETM (en mg/g de chair humide) d'échantillons de modioles prélevés en mer rouge, en méditerranée et à Tahiti (modifié d'après El-Sikaily et al 2003 et Bourdelin, 1994)	34
Tableau 3 : Liste des contaminants analysés durant le suivi mensuel des populations naturelles d'août 2004 à juillet 2005	37
Tableau 4 : Moyenne et écart type des concentrations en contaminants observées dans n échantillons de modioles entre août 2004 et juillet 2005 sur les sites de suivi (Saint Leu, Trou d'eau et Grande Anse)	39
Tableau 5 : Comparatif des résultats moyens obtenus pour les contaminants métalliques dans le cadre du suivi modiole 2004-2005, du Rinbio 2006, de Mytilos (2004-2006), du RNO Méditerranée et Manche Atlantique	40
Tableau 6 : Comparatif des résultats moyens obtenus pour le PCB 153 dans le cadre du suivi modiole 2004-2005, du Rinbio 2006, de Mytilos (2004-2006), du RNO Méditerranée et Manche Atlantique	41
Tableau 7 : Résultats moyens obtenus pour la somme des 16 HAP et pour le fluoranthène dans le cadre du suivi modiole 2004-2005, du Rinbio 2006, de Mytilos (2004-2006), du RNO Méditerranée et Manche Atlantique	41
Tableau 8 : Liste des contaminants analysés lors de l'expérience 1 (a) et de l'expérience 2 (b) de contamination et de décontamination	50
Tableau 9 : Positions des six stations cagging sélectionnées	63
Tableau 11: Synthèse des avantages et limites des matrices identifiées comme bioaccumulatrices vis à vis des paramètres idéaux d'un organisme bioindicateurs	76
Tableau 12 : Liste des matrices et espèces tropicales potentiellement bioaccumulatrices et présentes en milieu récifal à la Réunion	77
Tableau 13 : Date de prélèvement sur les trois sites lors des campagnes de saison humide et de saison sèche	80
Tableau 14 : Espèces prélevées en saison sèche (août 2004) et en saison humide (avril 2005) sur les sites de Trou d'eau, Grande anse et Sainte Rose	80
Tableau 15 : Nombre de molécules captées par les différentes matrices selon la famille de micropolluant	81

Figures

Figure 1 : Cartes des sites échantillonnés dans le cadre des deux phases terrains du programme International Mussel Watch : phase Amérique du Sud-Caraïbes, 1991- 1993 (a) ; phase Asie-Pacifique, 1994-2001 (b)(d'après Sericano et al., 1996 et Monirith et al., 2003	9
Figure 2: Présentation des deux types de sites propices au développement de la moule tropicale, <i>Modiolus auriculatus</i>	17
Figure 3: Cartes des peuplements de modioles sur les secteurs de Boucan Canot-Grand Fond (a) et de l'Hermitage (b)	18
Figure 4: Cartographie des peuplements de modioles des secteurs de Trou d'eau (a) et de Saint-Leu (b)	19

Figure 5: Cartographie des peuplements de modioles des secteurs de l'Etang-salé (a), de Saint-pierre (b) et de Grand Bois - Grande Anse (c)	20
Figure 6: Cartographie des peuplements de modioles des secteurs de Saint-Benoît (a), de Pointe Corail (b) et de l'Anse des Cascades (c)	21
Figure 7 : Populations de modioles suivies entre août 2004 et juillet 2005 sur les sites de Trou d'eau et de Saint-Leu	22
Figure 8 : Description des caractéristiques physiologiques et histologiques des différents stades gonadiques chez les individus femelles (<i>Modiolus auriculatus</i>)	24
Figure 9 : Description des caractéristiques physiologiques et histologiques des différents stades gonadiques chez les individus mâles (<i>Modiolus auriculatus</i>)	25
Figure 10 : Variations des indices écophysiologiques et de la température moyenne de l'eau en platier pour le site de Saint Leu de septembre 2004 à août 2005	27
Figure 11 : Variations des indices écophysiologiques et de la température moyenne de l'eau en platier pour le site de Trou d'eau de septembre 2004 à août 2005	28
Figure 12 : Profil biométrique observé en octobre 2004 sur le site de Saint Leu ; il s'agit du profil classiquement observé dans une banquette de modiole et la cohorte 1 est la plus adaptée à la biosurveillance	29
Figure 13 : Courbe de croissance sur 8 mois des populations subtidales de modioles de Saint-Leu, Trou d'eau et de Tahiti (Bourdalin, 1994)	30
Figure 14 : Cinétique in vitro de bioconcentration et de décontamination du lindane par <i>Modiolus auriculatus</i> (Bourdalin, 1994)	35
Figure 15: Courbes de concentration en métaux dans la chair des modioles des deux foyers naturels de Trou d'eau et Saint Leu de août 2004 à juillet 2005	42
Figure 16 : Courbes de concentration en pesticides et PCB dans la chair des modioles des deux foyers naturels de Trou d'eau et Saint Leu de août 2004 à juillet 2005	43
Figure 17 : Courbes de concentration en HAP dans la chair des modioles des deux foyers naturels de Trou d'eau et Saint Leu de août 2004 à juillet 2005	44
Figure 18 : Courbes de concentration en organoétains dans la chair des modioles des deux foyers naturels de Trou d'eau et Saint Leu de août 2004 à juillet 2005	45
Figure 19 : Illustrations des opérations menées sur le terrain et en laboratoire dans le cadre des premiers essais de transplantation de modioles en darse portuaire (janvier 2006) (a) et de mesure de DGT (avril 2005) (b)	49
Figure 20 : Evolution des concentrations "DGT" mesurées lors de la première expérience de contamination réalisée dans la darse. Les concentrations mesurées lors de la même période au niveau du rejet de St Denis (STEP) et de de la Rivière des pluies (Riv d P) sont présentées à titre indicatif. Les données présentées correspondent à la moyenne (courbe rouge pour la cinétique de contamination dans la darse et losange pour la STEP et la Rivière des pluies) calculées à partir des mesures de chaque triplicat (barres noires).	53
Figure 21 : Expérience 1 de cinétique de contamination, données de métaux (a) et (b)	55
Figure 22 : Expérience 1 de cinétique de contamination, données de pesticides et PCB	56
Figure 23 : Expérience 1 de cinétique de contamination, données de HAP	56
Figure 24 : Evolution des concentrations "DGT" mesurées lors des expériences de contamination (darse portuaire) et de décontamination (baie de St Paul). Les données présentées correspondent à la moyenne (courbe rouge pour la cinétique de contamination dans la darse)	59
Figure 25 : Expérience 2 de cinétique de contamination et décontamination, données des métaux (a) et des organochlorés et des PCB (b)	60
Figure 26 : Expérience 2 de cinétique de contamination et de décontamination, données des HAP (a) et des organoétains (b)	61
Figure 27 : Schéma des mouillages déployés sur les six stations du Contrôle de Surveillance en juillet 2007	64
Figure 28 : Liste des contaminants analysés sur les échantillons de cagging	66
Figure 29 : Dates des différentes phase de la transplantation et données de biométrie et indices écophysiologiques relevés sur les pochons (a) et représentation graphique des indices (b)	67
Figure 30 : Contamination par les métaux des modioles sur le site source (Saint Leu) et sur les sites de cagging	70
Figure 31 : Contamination des modioles par les pesticides sur le site source (Saint Leu) et sur les sites de cagging	71
Figure 32 : Contamination des modioles par les HAP (a) et les organoétains (b) sur le site source (Saint Leu) et sur les sites de cagging	72
Figure 33 : Contamination des modioles par les phénols et les phtalates (a) et par les polybromodiphényléthers (b) les sur le site source (Saint Leu) et sur les sites de cagging	73
Figure 34 : Liste des contaminants analysés sur les autres matrices biologiques	79

Sommaire

1	ÉLÉMENTS DE CONTEXTE ET PRESENTATION DU PROGRAMME	6
2	PROBLEMATIQUE	7
2.1	Le biomonitoring des contaminants chimiques	7
2.1.1	<i>Principaux programmes de biosurveillance en milieu tropical</i>	8
2.2	Le volet chimique de la directive cadre sur l'eau (2000) et le choix d'une espèce bioindicatrice pour la Réunion	9
3	THEME 1 : ETUDE DES FOYERS NATURELS DE MODIOLES ET ECOPHYSIOLOGIE	11
3.1	Méthodologie	11
3.1.1	<i>Distribution des foyers naturels</i>	11
3.1.2	<i>Suivi écophysiologique de foyers naturels</i>	12
3.1.2.1	Prélèvement, transport et conditionnement en laboratoire	12
3.1.2.2	Indice gonadique (IG)	13
3.1.2.3	Traitement histologique des gonades	13
3.1.2.4	Indice de condition (IC)	13
3.1.2.5	Pourcentage de matières grasses	14
3.1.2.6	Suivi biométrique	14
3.1.2.7	Physico-chimie	14
3.2	Résultats	14
3.2.1	<i>Distribution des principaux foyers naturels</i>	14
3.2.2	<i>Sélection de deux sites pour le suivi écophysiologique</i>	22
3.2.3	<i>Suivi écophysiologique de populations naturelles de modioles : Saint Leu (2004-2006) et Trou d'eau (2004-2005)</i>	22
3.2.3.1	Etude du cycle de reproduction : indice gonadique (IG) et histologie des gonades	23
3.2.3.2	Physiologie : indice de condition et pourcentage de matières grasses	26
3.2.3.3	Interaction physiologie – cycle de reproduction- température	26
3.2.3.4	Biométrie	29
3.3	Synthèse	31
4	THEME 2 : CAPACITES BIOACCUMULATRICES DE LA MODIOLE	33
4.1	Synthèse bibliographique sur les capacités bioaccumultrices de <i>Modiolus auriculatus</i>	33
4.1.1	<i>Bioaccumulation des éléments traces métalliques (ETM)</i>	33
4.1.2	<i>Bioaccumulation des HAP</i>	34
4.1.3	<i>Bioaccumulation du lindane</i>	34
4.2	Etude de la capacité de bioaccumulation de <i>Modiolus auriculatus</i> à la Réunion (2004 -2005)	36
4.2.1	Méthodologie	36
4.2.1.1	Sites de prélèvements	36
4.2.1.2	Prélèvement et conditionnement des échantillons	36
4.2.1.3	Analyses chimiques	36
4.2.2	Résultats	38
4.2.2.1	Bilan technique du suivi	38
4.2.2.2	Résultats bruts de contamination	38
4.2.3	Synthèse	46
4.3	Etude la cinétique de contamination et de décontamination	47

4.3.1 Méthodologie	47
4.3.1.1 Sélection des sites expérimentaux	47
4.3.1.2 Cinétique de contamination et de décontamination	48
4.3.2 Résultats	52
4.3.3 Synthèse	62
4.4 Campagne de biomonitoring actif par transplantation de pochons de modioles en mer	63
4.4.1 Méthodologie	63
4.4.2 Résultats	67
4.4.2.1 Données techniques	67
4.4.2.2 Données biométriques et écophysiologicals	67
4.4.3 Synthèse	74
THEME 3 : COMPLEMENTS D'INFORMATIONS SUR D'AUTRES MATRICES NATURELLES	75
4.5 Synthèse bibliographique sur les capacités bioaccumulatrices d'autres matrices biologiques des milieux récifaux de l'île de la Réunion	75
4.6 Contamination d'autres matrices biologiques en milieu récifal	76
4.6.1 Méthodologie	77
4.6.1.1 Sélection des espèces cibles	77
4.6.1.2 Sélection des sites de prélèvements et programmation des campagnes	78
4.6.1.3 Prélèvement et conditionnement	78
4.6.1.4 Analyse chimiques	79
4.6.2 Résultats	80
4.6.2.1 Résultats par site	80
4.6.2.2 Résultats par saison	81
4.6.2.3 Résultats par matrice	81
4.6.3 Synthèse	82
5 THEME 4 : FAISABILITE D'UN BIOMONITORING ACTIF DES CONTAMINANTS CHIMIQUES A LA REUNION AU SEIN DU RESEAU DCE	83
5.1 Le réseau de surveillance « DCE » des eaux côtières	83
5.2 <i>Modiolus auriculatus</i>, une espèce adaptée au biomonitoring type DCE à la Réunion	83
5.3 Faisabilité technico-financière d'un biomonitoring modiole ausein du volet « contrôle de surveillance » de la DCE Réunion	84
5.3.1 Protocole DCE	84
5.3.2 Fréquence et période	84
5.3.3 Stations	85
6 BIBLIOGRAPHIE	86
7 ANNEXES	90

1 ÉLÉMENTS DE CONTEXTE ET PRESENTATION DU PROGRAMME

La mesure directe des contaminants dans l'eau fait appel à des techniques analytiques sophistiquées et coûteuses, difficilement applicables à de nombreux échantillons prélevés le long d'un important linéaire côtier. Par ailleurs, la variabilité du milieu littoral confère une représentativité limitée à une mesure ponctuelle effectuée dans la colonne d'eau.

Le biomonitoring utilisant la moule repose sur l'hypothèse que le contenu en contaminant dans la chair de cet animal reflète la concentration en contaminants biodisponibles dans l'eau sous forme particulaire et/ou dissoute, selon un processus de bioaccumulation. Cette hypothèse a été validée pour les substances chimiques de type hydrophobe ou intermédiaire, susceptibles de se bioaccumuler et caractérisées par un coefficient de partage n-octanol – eau supérieur à 3.

Les techniques dites des bioindicateurs - quantitatifs utilisent la bioaccumulation pour mesurer les niveaux de contamination chimique du milieu, tout en atténuant les fluctuations à court terme du milieu. Les stratégies développées sont de deux types. Celles qui utilisent les populations indigènes de moules sauvages ou cultivées (biomonitoring passif, cas du RNO) et celles qui ont recours aux transplants d'individus provenant d'un site de référence (biomonitoring actif, cas du Rinbio en Méditerranée).

À La Réunion, une étude de pré-faisabilité pour l'utilisation d'une espèce de moule tropicale, *Modiolus auriculatus*, pour l'évaluation de la qualité du milieu marin insulaire tropical a été réalisée en 2000. Les premières conclusions montraient qu'il existait un réel potentiel pour la mise en œuvre d'un réseau de type actif.

La mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) du 21 Octobre 2000, notamment son volet chimique nécessite désormais de disposer d'un outil de surveillance pérenne de la qualité chimique des eaux littorales.

Pour réaliser ce projet, l'ARVAM a proposé à la DIREN Réunion d'adapter à une espèce de moule tropicale, le concept du biomonitoring déjà développé en France métropolitaine par l'Ifremer.

Aussi, en contribution au plan d'action de l'IFRECOR inscrit dans le DOCUP (mesure C2-08), l'ARVAM a réalisé en partenariat avec l'Ifremer une étude de faisabilité sur 4 ans (2004 - 2008) : le programme MODIOLE.

La présente étude aborde quatre thèmes :

- Thème 1 : Etude des foyers naturels de modioles et écophysiologie ;
- Thème 2 : Capacités bioaccumulatrices de la modiole ;
- Thème 3 : Compléments d'informations sur d'autres matrices naturelles ;
- Thème 4 : Faisabilité d'un biomonitoring actif des contaminants chimiques à la Réunion au sein du réseau DCE.

2 PROBLEMATIQUE

2.1 Le biomonitoring des contaminants chimiques

Le milieu marin constitue le réceptacle final de nombreux produits chimiques dont des éléments métalliques et les contaminants organiques rejetés par les industries, l'agriculture et les communautés urbaines. Les zones estuariennes et côtières, sous forte influence continentale, sont les plus touchées par cette contamination.

Afin de connaître et de suivre l'évolution de la contamination chimique côtière, des programmes de recherche et de surveillance à partir du dosage des contaminants dans l'eau et les sédiments ont été mis en œuvre. Les concentrations de la plupart des polluants dans l'environnement sont de l'ordre de quelques nanogrammes par litre d'eau, ce qui rend les techniques de prélèvement et de mesure complexes. Les risques de contamination au moment de l'échantillonnage et de l'analyse sont nombreux, rendant les mesures délicates. Ces problèmes ont été surmontés par l'utilisation de techniques « ultra-propres » dans l'échantillonnage. Cependant, la mesure directe des contaminants dans l'eau fait appel à des techniques analytiques sophistiquées, difficilement applicables en routine le long d'un linéaire côtier important. Par ailleurs, la variabilité temporelle du milieu littoral ne confère que peu de représentativité à une mesure ponctuelle dans la colonne d'eau. Enfin, le suivi de ces concentrations totales dans le milieu ne renseigne pas directement sur les concentrations des espèces chimiques biodisponibles. Les dosages concernent le plus souvent la totalité des espèces chimiques et non spécifiquement les formes biodisponibles des contaminants étudiés, information indispensable quant à la protection des écosystèmes et à la compréhension des processus de contamination.

C'est dans cette optique que Goldberg (1975) a proposé de suivre, à l'échelle internationale, les concentrations des contaminants dans les organismes vivants pour surveiller le milieu. C'est le principe des « bioindicateurs quantitatifs » basé sur le fait que les organismes marins concentrent les contaminants, en particulier les métaux divalents, en relation avec les concentrations présentes dans le milieu (Philips 1977; Goldberg et al. 1978; Phillips 1980).

Les stratégies de surveillance développées sont diverses ; l'utilisation de mollusques fixés et de poissons relativement sédentaires sont fréquentes dans les programmes de surveillance (ex. Oskar). L'utilisation des moules a été proposée à l'échelle mondiale par Goldberg dès 1975, sous le vocable « Mussel Watch ». Cette proposition a été appliquée avec succès sous deux types de stratégie: celles qui utilisent les populations indigènes de moules sauvages ou cultivées (biomonitoring passif, cas du RNO) (Thibaud and Boutier 1988 ; Claisse 1989 ; Claisse et al. 1992 ; Amiard-Triquet et al. 1999 ; Claisse et al. 2001) et celles qui ont recouru aux transplants d'individus, provenant d'un site de référence (biomonitoring actif, cas de RINBIO), sur un site d'étude.

Chez la moule, *Mytilus galloprovincialis*, en milieu méditerranéen, les contaminants sont accumulés jusqu'à atteindre un pseudo-équilibre avec le milieu (Kock de 1983 ; Fabris et al. 1994 ; Buestel 1997 ; Andral and Stanisière 1999 ; Andral et al. 2001). La concentration et l'accumulation des polluants chez les organismes aquatiques sont des processus assez complexes. Les degrés d'assimilation et de rétention des contaminants organiques varient entre les différents genres et espèces (Eisler 1981) et dépendent des propriétés biochimiques de chaque élément (Bowen 1966).

Pour constituer un bon « bioindicateur quantitatif », l'espèce animale utilisée doit avoir, selon Butler et al. (1971) et Philips et Rainbow (1994), les qualités suivantes :

- l'organisme doit concentrer le contaminant, sans effet létal, aux concentrations rencontrées dans le milieu ;
- il doit être sédentaire afin d'être représentatif de la zone d'échantillonnage ;
- il doit être abondant dans le secteur étudié ;
- il doit avoir une durée de vie suffisamment longue pour permettre l'échantillonnage de plusieurs classes d'âges ;
- il doit avoir une taille suffisante afin de donner une quantité de tissus adéquate pour l'analyse chimique ;
- il doit être euryhalin ;
- il doit concentrer suffisamment pour permettre des dosages sans préconcentration ;
- il doit exister une corrélation entre la teneur en contaminants dans l'organisme et la concentration dans l'eau environnante, la concentration dans les tissus reflétant ainsi la biodisponibilité du contaminant dans le milieu ;
- les effets de variations de la salinité et de la température doivent être connus.

Autant de qualités ne se trouvent pas réunies dans une seule espèce et un compromis doit être recherché. C'est dans cet esprit que Goldberg (1975) a proposé le concept de « Mussel Watch », comme première étape dans une surveillance globale du milieu marin. Après un séjour de plusieurs mois dans l'eau, les niveaux mesurés dans les organismes sont le résultat et le reflet chronique du milieu. La moule, *Mytilus* sp. est ainsi le premier bivalve marin utilisé en tant que bioindicateur (Butler et al. 1971 ; Goldberg 1975 ; Phillips 1976 ; Phillips 1977 ; Cunningham 1979 ; Cain and Luoma 1986 ; Fisher 1988 ; Cossa 1989 ; Regoli and Orlando 1993).

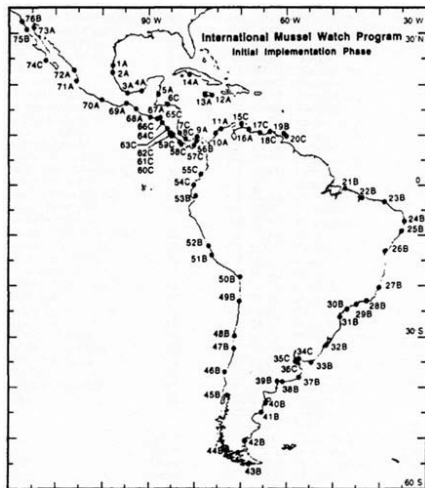
2.1.1 Principaux programmes de biosurveillance en milieu tropical

À ce jour, les seules initiatives de biomonitoring littoral en zone tropicale sont à mettre à l'actif du programme International Mussel Watch (IMW), extension du programme américain « Mussel Watch ». Dès l'origine du Mussel Watch, le Pr Goldberg a insisté sur la vocation globale de ce concept. Le programme ne devait pas se restreindre aux littoraux des pays dits développés. Aussi, deux congrès internationaux ont permis de regrouper les spécialistes mondiaux du Mussel Watch à Barcelone en décembre 1978 et à Hawaï en Novembre 1983. Ces rencontres ont abouti à la création du programme IMW par la Commission Océanographique Intergouvernementale (IOC) de l'Unesco, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement et la NOAA. La vocation majeure de ce programme est de promouvoir dans les pays en voie de développement la mise en place d'un réseau de suivi de la qualité des eaux marines littorales inspiré du Mussel Watch.

La première phase du programme concerna l'Amérique centrale et l'Amérique du Sud. Entre 1991 et 1993, 76 sites ont été échantillonnés dans 20 pays (Figure 1). D'après Sericano (1996), des concentrations importantes en pesticides, PCB et HAP ont été mesurées. À ce jour, aucun réseau pérenne n'est né de cette première phase.

La seconde phase s'est déroulée dans la région Asie-Pacifique à partir de 1994 où l'espèce *Perna viridis* constitue un bien de consommation alimentaire très commun. L'exploitation de ces bivalves représente une réelle valorisation économique de la production primaire très élevée des zones côtières (Tanabe, 2000). De plus cette source peu onéreuse en protéine animale est devenue le pilier de l'aquaculture en Asie avec les tonnages les plus importants (Goldberg, 1994).

(a)



(b)



Figure 1 : Cartes des sites échantillonnés dans le cadre des deux phases terrains du programme International Mussel Watch : phase Américaine du Sud-Caraïbes, 1991- 1993 (a) ; phase Asie-Pacifique, 1994-2001 (b) (d'après Sericano et al., 1996 et Monirith et al., 2003

Cependant, malgré la place de ce coquillage dans les habitudes alimentaires asiatiques, très peu d'études avaient été réalisées sur sa contamination par les micropolluants provenant des bassins versants. Aussi, afin de répondre à cette problématique de santé publique et plus généralement pour estimer la contamination des eaux côtières de la zone Asie-Pacifique, un programme Asie Pacifique Mussel Watch (APMW) fut initié en 1994. Au total, 102 sites ont été étudiés dans 11 pays : Philippines, Thaïlande, Inde, Japon, Vietnam, Malaisie, Cambodge, Corée, Chine, Singapour, Indonésie. Outre *Perna viridis*, deux autres espèces de moules ont été prélevées : *Mytilus galloprovincialis* et *Crenomytilus graymus*. D'après Monirith (2003), si aucune version pérenne du réseau n'est aujourd'hui envisagée, 5 campagnes ont tout de même été réalisées en 1994, 1997, 1998, 1999, 2001. Les analyses de contamination n'ont concerné que des polluants organiques persistants : DDT et résidus, lindane, congénères de PCB, hexachlorobutadiène. Une contamination aux POP, au DDT et au lindane a été observée sur l'ensemble des sites étudiés.

2.2 Le volet chimique de la directive cadre sur l'eau (2000) et le choix d'une espèce bioindicatrice pour la Réunion

Dans le domaine de l'eau, l'Union Européenne a adopté depuis 1975 plus de trente directives ou décisions communautaires (eaux de baignades, zones conchylicoles, zones sensibles, Natura 2000, etc.). Elles reposent sur une double approche de lutte contre les rejets de substances dangereuses dans l'environnement aquatique et de définition de normes de qualité concernant des zones spécifiques ou pour des usages particuliers. Les objectifs, les normes de qualité et les valeurs guides variaient d'un milieu ou d'un usage à un autre. Ce système rendait l'édifice réglementaire européen complexe, peu lisible et de ce fait peu mobilisateur. En 1995, afin d'améliorer l'efficacité du système et d'assurer une meilleure cohérence entre les différentes directives, les responsables nationaux des politiques de l'eau ont initié une réflexion commune sur l'harmonisation de ces textes. Ce travail a abouti à la directive du 23 octobre 2000 qui entend proposer à la politique

communautaire de l'eau et aux Etats membres « un cadre législatif transparent, efficace et cohérent » (CE, 2000).

Parmi les objectifs de cette Directive, il était imposé aux états membres pour la fin 2006, la mise en place des réseaux de surveillance de l'état des eaux. Le programme modiole, vise directement à répondre à cette prérogative imposée par la DCE pour les eaux côtières de l'île de la Réunion. S'appuyant sur les travaux de Bourdelin (1994) indiquant un potentiel intéressant de la **modiole** (*Modiolus auriculatus*) pour la biosurveillance à Tahiti, l'ARVAM a proposé cette matrice biologique largement présente dans les zones récifales de l'île de La Réunion.

3 THEME 1 : ETUDE DES FOYERS NATURELS DE MODIOLES ET ECOPHYSIOLOGIE

La première activité développée dans le cadre de ce programme a été d'actualiser le recensement des populations de modioles sur l'île de la Réunion. En avril 2004, une campagne de terrain a été réalisée sur l'ensemble du littoral pour compléter l'étude réalisée en 2000 (Turquet et Cambert, 2001).

La première étape consistait à identifier et cartographier les principaux foyers littoraux de modioles de l'île et pour se familiariser avec les principales caractéristiques des milieux abritant chacune de ces populations (platier corallien, zone basaltique, plage de galets ...).

Sur la base de cette étude, deux populations naturelles ont été sélectionnées pour faire l'objet sur une année (août 2004 à juillet 2005) d'un suivi écophysio-physiologique mensuel de la biométrie et d'indices écophysio-physiologiques pour mieux connaître la biologie et l'écologie de la modiole sur l'île de la Réunion.

3.1 Méthodologie

3.1.1 Distribution des foyers naturels

La moule tropicale est un organisme filtreur, elle s'alimente préférentiellement de particules organiques en suspension dans la colonne d'eau. Elle affectionne donc les conditions battues et les eaux riches en matières organiques. Considérant ces deux paramètres et le contexte géomorphologique local, une liste de critères environnementaux favorables au développement de la modiole a été établie :

- **La proximité d'une fausse passe**, pour les zones récifales, puisque ces parcelles des récifs concentrent les courants de chasse des eaux lagunaires, riches en matières organiques. Elles ont été localisées à l'aide de la photo aérienne IGN de 1997 réalisée un jour de forte houle sur l'ouest de l'île mettant bien en évidence les panaches de sortie d'eau au niveau des fronts récifaux ;
- **La proximité d'une ravine**, source majeure de matière organique tout le long de la bande côtière de l'île.

Sur ces deux critères plusieurs autres paramètres sont venus se greffer guidant l'équipe de terrain. **La présence de coquilles de modioles mortes suite au passage d'une forte houle** le long du littoral a permis d'affiner les zones à prospecter et d'optimiser les temps de recherches. **Des entretiens avec les pêcheurs** (indépendants ou membres de l'association des « Jardiniers du lagon ») et les chasseurs sous-marins rencontrés au fil des sorties ont fourni une aide précieuse à la découverte de nouveaux sites. En effet, certaines familles réunionnaises viennent, depuis parfois plusieurs générations, prélever des modioles lors des grandes marées basses pour leur consommation personnelle. Dans les années 1990, un commerce occasionnel de ces bivalves était même observé suite à des grandes marées.

3.1.2 Suivi écophysiological de foyers naturels

Le suivi qui a été mis en place intègre les principaux paramètres suivis dans les réseaux de biomonitoring dans le monde (Mussel Watch, Rinbio, RNO) : l'indice gonadique, l'indice de condition, le pourcentage de graisse, la taille des individus.

3.1.2.1 Prélèvement, transport et conditionnement en laboratoire

Les échantillons ont été prélevés et traités au laboratoire de l'ARVAM le jour même du prélèvement dans des conditions répondant aux critères de qualité préconisés par Ifremer (Claisse, 2001 ; Pellouin, 2005).

Les modioles, vivant fixées au substrat, ne nécessitent pas de matériel de capture particulier. Elles sont simplement ramassées manuellement en apnée à l'aide d'un couteau pour décrocher les byssus du substrat. Elles doivent être détachées de leur support en prenant soin de ne pas arracher le byssus car ceci compromettrait leur survie lors du transport et les coquillages doivent être rincés extérieurement à l'eau de mer sur les lieux du prélèvement.

Le transport des bivalves vivants jusqu'au laboratoire se fait en caisse isotherme. Aucun accumulateur de froid n'est placé à l'intérieur afin de ne pas provoquer la mort des bivalves. En règle générale, les chocs thermiques doivent être évités entre le prélèvement et le traitement en laboratoire.

Au laboratoire de l'ARVAM, l'ensemble des modioles a été débarrassé de leurs épibiontes par grattage à l'aide de couteaux propres (algues calcaires, vers et autres mollusques). Puis la longueur de coquille a été mesurée à l'aide d'un pied à coulisse (précision 0,1 mm) et seules les modioles d'une longueur supérieure à 20 mm ont été décoquillées. Selon les prérogatives analytiques du laboratoire de Rouen, il est nécessaire de disposer de 200 g de chair humide pour les analyses. En fonction des saisons, ceci peut représenter un nombre de bivalves très variable que seule l'expérience des préleveurs permet d'évaluer.

Le décoquillage est la phase du traitement la plus délicate car les mollusques ne sont plus protégés par leur coquille et peuvent être contaminés par l'atmosphère du laboratoire ou des projections diverses. Il est donc nécessaire de procéder au décoquillage et à l'égouttage dans un laboratoire où n'est menée aucune activité contaminante. Le décoquillage a été réalisé à l'aide d'un scalpel en acier inoxydable propre. Dans un premier temps, le muscle rétracteur postérieur est sectionné afin d'ouvrir librement les deux valves et le byssus est éliminé. Puis la chair est détachée des valves, il convient de procéder avec précaution en évitant d'endommager le mollusque avec la lame. La chair est mise à égoutter durant 30 minutes au minimum sur un entonnoir de Buchner en porcelaine recouvert d'une feuille d'aluminium calcinée (450 °C ; 8 heures). Une fois égoutté, l'ensemble de la chair doit être transféré dans un ou plusieurs piluliers en verre tarés qui sont rapidement fermés en intercalant une feuille d'aluminium calciné entre verre et capsule plastique. Les échantillons devant être congelés, 1/4 du volume de chaque pilulier a été laissé vide. Après congélation durant au moins 48 heures, l'échantillon a été lyophilisé (-40°C ; 72 heures ; 0,1 bar) puis stocké en congélation avant envoi au laboratoire de Rouen pour analyse.

Il est à noter que pour résister aux congélations/décongélations qu'elles ont à subir, les étiquettes doivent être renseignées avec un stylo bille ou au crayon, à l'exclusion de tout autre moyen (pas de pointe feutre). Après chaque usage, les entonnoirs et couteaux utilisés ont été rincés à l'eau du robinet puis à l'eau distillée. Ils sont ensuite placés individuellement dans un sac en polyéthylène fermé, jusqu'à leur utilisation suivante.

3.1.2.2 Indice gonadique (IG)

Pour l'étude du cycle de la modiole, une classification des différents états macroscopiques des gonades a été adoptée. Elle est inspirée de celles couramment utilisés chez les moules (Bourdelin, 1994 ; Andral et Stanisière, 1999). En effet, le volume et l'aspect extérieur de la gonade varient lors de la gamétogénèse et cinq stades sont identifiables :

- **Stade 0** : stade de repos post ponte, les gonades ne sont pas visibles ;
- **Stade 1** : développement d'une poche translucide ;
- **Stade 2** : épaissement et coloration de la gonade. À ce stade, les sexes sont parfaitement identifiables car la coloration est différente ;
- **Stade 3** : augmentation significative de la taille de la gonade qui commence à recouvrir le reste de la masse viscérale ;
- **Stade 4** : développement maximal de la gonade qui recouvre entièrement le reste de la matière viscérale.

Pour chaque prélèvement modiole, cette échelle a été appliquée à un groupe de 30 individus tiré de manière aléatoire parmi les modioles > 20 mm. Leur sexe et leur indice gonadique ont été notés et un indice moyen a été déterminé pour chaque échantillon en multipliant le rang numérique de chaque stade par le nombre d'individus présentant ce stade de maturation, en faisant la somme de ces produits et en la divisant par le nombre total d'individus de l'échantillon.

L'indice gonadique d'une population varie ainsi de 0, quand toute la population adulte est au repos suite à une ponte, à 4 quand la maturation est à son maximum. Une augmentation de l'indice indique le développement des gonades et diminution indique une phase de ponte.

3.1.2.3 Traitement histologique des gonades

Afin d'améliorer la connaissance du cycle de reproduction de la modiole, il était intéressant de réaliser une première étude de l'histologie des gonades.

L'objectif était de disposer de coupes histologiques de référence pour chaque stade gonadique et cela pour chaque sexe.

La dissection des gonades a été réalisée par l'ARVAM. Les étapes de conditionnement (fixation alcool, formol, acide acétique) et le traitement en histologie (Coloration HRS : Hémalum-Rhloxine-Safran) a été réalisé avec le soutien du service d'anatomie et de cytologie pathologiques du Centre Hospitalier Départemental de la Réunion. Les lames ont été lues et photographiées sous microscope au laboratoire.

3.1.2.4 Indice de condition (IC)

Cet indice défini comme le rapport du poids sec de chair sur le poids sec de coquille constitue un bon indicateur de l'état physiologique (réserves énergétiques, croissance tissulaire, stade sexuel) des coquillages.

Il a été calculé chaque mois sur les échantillons prélevés. Pour cela, les modioles, dont la longueur dépasse 20 mm, ont été écoquillées en laboratoire. Les échantillons de chair, d'un poids de 200 grammes environs (quantité nécessaire aux analyses de contamination), ont été lyophilisés à l'ARVAM (-40°C; 72 heures ; 0,1 bar) puis le poids sec a été mesuré sur une balance de précision. Le poids sec de coquille a été obtenu après passage à l'étuve (50°C ; 24 h).

3.1.2.5 Pourcentage de matières grasses

Le pourcentage de matières grasses est obtenu par analyse des échantillons lyophilisés au laboratoire de Rouen selon la méthode Bligh and Dyer.

3.1.2.6 Suivi biométrique

La pérennité d'un réseau de biosurveillance repose en grande partie sur la préservation de la ressource en matériel biologique. Il est donc important de recueillir le maximum d'information sur la structure démographique de la population.

Les techniques utilisées en écologie sont nombreuses pour étudier les classes d'âges d'une population. Dans le domaine de l'étude des bivalves, la détermination de l'âge est le plus souvent réalisée à partir de caractères biométriques.

La biométrie consiste à étudier les distributions de taille dans une population d'êtres vivants. D'après une pré-étude réalisée par l'ARVAM (Turquet et Cambert, 2001), le paramètre « longueur de coquille » est très significativement corrélé à la largeur et au volume de la coquille. Ce paramètre a donc été choisi tout comme dans le cadre des travaux de Bourdelin (1994) pour caractériser la croissance d'une modiole.

La biométrie des deux populations a donc été étudiée chaque mois durant une année. Ce paramètre a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse (précision à 0,05 mm) sur l'ensemble des 6000 individus utilisés pour ce suivi.

3.1.2.7 Physico-chimie

Une sonde de température a été mise en place (Star-Odii ; starmon mini) dans le lagon de la Saline sur la station Living-stone. Cette zone correspond au type d'habitat où se développent les modioles.

3.2 Résultats

3.2.1 *Distribution des principaux foyers naturels*

Au total 21 sites abritant des modioles ont été mis en évidence. Comme le montre le tableau 1, le choix des critères « proximité d'une fausse passe » et « proximité d'une ravine » s'est révélé pertinent.

Ce travail conséquent de prospection a permis de définir les deux morphotypes de littoral favorables au développement de tapis denses de modioles :

- **Les platiers des récifs frangeants**

L'ensemble des zones à platier de l'Ouest et du Sud de l'île abrite des tapis de modioles plus ou moins étendus et denses pouvant compter, d'après Turquet et Cambert (2001), entre 600 à 2000 individus par mètre carré (figure 2). Les peuplements les plus denses en 2004 (Trou d'eau, Trois Chameaux et Saint-Leu) ont déjà été décrits comme tel en 1989 par Naïm et Cuet. D'après Bourdelin (1996), ces mollusques vivent 3 à 4 années maximums, cela suppose que ces populations existent depuis plusieurs générations.

S'il est difficile d'établir une liste exhaustive des facteurs environnementaux gages d'un bon développement de telles populations, plusieurs critères se dégagent :

Tout comme à Tahiti (Bourdelin, 1996), les zones les plus riches se situent à faible profondeur (0,5-1,3 m) à proximité d'une fausse passe ou d'une ravine (apport en matière organique), dans des zones rarement exondées et bénéficiant d'un régime hydrodynamique modéré.

- **Les zones à roches basaltiques médiolittorales**

Ce profil de biotope est observé sur les côtes Sud et Est de l'île (Figure 2). Des populations de modioles ont été répertoriées, mais leur mode de répartition diffère des banquettes denses observées en zone récifale. Le mode battu de ces rivages oblige les modioles à se fixer dans les petites anfractuosités et failles caractéristiques de l'érosion marine de la roche volcanique basaltique. Les groupes de modioles n'excèdent pas la quinzaine d'individus et le plus souvent des groupes de 1 à 5 individus sont observés.

Cette répartition plus diffuse, moins dense, s'étend en revanche sur une zone importante. D'après le travail d'enquête réalisé auprès des pêcheurs et les observations réalisées au cours des sorties terrains, l'ensemble des côtes de type falaise volcanique médiolittoral sont concernées. Cela représente notamment l'ensemble du littoral compris entre Sainte-Rose et l'Anse des Cascades.

Mais l'accessibilité de ces sites reste problématique et leur étude ne peut être qu'occasionnelles et en aucun cas s'inscrire dans un programme de monitoring pérenne.

Tableau 1: Liste des sites prospectés durant la campagne cartographie modiole 2004 et description des principaux paramètres: densité des populations, profondeur, type de substrat (SB, sable basaltique; SC, sable corallien ; AR, affleurement rocheux ; PC, platier corallien ; G, galets ; AA, assemblage algale ; DC, débris coralliens), intensité du régime de houle moyen, présence d'une fausse passe, apports (R, ravine ; P, percolation d'eau douce)

	Sites	Densité	Profondeur (en m)	Type de substrat benthique	Houle	Présence d'une fausse passe	Apports
Nord	Baie de la Possession		2	G/R/SN	***		R
Ouest	Maharani-Boucan	***	1,3	PC/SC	*	*	
	Les Aigrettes	***	1,3	PC/ AA	***	*	
	Grand fond	***	1	PC/ AA	**	*	R
	Trois Chameaux	*****	p < 1	PC/AA/DC	**	*	
	Les Villas du Lagon	*	p < 0,5	DC/AA	*	*	R
	Trou d'eau	*****	1	PC/AA/DC	*	*	P
	Trois Bassins	*	1	G /DC	***		R
	Le Coghor	**	p < 0,5	PC/AA/DC	**	*	R
	La ferme corail	*	p < 0,5	PC/AA/DC	*	*	R
	Le spot "la tortue"	***	p < 1	PC/AA	***	*	R
	Port de Saint -Leu	*****	1	PC/SC/AA	***	*	R
	Saint-Leu "Gendarmerie"	****	p < 1	PC/SC/DC	**	*	
	Saint-Leu "cimetière"	****	1	PC/SC/DC	**	*	P
L'Etang-salé	***	1	PC/DC/SC/SN		*	P	
Sud	Terre-Sainte	**	1	PC/DC	****	*	R
	Grand Bois	*	1	PC/R	****	*	R
	Grand Anse	***	0,5	PC/AA	**	*	
Est	Anse des Cascades	**	1	G/R	***		R
	Pointe Corail	*	p < 0,5	R	***		
	Saint-Benoît (Butor)		p < 1,5	R/G	***		R

Par ailleurs, ce travail de terrain a mis en évidence deux morphotypes de sites ne pouvant abriter que temporairement des populations de modioles. Les **zones à galets inframétriques** représentent un substrat dur propice à la fixation de larves de moules. En revanche, la pérennité de cette population n'est pas assurée tant ce substrat présente peu

de stabilité face à la houle. Ainsi, en 2000, un peuplement important de modioles avait été observé sur une zone de platier arasée et de galets face à l'embouchure de la ravine Trois Bassins. Suite au passage du cyclone Dina, qui provoqua un remaniement important de cette zone à galets, ce peuplement est aujourd'hui réduit à quelques individus épars. De même, à La Possession, des tapis denses de moules avaient été observés en 1999, 2000, 2001, face à la Ravine des Lataniers et à la Ravine à Malheur (Turquet et Cambert, 2001). Cette **zone à dominance sédimentaire** abrite des affleurements et des blocs rocheux favorables à la fixation et au développement de populations de moules. Ici encore l'influence des houles cycloniques et notamment celle du cyclone Dina a provoqué la disparition totale de la population de moules.

Les données relatives à l'emplacement, l'étendue et la densité de ces populations récoltées lors de cette campagne de terrain ont été numérisées à l'aide du logiciel Map-Info. Les observations de Naïm et Cuet (1989) et de Turquet et Cambert (2001) ont été intégrées à la cartographie thématique réalisée (Figures 3 à 6).

Répartition des foyers au sein de la Réserve Naturelle Marine

Depuis la réalisation de cette prospection, l'Etat a mis en place une Réserve Naturelle Marine par le décret n° 2007-236 du 21 février 2007 (Journal Officiel du 23 février 2007).

Le périmètre de la réserve s'étend du Cap La Houssaye à la Roche aux Oiseaux à l'Etang Salé, soit un linéaire côtier d'environ 40 km. La réserve se situe sur le Domaine Public Maritime, à partir du rivage et jusqu'à une profondeur comprise entre -15 m et -100 m. La surface totale est de 3500 ha environ, ce qui en fait le plus grand espace marin classé en réserve naturelle nationale du territoire national. Trois niveaux de réglementation sont mis en place au travers de zonages spécifiques prévus dans le Décret de création dont un niveau de protection intégrale (Niveau 3) sur environ 5 % de la superficie de la réserve. Dans ces espaces de niveau 3, toutes formes d'activités, travaux, fréquentations, circulations, mouillages ou amarrages sont interdits. Des autorisations individuelles pour le suivi scientifique, la gestion et la surveillance de la réserve pourront être délivrées par le préfet. La mise en œuvre de cette réglementation sera effective dès lors que le balisage sera déployé soit pour la fin 2008. Pour l'heure l'ARVAM dispose d'une autorisation de prélèvement dans les zones de niveau de protection 1 et 2 délivrée le 20 juillet 2007 par la Direction Régionale des Affaires Maritimes de la Réunion et valable jusqu'au 31 décembre 2009.

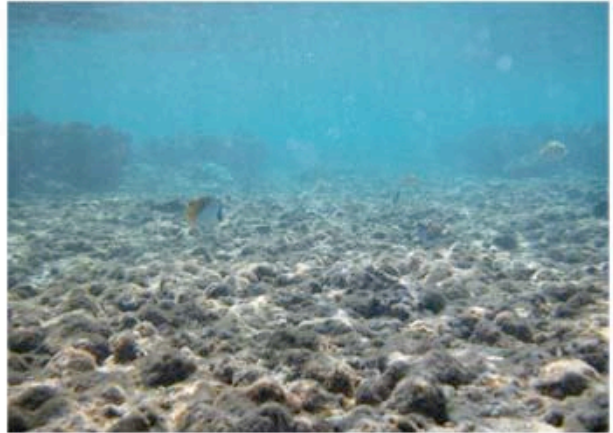
L'accessibilité de la ressource en modiole étant un paramètre important dans le choix du site source pour un réseau de biomonitoring, le positionnement des zones de niveau 3 de la réserve a été intégré au travail de cartographie des peuplements réalisé en 2004. Il s'avère que les peuplements les plus importants ne figurent pas dans ces zones de protection intégrale. Les prélèvements pourront donc être réalisés sur le site source choisie pour réaliser des opérations de transplants de modioles tout en respectant ce nouvel outil de protection de l'environnement récifal de l'île.

Platier récifal de l'ouest

Les platiers récifaux représentent des zones protégées de la pression de la houle par un front récifal. La majorité des populations naturelles de modioles occupent ces zones abritées.



Des banquettes de modioles se développent sur la dalle du récif entre les patates coralliennes. Elles sont souvent denses avec plusieurs centaines d'individus par mètre carré. Elles restent discrètes grâce à un épiphytisme important.



Côte volcanique battue

Le front de ces zones est fortement battu par la houle alimentant de petites cuvettes naturelles en zone supralittorale. Les peuplements benthiques sont par conséquent assez limités mais les modioles ont su s'adapter à ces conditions.



Pour résister à la pression de la houle, les modioles vivent par petits agrégats dans les infractuosités du front ou formant de petite tâches dans les cuvettes littorales.



Figure 2: Présentation des deux types de sites propices au développement de la moule tropicale, *Modiolus auriculatus*

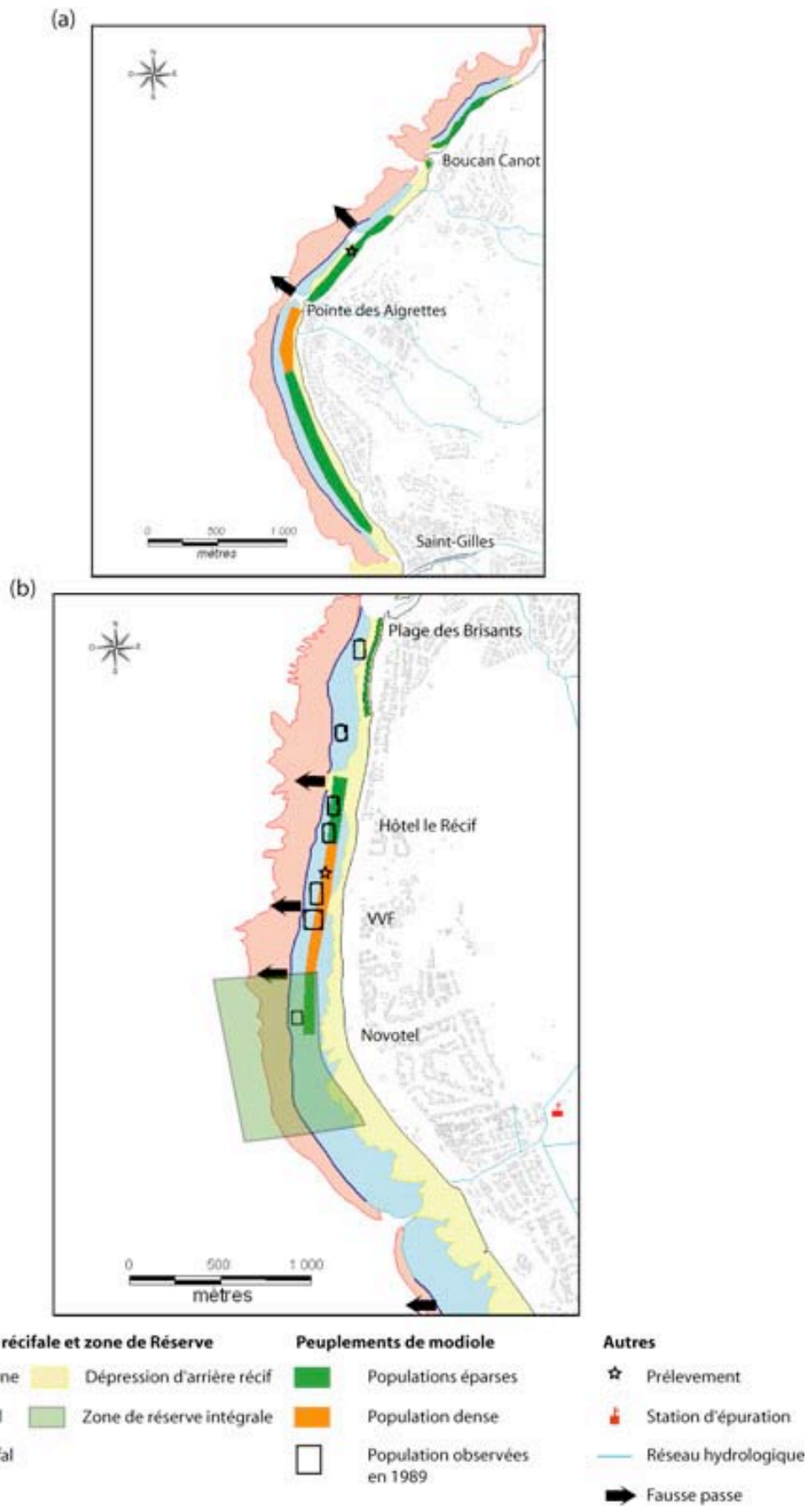


Figure 3: Cartes des peuplements de modioles sur les secteurs de Boucan Canot-Grand Fond (a) et de l'Hermitage (b)

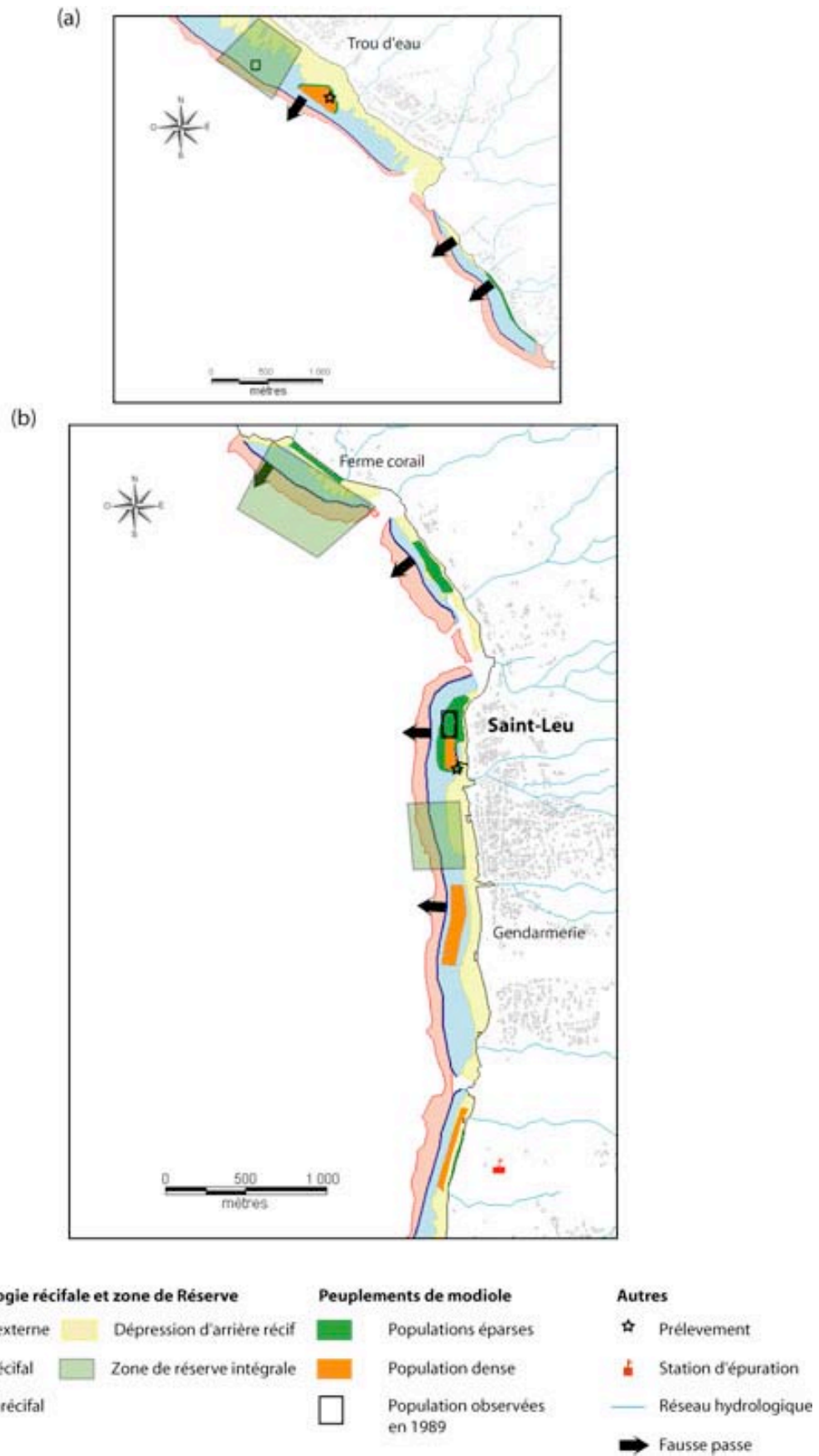


Figure 4: Cartographie des peuplements de modioles des secteurs de Trou d'eau (a) et de Saint-Leu (b)

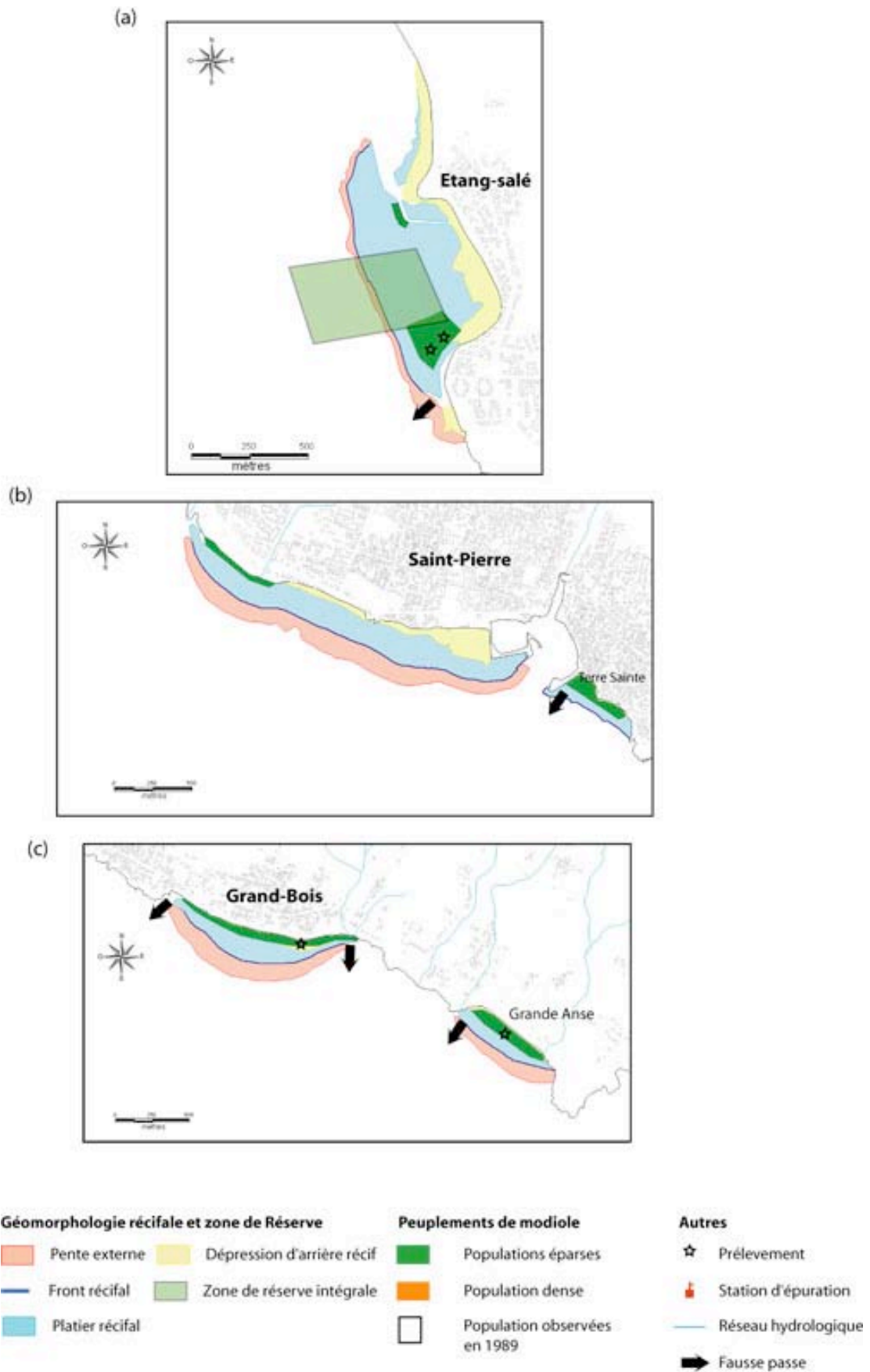


Figure 5: Cartographie des peuplements de modioles des secteurs de l'Etang-salé (a), de Saint-pierre (b) et de Grand Bois - Grande Anse (c)

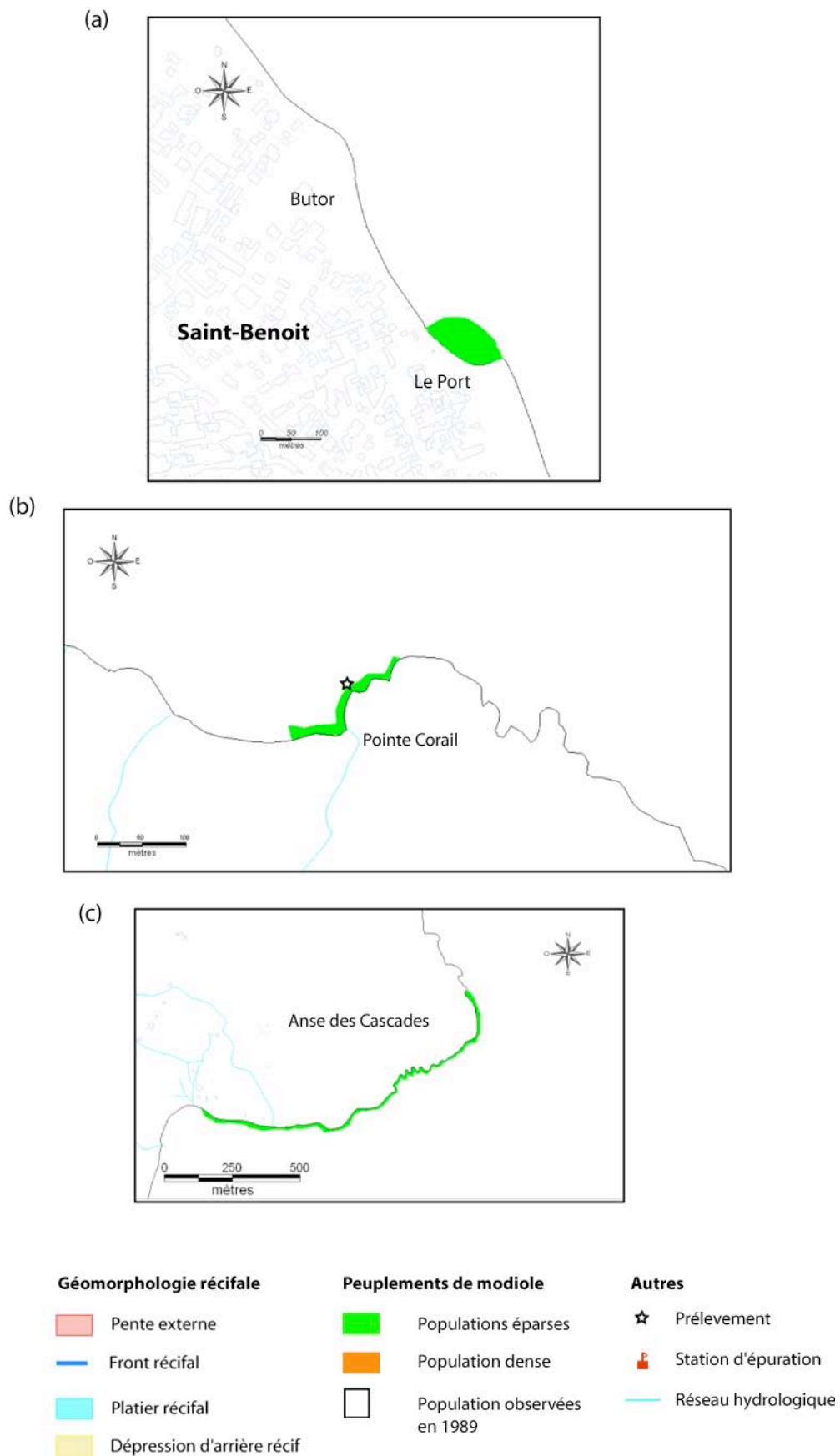


Figure 6: Cartographie des peuplements de modioles des secteurs de Saint-Benoît (a), de Pointe Corail (b) et de l'Anse des Cascades (c)

3.2.2 Sélection de deux sites pour le suivi écophysologique

Deux populations ont été sélectionnées pour faire l'objet d'un suivi écophysologique. Le choix de ces populations situées en lagon au niveau du platier interne a été guidé par :

1. La facilité d'accès du site ;
2. La structure différente des deux populations (banquette dense à Saint-Leu et en agrégats éparses à Trou d'eau) ;
3. Conditions environnementales (proximité de ravine et de fausse passe).

Le site de Trou d'eau est situé sur le plus grand récif de l'ouest de l'île (Figure 7). L'hydrodynamisme y est modéré même si la population est située face à une fausse passe très active qui draine la vidange sud du lagon. La population se présente en divers agrégats de moins de 10 individus fixés sur les flancs des travées coralliennes et recouverts d'une épaisse couverture algale.

Le site de Saint-Leu occupe également une zone de platier mais nettement plus soumise à la houle. La population est organisée en un véritable tapis uniforme, liant débris coralliens et coquilliers, modioles et échinodermes. Les modioles sont recouvertes d'algues calcaires encroûtantes très résistantes.

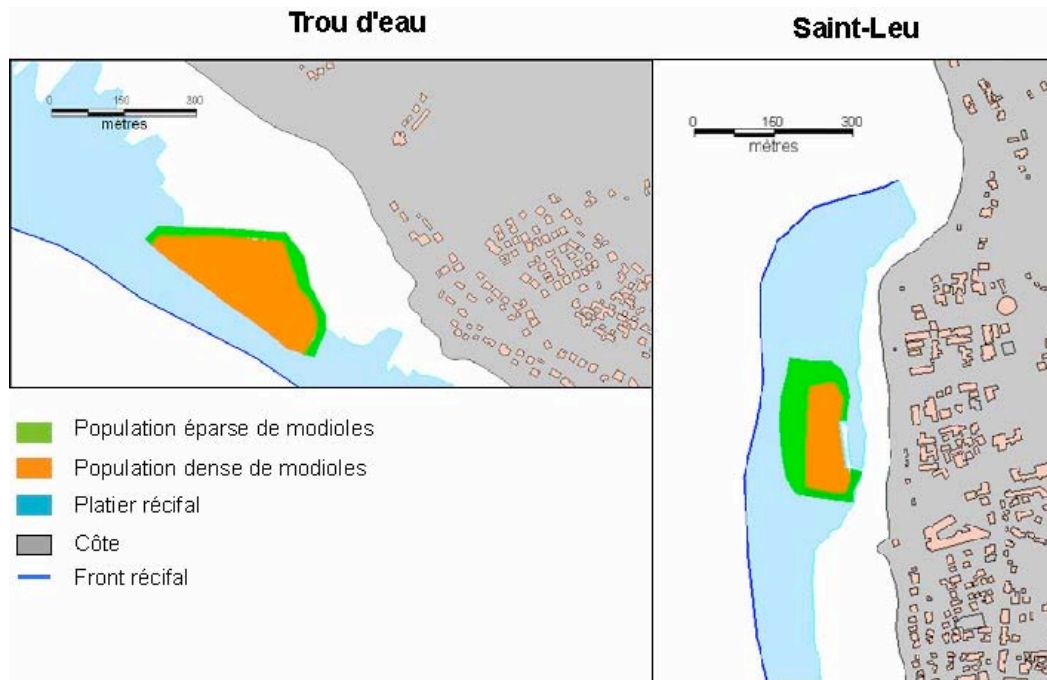


Figure 7 : Populations de modioles suivies entre août 2004 et juillet 2005 sur les sites de Trou d'eau et de Saint-Leu

3.2.3 Suivi écophysologique de populations naturelles de modioles : Saint Leu (2004-2006) et Trou d'eau (2004-2005)

Le suivi a débuté sur les deux sites en août 2004. En mai 2005, les premiers résultats obtenus sur le site de Saint Leu ont été jugés le plus intéressant par le comité d'expert du programme. Le suivi a donc été reconduit d'une année sur ce site, ce qui représente **34 opérations de prélèvement**. Seules deux opérations n'ont pas pu être réalisées en raison de la météo en janvier 2005 à Trou d'eau et en mai 2006 sur le site de Saint Leu.

Les données brutes sont présentées en Annexe 1.

3.2.3.1 Etude du cycle de reproduction : indice gonadique (IG) et histologie des gonades

Indice gonadique (IG)

L'évolution de l'indice gonadique suit la même dynamique sur les deux sites avec une période de repos annuelle qui se situe aux alentours du mois de mai (Figures 10 et 11). Puis, sur les deux sites le développement des gonades est progressifs et correspond à l'augmentation des températures en lagon. L'indice maximum est observé durant la période chaude au mois de février. À l'approche de l'hiver austral, l'indice chute brusquement lors de la **ponte annuelle** en mars ou avril selon les années. Cela confirme que la variation de température est un facteur essentiel du déclenchement de la ponte chez la modiole. Ce cycle a été particulièrement bien observé à Saint Leu durant l'été 2004-2005. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Bourdelin à Tahiti en 1994 et ceux obtenus avec d'autres moules tempérées, tropicales ou subtropicales. Ainsi, comme *Modiolus auriculatus*, les moules du genre *Mytilus*, présentes en Méditerranée, en Australie et en Inde ont une ponte maximale durant l'hiver de l'hémisphère correspondant.

Ce cycle de reproduction reflète le modèle de recrutement adopté par la modiole. Cette espèce présente une stratégie de reproduction commune aux invertébrés marins benthiques en général et aux moules marines en particulier. Elles ont une ponte synchronisée ayant pour but de produire un naissain concentré assurant un recrutement important pour la population parentale, car la survie larvaire est faible.

Les données de Trou d'eau en 2005 ont cependant montré une ponte progressive sur 4 mois. Aucune chute brutale de l'indice gonadique n'a pu être mise en évidence. Ceci s'explique vraisemblablement par la distribution spatiale des individus à Trou d'eau. Les modioles ne sont pas organisées en tapis homogènes mais en agrégats de quelques individus. L'ensemble des individus ne s'y trouve pas accolés dès lors il est possible que la synchronisation de la maturation et de la ponte y soit moins forte.

L'analyse détaillée de l'évolution du développement des gonades permet de distinguer, outre la période de ponte massive en mars - avril, une régression du nombre d'individus matures en novembre – décembre. Cette baisse est visible sur les résultats de Saint Leu en 2006 et de Trou d'eau en 2005. Le même phénomène a été observé chez une population intertidale de modiole à la même période à Tahiti (Bourdelin, 1994) et pourrait correspondre à un **ponte restreinte**. Ce phénomène n'a pas été observé chaque année à Tahiti et il n'a pas non plus été observé à Saint Leu en 2005, cela laisse à penser qu'un phénomène extrinsèque peut provoquer cette ponte hors saison. La validation de cette hypothèse passe par l'observation d'un recrutement à la même période or les individus les plus jeunes sont très difficile à échantillonner. Aussi cette ponte restreinte a pu être validée qu'une seule fois par l'échantillonnage d'individus de longueur inférieure à 5 mm en janvier 2005 à Saint Leu. Si ce phénomène est confirmé, il ne concerne cependant qu'un faible pourcentage de la population et n'a donc que peu d'influence sur l'état physiologique d'un échantillon large d'individus qui serait prélevé à cette période.

Traitement histologique des gonades

Les travaux d'histologie ont permis de réaliser la première banque de données de références sur la gamétogénèse chez les modioles.

L'analyse des lames histologiques a confirmé la pertinence des 5 stades gonadiques adoptés pour ce suivi (Figures 8 et 9).



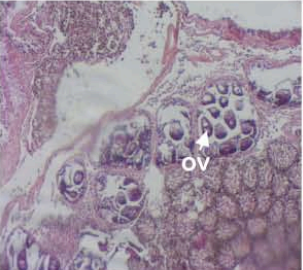

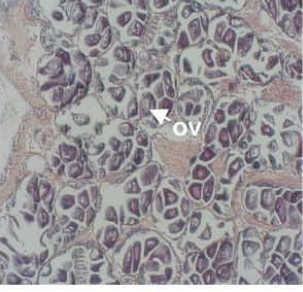

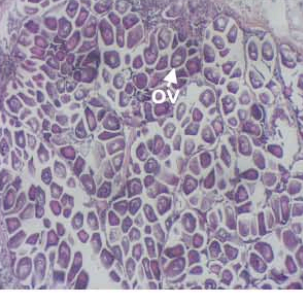

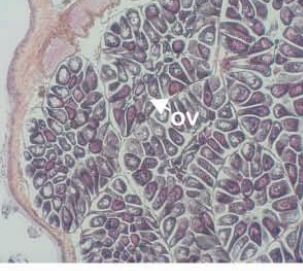
Stade 0	Stade de repos post ponte, les gonades ne sont pas visibles ;		
Stade 1	Développement d'une poche translucide. les premières gonades femelles orangées (go) renfermant les ovocytes (ov) sont visibles à l'oeil nu. ;		
Stade 2	Epaississement et coloration de la gonade femelle. À ce stade les sexes sont parfaitement identifiables car la coloration est différente ;		
Stade 3	Augmentation de la taille de la gonade et recouvre une partie importante de la masse viscérale. Les gonades renferme une densité importante d'ovocytes ;		
Stade 4	Développement maximal de la gonade qui recouvre presque entièrement le reste de la matière viscérale. La ponte est imminente.		

Figure 8 : Description des caractéristiques physiologiques et histologiques des différents stades gonadiques chez les individus femelles (*Modiolus auriculatus*)



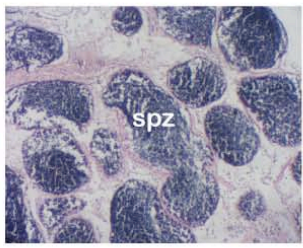






Stade 0	Stade de repos post ponte, les gonades ne sont pas visibles ;		
Stade 1	Développement d'une poche translucide et apparition des premiers spermatozoïdes (spz) au sein des gonades (go) identifiables par la formation de petites tâches blanchâtres ;		
Stade 2	Épaississement et densification du réseau de gonades. À ce stade les sexes sont parfaitement identifiables car la coloration est nettement différente ;		
Stade 3	Augmentation de la taille de la gonade qui recouvre une part importante de la masse viscérale;		
Stade 4	Développement maximal de la gonade qui recouvre la quasi totalité de la matière viscérale. Les spermatozoïdes sont matures. La ponte est proche.		

Figure 9 : Description des caractéristiques physiologiques et histologiques des différents stades gonadiques chez les individus mâles (*Modiolus auriculatus*)

3.2.3.2 Physiologie : indice de condition et pourcentage de matières grasses

Indice de condition (IC)

À Saint-Leu, l'indice de condition a évolué différemment durant les deux périodes de ponte. En 2005, l'IC est resté stable quelle que soit la saison. En 2006, l'indice de condition a augmenté en période estivale pour diminuer pendant la période hivernale.

Le protocole utilisé était strictement le même sur les deux années de suivi, cette variation s'explique vraisemblablement par le contexte environnemental. En effet, la masse de chair est très dépendante des conditions environnementales rencontrées par les modioles (nutrition, température, agitation du milieu ...). La stabilité observée en 2005 est sans doute liée à une certaine stabilité de conditions environnementales moyennement favorables au développement de chair chez la modiole. Et à l'inverse, les conditions auraient été plus favorables au développement de chair lors de la saison estivale de 2006.

À Trou d'eau, l'évolution de l'indice de condition montre une diminution, parallèle à celle de l'indice gonadique, dès la fin de la période estivale mettant en évidence plus directement les variations physiologiques inhérentes à la ponte. Le site de Trou d'eau se situe au niveau d'une portion très large du lagon. Ainsi en comparaison du site de Saint Leu, la population est plus éloignée des apports d'eau douce terrestre et également plus protégée de l'impact des houles. Ce contexte environnemental a pu favoriser la production de chair. À l'inverse, le site de Saint Leu est plus exposé aux apports d'eau douce et aux fortes houles, en raison de la proximité de la ravine des Poux et de l'étroitesse du lagon.

Les variations de l'indice de condition peuvent être également liées au développement d'épiphytes sur les coquilles de modioles. Des algues calcaires recouvrent tout ou partie des coquilles sur le site de Saint Leu. Ces algues peuvent être d'une épaisseur de plusieurs millimètres et sont très difficiles à retirer sans risque de casser la coquille. À Trou d'eau, un épiphytisme est également observé mais il s'agit d'un assemblage d'algues molles qui est plus facilement éliminé.

Le pourcentage de matières grasses

Ce paramètre a fait l'objet d'un suivi uniquement d'août 2004 à juillet 2005. L'évolution est similaire sur les deux sites : lors de la période de gamétogénèse la part de matières grasses augmente chez la modiole (un maximum à 8% pds sec) puis elle diminue suite à la ponte (minimum à 1%).

3.2.3.3 Interaction physiologie – cycle de reproduction - température

Les figures 10 et 11 montrent les interactions entre les différents paramètres sur les deux sites étudiés.

On observe une bonne correspondance entre les variations de l'indice gonadique avec la température, le pourcentage de matières grasses et l'indice de condition. Toutefois, cette corrélation n'est pas statistiquement significative (test variance / covariance et test Pearson's product-moment corrélation).

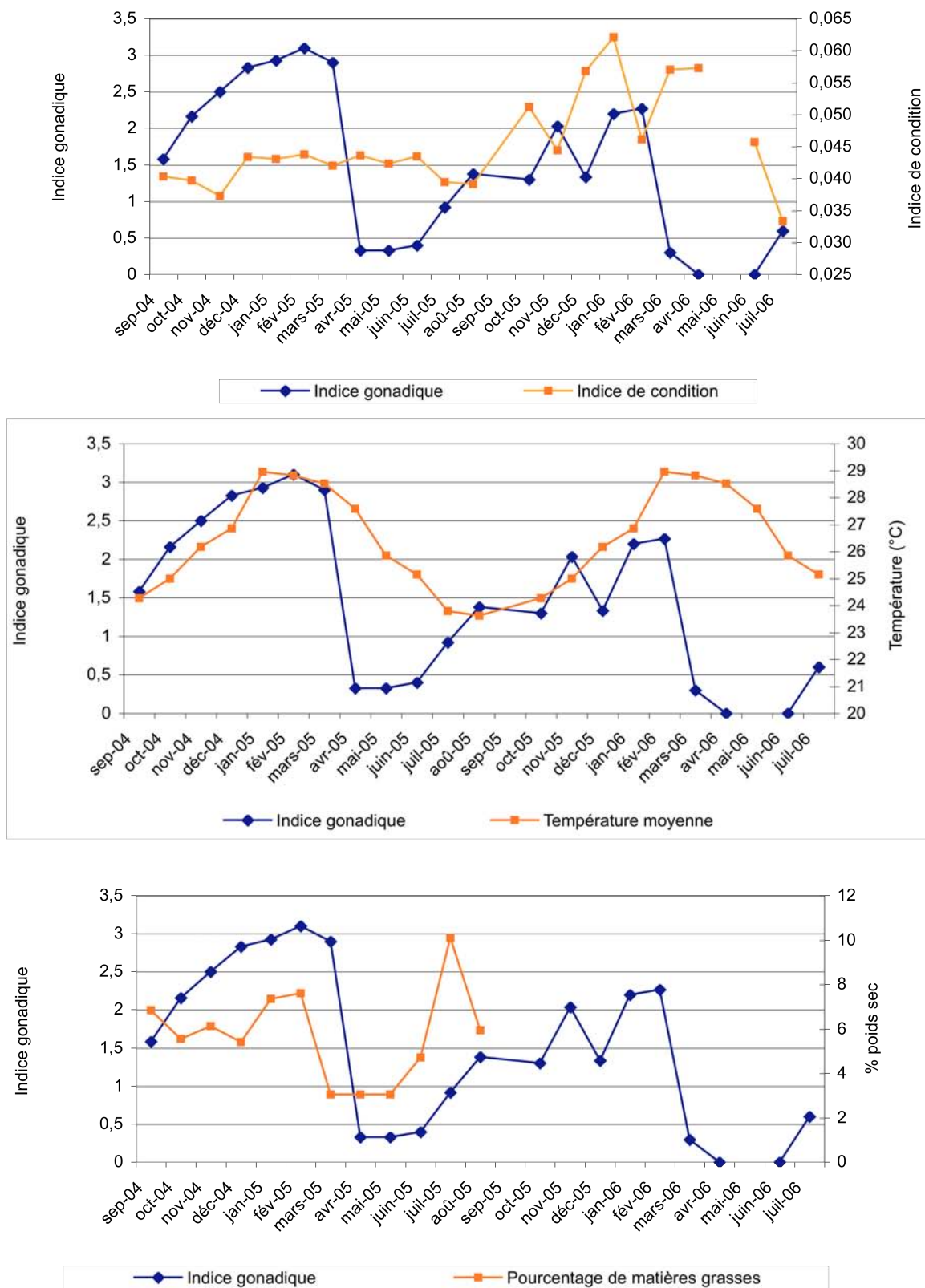


Figure 10 : Variations des indices écophysioologiques et de la température moyenne de l'eau en platier pour le site de Saint Leu de septembre 2004 à août 2005

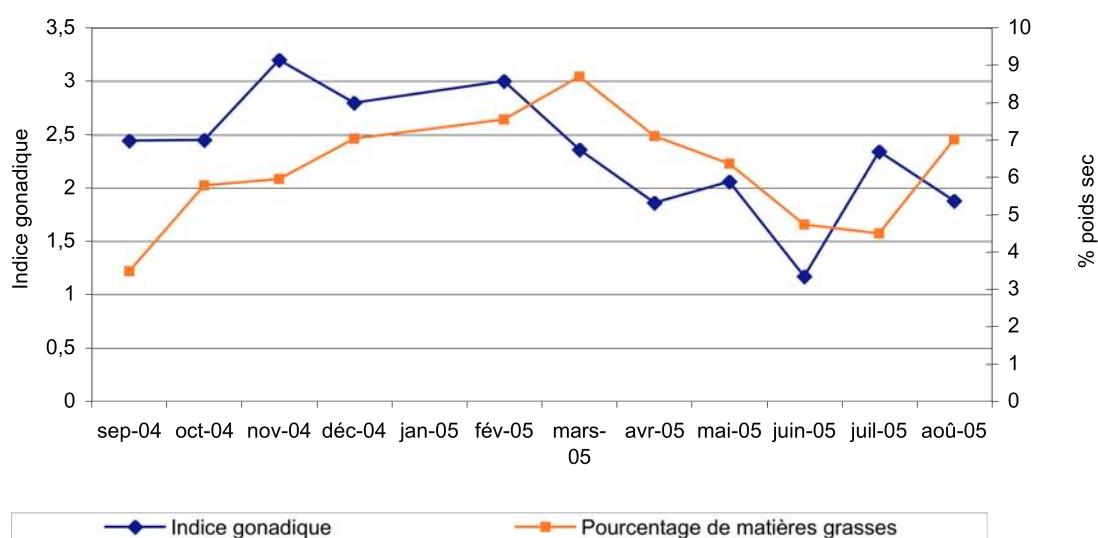
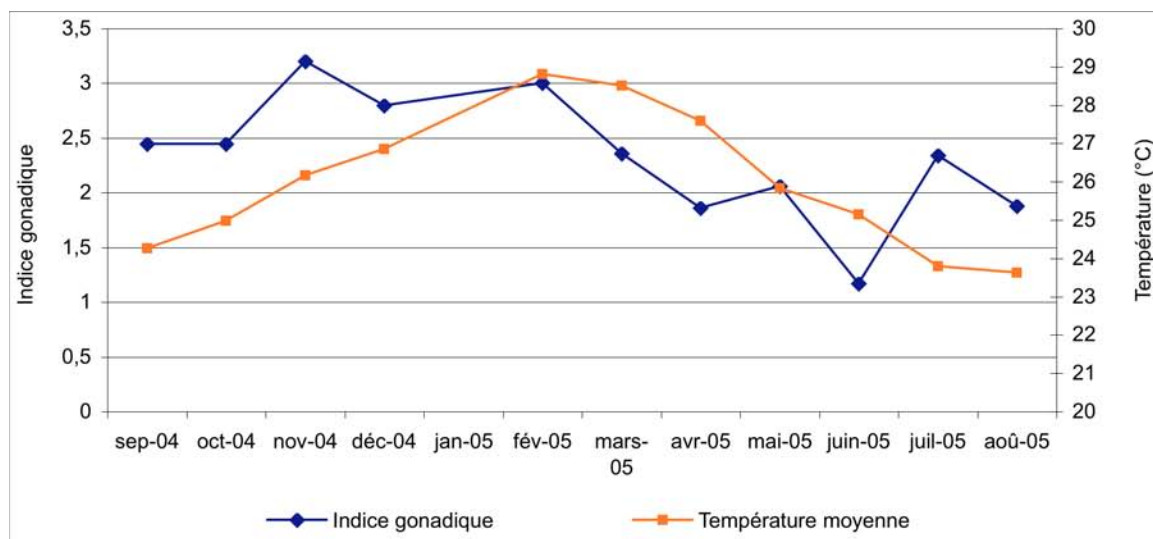
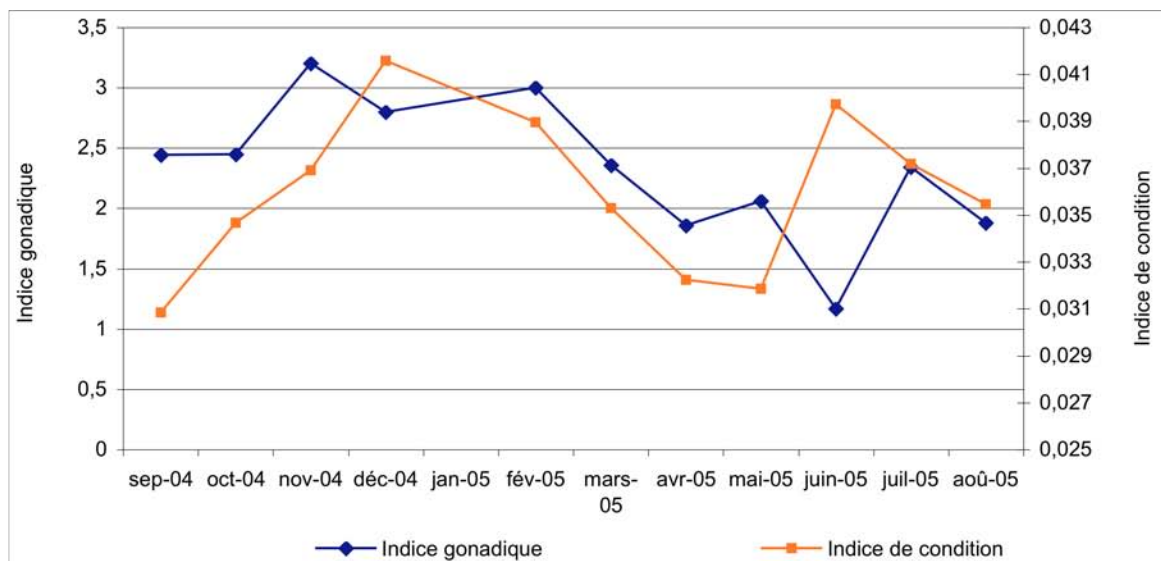


Figure 11 : Variations des indices écophysioéologiques et de la température moyenne de l'eau en platier pour le site de Trou d'eau de septembre 2004 à août 2005

3.2.3.4 Biométrie

La méthode des classes de taille et l'identification des cohortes présentes par la méthode des maximums successifs a permis d'analyser les données recueillies. Dans le cadre des données récoltées au cours de cette étude, l'écart-type se situe aux alentours de 12 mm lors de chaque échantillonnage et l'intervalle de classe a été fixé à 2 mm.

Tout comme à Tahiti (Bourdalin, 1994), chez les deux populations suivies à la Réunion, il apparaît que 3 cohortes cohabitent de manière stable au sein des banquettes de modioles (Figure 12) :

- **Cohorte 1** : Elle regroupe les individus adultes âgés de 1 an ou plus. Leur longueur supérieure à 20 mm et peut parfois approcher les 60 mm. Cette cohorte est relativement stable durant toute l'année oscillant en moyenne autour de 41,38 mm à Trou d'eau (EC= 4,44 mm) et de 39,14 mm à Saint-Leu (EC= 4,90 mm). D'un point de vue technique, il s'agit de la cohorte la plus aisée à échantillonner et à conditionner. L'ensemble de cette cohorte comporte des individus matures;
- **Cohorte 2** : Elle regroupe les individus de moins de 1 an et encore en phase de croissance. Leur taille est comprise entre 5 mm et 20 mm. Leur échantillonnage ne pose pas de difficultés particulières mais leur conditionnement (nettoyage, dissection) est peu aisée. L'ensemble de cette cohorte n'est pas mature ;
- **Cohorte 3** : Elle est constituée des recrues récentes d'une taille inférieure à 6 mm, âgées de moins de 6 mois a été observée. Cette cohorte est très difficile à échantillonner car les individus se distinguent mal des débris coralliens ou algaux. Selon les dates de ponte observées, elle peut être présente en théorie de mars à octobre dans les byssus des individus adultes. Il est également possible de l'observer durant l'été lorsqu'une ponte restreinte a lieu au début de l'été. Cela fût le cas en janvier 2005 à Saint Leu (Annexe 3 et 4).

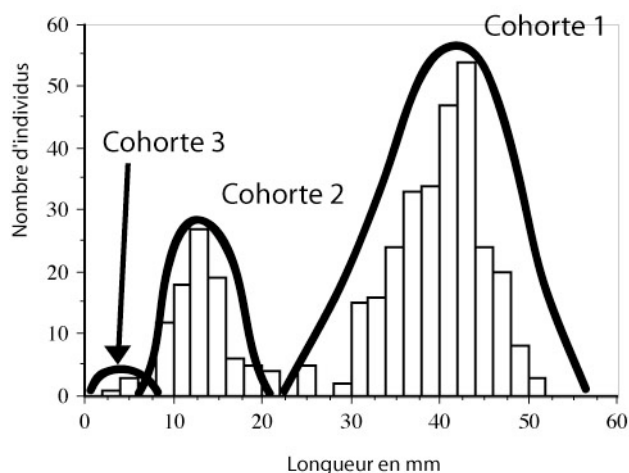


Figure 12 : Profil biométrique observé en octobre 2004 sur le site de Saint Leu ; il s'agit du profil classiquement observé dans une banquette de modiole et la cohorte 1 est la plus adaptée à la biosurveillance

Une fois ces cohortes identifiées, l'évolution de la croissance a été suivie sur la cohorte 2 et a permis de construire les **courbes de croissance** pour les deux sites et des les comparer aux travaux menés à Tahiti (Figure 13).

À Saint-Leu, la cohorte 2 (10 mm < L coquille < 20 mm) a enregistré une croissance de 22 mm en 12 mois. À Trou d'eau, sur la même période, la croissance est de 30 mm. Pour comparaison, les données de Bourdelin montrent une croissance de 36 mm en 1 an. Ces différences significatives de croissance observée chez des individus de 1 an s'expliquent par le mode de reproduction particulier des modioles et par les conditions de houle spécifiques à chaque site.

En effet, les populations de modioles se reproduisent selon le modèle du « tapis roulant », les recrues se fixent dès la ponte au byssus des modioles plus âgées. À la surface des banquettes ce sont les individus les plus âgés qui sont exposés à une érosion par la houle. Par ailleurs, les populations en banquette soumises à un fort hydrodynamisme auront tendance à augmenter la densité en individus pour mieux résister à l'érosion.

Ainsi deux types de populations en banquettes peuvent être observées :

- Type 1 : les populations de modiole à faible ou moyenne densité et situées en zone calme peuvent croître plus rapidement. C'est le cas à Trou d'eau où les populations sont éloignées de la barrière. En effet, chaque modiole a plus d'espace pour grandir et la pression de la houle est faible, peu d'individus sont arrachés ;
- Type 2 : les modioles sont organisées en banquettes très denses et soumises à l'influence régulière de fortes houles. C'est le cas à Saint Leu où les modioles situées en platier, proches de la barrière corallienne auront tendance à grandir moins vite, du fait du manque d'espace, et à avoir une taille plus faible car les modioles en surface sont régulièrement éliminées par cette érosion.

Dans des conditions idéales la taille d'une modiole peut même être comparable à une moule de milieu tempéré. En effet, l'Institut Halieutique et des Sciences Marines de Tuléar à Madagascar a observé sur un site très abrité une population de modioles avec une longueur moyenne de 74,82 mm (EC = 8,34 mm) avec un individu atteignant une longueur de 87,5 mm (Tsirivelo, 2003). Et sur une zone plus étroite du récif et beaucoup plus exposée la taille moyenne était de 39,78 mm (EC = 7,79 mm).

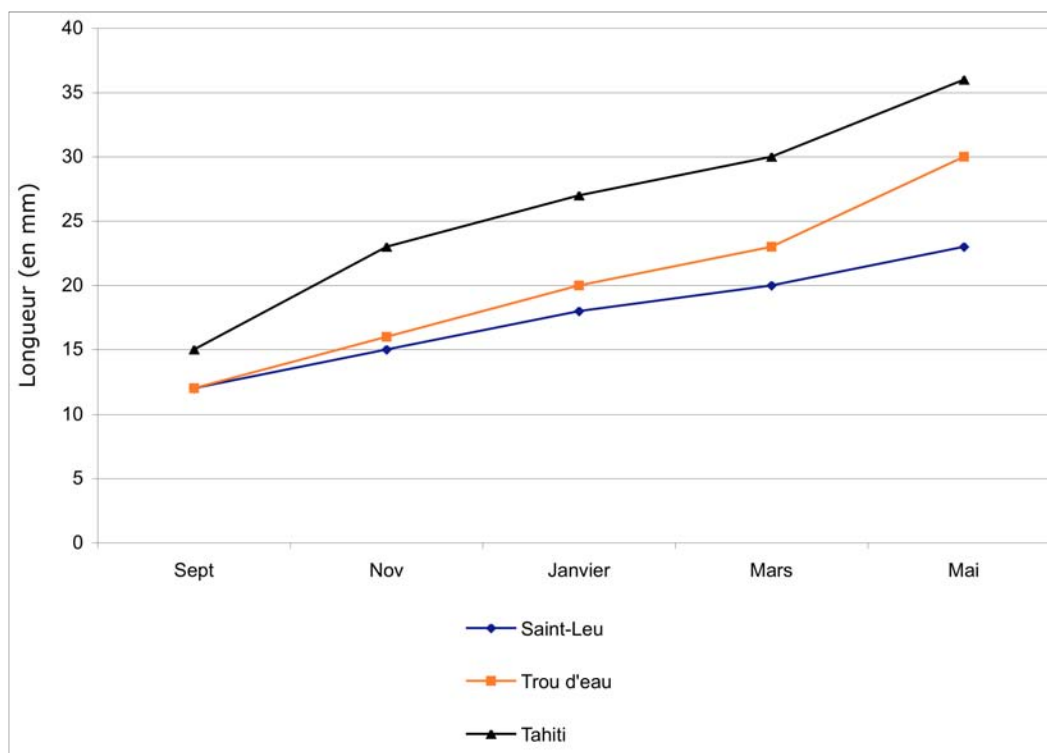


Figure 13 : Courbe de croissance sur 8 mois des populations subtidales de modioles de Saint-Leu, Trou d'eau et de Tahiti (Bourdelin, 1994)

3.3 Synthèse

Il ressort de l'étude des foyers naturels de modioles :

1. Des populations denses de modioles sont observées sur l'ensemble des platiers récifaux de l'Ouest et du Sud de l'île de la Réunion. Des populations plus diffuses et difficiles d'accès se sont développées dans l'Est sur les substrats volcaniques battus par la houle. Même si elle est limitée, leur présence naturelle le long de la côte Est élimine les risques d'introduction d'espèce lors des opérations de transplantation en pochon ;
2. Les populations observées en 1989 sur les platiers de Trois Chameaux, Trou d'eau et de Saint-Leu le sont encore aujourd'hui. Cela met en évidence le caractère pérenne de ces tapis denses de modioles (1 500 à 2 000 individus par mètre carré). Ces populations représentent donc un stock de modioles suffisamment important et stable pour alimenter des opérations de transplantation en pochon, compte tenu des résultats des premiers prélèvements et de l'accessibilité des différents sites, Trou d'eau et de Saint Leu sont les plus propices ;

D'autre part en mai 2007, la côte ouest de la Réunion a été soumise à une houle exceptionnelle avec des vagues dépassant les 10 m. Des zones de platier ont été fortement remaniées. Les peuplements de modioles à Saint Leu et Trou d'eau sont toujours présents et la densité est restée stable. La pérennité de ces deux sites semble donc confirmée.

En ce qui concerne le suivi écophysiological les principaux résultats sont les suivants :

1. Le relevé des indices gonadiques a permis de décrire pour la première fois le cycle de reproduction de *Modiolus auriculatus*. Il est semblable au cycle décrit à Tahiti avec une période de repos aux alentours du mois de mai avant un développement progressif des gonades dès la fin de l'hiver austral. Une ponte restreinte peut apparaître en novembre et la ponte annuelle survient en fin de saison humide dès la baisse des températures : en mars-avril. Ce cycle est bien visible à Saint Leu où les modioles sont organisées en une banquette très dense ce qui favorise la synchronisation des phénomènes de reproduction au sein de la population. La population de Trou d'eau, plus éparse est moins synchrone ;
2. Les populations de modioles présentent 2 à 3 cohortes selon la période de l'année. La cohorte la plus âgée regroupe les individus adultes et matures dont la longueur est supérieure à 20 mm. Elle est la plus adaptée au travail en laboratoire ;
3. Il n'existe pas de corrélation significative entre les indices écophysiological mesurés et les niveaux de contaminations au sein des populations naturelles. Une trop grande variabilité des conditions environnementales en lagon semble expliquer ce résultat.

Cette étude réalisée pour la première fois à l'échelle de la Réunion a également permis d'acquérir les compétences nécessaires aux étapes de prélèvement, de conditionnement et de transport des échantillons et d'identifier les avantages et inconvénients de l'utilisation de la modiole en biomonitoring :

1. La phase de prélèvement est désormais bien maîtrisée après 34 opérations réalisées sur des peuplements en banquettes ou en agrégats éparses. Pour le prélèvement proprement dit, l'utilisation d'un simple couteau de plongée pour détacher le byssus et d'un filet à prélèvement pour stocker les modioles est tout à fait adapté ;

2. La phase de transport : la modiole placée en glacière pour limiter les écarts de température résiste très bien à une exondation temporaire et au transport jusqu'au laboratoire ;
3. La phase de conditionnement est fastidieuse et prend beaucoup de temps car les coquilles sont colonisées par des populations denses d'algues molles ou calcaires qui nécessitent de gratter individuellement chaque individu. La taille réduite des individus (la longueur excède rarement les 50 mm) nécessite, pour obtenir une quantité de chair suffisante aux analyses (200 g humides), de disséquer un nombre important d'individus. De plus, la dissection s'avère fastidieuse pour des individus de moins de 20 mm. Il a également été observé que les échantillons devaient être traité très rapidement au laboratoire car ne supportant pas une exondation de plus 24 heures y compris au réfrigérateur.

4 THEME 2 : CAPACITES BIOACCUMULATRICES DE LA MODIOLE

À ce jour, aucun réseau de biosurveillance pérenne n'a encore été déployé en milieu tropical. L'effort de recherche concernant les capacités bioaccumultrices des espèces tropicales est resté très limité (Cambert, 2004). Une synthèse bibliographique a été préalablement réalisée et complétée par différentes expérimentations de terrain menées de 2004 à 2007 pour permettre d'évaluer les capacités de bioaccumulation de la modiole à la Réunion.

4.1 Synthèse bibliographique sur les capacités bioaccumultrices de *Modiolus auriculatus*

Deux programmes de recherche réalisés à Tahiti (Bourdeline, 1994) et en Egypte (El-Sikaily *et al* 2002 et 2003) ont étudié la bioaccumulation des contaminants par la moule tropicale, *Modiolus auriculatus*.

4.1.1 Bioaccumulation des éléments traces métalliques (ETM)

El-Sikaily *et al.* (2003) ont étudié les capacités bioaccumultrices de 21 populations naturelles de modioles (8 en Mer Rouge et 13 en Méditerranée). Les analyses ont porté sur 8 ETM : Cadmium, Cobalt, Cuivre, Fer, Manganèse, Nickel, Plomb et Zinc (Annexe 6). D'autre part F. Bourdeline (1994), a étudié 4 ETM sur 2 sites à Tahiti : Fer, Nickel, Plomb, et Zinc.

Dans ces deux études, les dosages ont été réalisés par absorption atomique directement dans des broyats de chair sans lyophilisation préalable. Les résultats sont exprimés en mg/g de chair humide.

Qualitativement, les deux études ont mis en évidence des concentrations significatives dans la chair des modioles pour les neufs ETM analysés

Quantitativement, les échantillons de Tahiti montrent des concentrations de 20 à 60 % supérieur dans la chair des modioles prélevées en zone intertidale. Situés plus au bord et exondés deux fois par jour, ces individus semblent plus exposés aux contaminants en subissant une influence anthropique plus importante.

Les concentrations mesurées à Tahiti sont très faibles en comparaison des résultats obtenus en Egypte (Tableau 2). Par exemple le fer présente une concentration moyenne dans la chair de modiole en Egypte 400 fois supérieure à celle mesurée dans les échantillons de Tahiti. La présence d'activité industrielle et urbaine à proximité des zones échantillonnées en Egypte pourrait expliquer cette différence.

Tableau 2 : Concentrations moyenne en ETM (en mg/g de chair humide) d'échantillons de modioles prélevés en mer rouge, en méditerranée et à Tahiti (modifié d'après El-Sikaily et al 2003 et Bourdelin, 1994)

		Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
Mer Rouge		0,7	2,18	5,95	45,83	4,81	3,33	1,46	17,39	-
Méditerranée		0,34	1,51	8,83	142,68	7,95	2,85	0,9	14,14	-
Tahiti	Intertidal	-	-	-	0,25	-	-	0,0046	0,0064	5,07.1 0-5
	Subtidal				0,19			0,0039	0,0056	2,01.1 0-5

Sur la base de ces résultats, chacun des auteurs considère que la modiole constitue un bon intégrateur des éléments traces métalliques.

4.1.2 Bioaccumulation des HAP

El-Sikaily *et al* (2002), ont étudiés les capacités bioaccumultrices de 20 populations naturelles de modioles (8 en Mer Rouge et 12 en Méditerranée). Les analyses ont porté sur 16 HAP (Annexe 6).

Cette unique étude montre que tous les HAP analysés ont été détectés sur au moins un site. Les résultats publiés sont difficilement comparables à ceux obtenus sur d'autres bivalves en raison du protocole utilisé (pas de lyophilisation, résultats exprimés en chair humide). Selon les auteurs la modiole constitue comme un outil biologique fiable pour l'estimation qualitative de la contamination d'un écosystème par les HAP.

4.1.3 Bioaccumulation du lindane

Bourdelin (1994) a mené une étude *in vitro* de contamination - décontamination de la modiole par le Lindane .

Les résultats de l'étude montrent que la modiole concentre rapidement le lindane, en revanche elles l'éliminent beaucoup plus lentement. La phase plateau est atteinte après 3-4 jours d'incubation et en 4 jours seul 40 % de la contamination est éliminée (Figure 14). Bourdelin a également réalisé une comparaison de la valeur du facteur de bioconcentration obtenu avec le lindane pour la modiole avec les valeurs obtenues pour d'autres organismes marins. Le BFC rapporté au poids de chair est de 350. Cette valeur est élevée par rapport aux valeurs notées dans la littérature : 100 pour *Mytilus edulis* (Ernst, 1977).

Ces résultats semblent indiquer la bonne capacité de la modiole à bioaccumuler le lindane et par voie de conséquence les composés organochlorés.

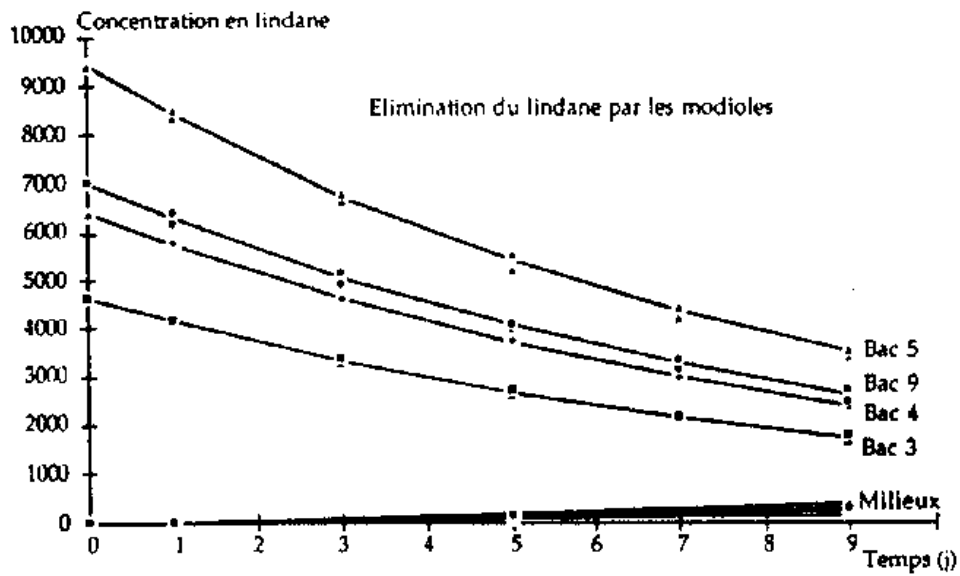
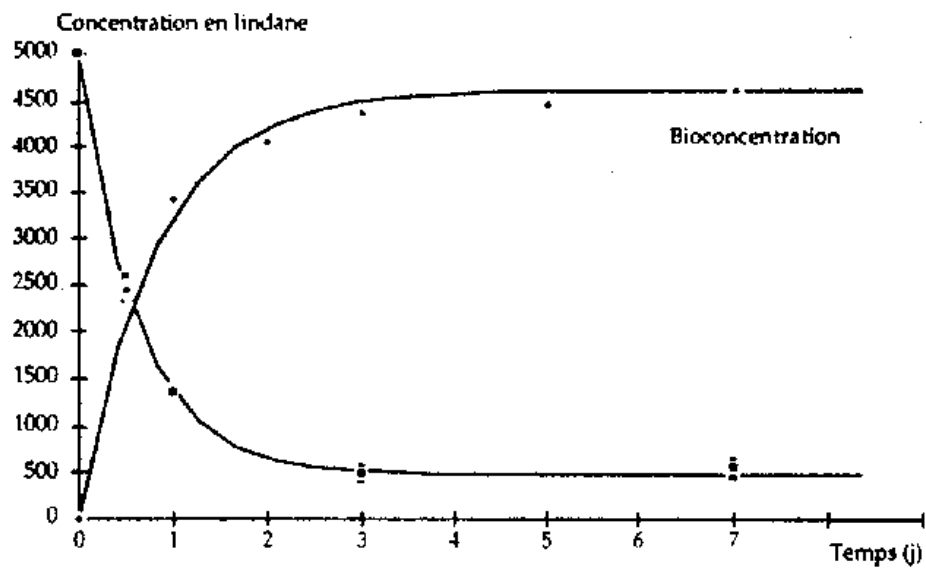


Figure 14 : Cinétique in vitro de bioconcentration et de décontamination du lindane par *Modiolus auriculatus* (Bourdalin, 1994)

4.2 Etude de la capacité de bioaccumulation de *Modiolus auriculatus* à la Réunion (2004 -2005)

En parallèle du suivi écophysiological, d'août 2004 à juillet 2005, l'analyse des niveaux de contamination ont été réalisées chaque mois sur les échantillons prélevés sur les deux sites références : Trou d'eau et Saint Leu.

Ce suivi des niveaux de contamination avait plusieurs objectifs :

- Acquérir les techniques de traitement des modioles pour le dosage de contaminants chimiques ;
- Confirmer les capacités bioaccumulatrices des modioles ;
- Évaluer sur une année le lien entre cette contamination et les indices écophysiologicals ;
- Obtenir un premier état du bruit de fond de la contamination des zones de récifs frangeants.

4.2.1 Méthodologie

4.2.1.1 Sites de prélèvements

Les opérations de prélèvements ont coïncidé avec celles réalisées pour le suivi écophysiological avec un prélèvement par mois (paragraphe 3.1.2.1).

De plus, deux échantillons prélevés sur le platier de Grande Anse ont été ajoutés pour disposer des informations sur un troisième bassin versant.

4.2.1.2 Prélèvement et conditionnement des échantillons

Les modioles ont été prélevés manuellement à l'aide d'un couteau et transportées en glacière jusqu'au laboratoire. Les coquilles ont été nettoyées de leurs épiphytes (algues molles ou calcaires). Une fois les indices écophysiologicals relevés les modioles ont été disséquées. A l'aide d'un scalpel le muscle rétracteur postérieur est sectionné afin d'ouvrir librement les deux valves, puis la masse viscérale est délicatement séparée de la coquille et placée dans un pilulier en verre stérile. Une fois la masse humide nécessaire aux analyses récoltée les piluliers ont été congelés et lyophilisés avant d'être envoyés au laboratoire d'analyse.

4.2.1.3 Analyses chimiques

Les analyses ont été réalisées en métropole par le laboratoire de Rouen. Les échantillons ont été envoyés par Chronopost express (livraison en 48h). Les analyses ont porté sur une liste approuvée par le comité de suivi du programme et inspirée des listes des principaux réseaux de biosurveillance (RNO, Mussel watch et Rinbio) et de la liste des 33 substances prioritaires de l'annexe X de la DCE (Tableau 3). Les méthodes d'analyses sont précisées en annexe 8.

Les résultats obtenus au cours de cette étude ont été comparés aux résultats obtenus en Europe (RNO, Rinbio et ASMO). Ils n'ont cependant pas pu être comparés aux données recueillies en Egypte et à Tahiti car le protocole d'analyse était différent (pas de lyophilisation).

Tableau 3 : Liste des contaminants analysés durant le suivi mensuel des populations naturelles d'août 2004 à juillet 2005

Métaux	Cadmium	Pesticides	Cadusafos
	Chrome total		Diazinon
	Cuivre		Diethion
	Mercure		Pendimethaline
	Nickel		Pyrazophos
	Plomb		Pyrimiphos ethyl
	Zinc		Terbutylazine
	Vanadium		Trifluraline
	Argent		Diuron
	Arsenic		Methomyl
PCB	PCB 28		Isoproturon
	PCB 52		Linuron
	PCB 101		Mercaptodimethur
	PCB 118		Fipronil sulfone
	PCB 138		Fipronil sulfide
	PCB 153		Fipronil desulfenil
	PCB 180		
Pesticides	DDT op'	HAP	Naphtalène
	DDT pp'		Acénaphtylène
	DDE op'		Acénaphène
	DDE pp'		Fluorène
	DDD op'		Phénanthrène
	DDD pp'		Anthracène
	Alpha HCH		Fluoranthène
	Gamma HCH		Pyrène
	Lindane		Benzo (a) anthracène
	Deltamethrine		Chrysène
	Alachlore	Benzo (b) fluoranthène	
	Alpha endosulfan	Benzo (k) fluoranthène	
	Beta endosulfan	Benzo (a) pyrène	
	Lambda cyalothrine	Dibenzo (a,h) anthracène	
	Oxadiazon	Benzo (g,h,i) pérylène	
	Fipronil	Indéno (1-2-3-cd) pyrène	
	Ethoprophos	Organoétains	Monobutylétain
	Chlorpyriphos		Dibutylétain
	Atrazine		Tributylétain

4.2.2 Résultats

4.2.2.1 Bilan technique du suivi

Tous les prélèvements ont été réalisés sur une période de 12 mois. Il est par contre nécessaire de réaliser ces sorties dans des conditions météorologiques favorables (houle et courant faibles) car les sites du front récifal peuvent rapidement devenir impraticables.

D'autre part les opérations menées en laboratoire sont très fastidieuses ; une demi-journée est nécessaire à deux opérateurs pour conditionner un échantillon de modioles.

4.2.2.2 Résultats bruts de contamination

Sur l'ensemble des sites et des prélèvements, **35 contaminants** ont été détectés (sur 70 analysés) :

- **10 métaux** (Cadmium, Chrome total, Cuivre, Mercure, Nickel, Plomb, Zinc, Vanadium, Argent, Arsenic);
- **3 PCB** (PCB 28, PCB 138, PCB 153);
- **5 pesticides** (DDT pp', DDE op', DDE pp', DDD op', alpha endosulfan) ;
- **15 HAP** (Naphtalène, Acénaphène, Fluorène, Phénanthrène, Anthracène, Fluoranthène, Pyrène, Benzo (a) anthracène, Chrysène, Benzo (b) fluoranthène, Benzo (k) fluoranthène, Benzo (a) pyrène, Dibenzo (a,h) anthracène, Benzo (g,h,i) pérylène, Indéno (1-2-3-cd) pyrène);
- **2 organoétains** (DBT et TBT);

Ce sont les mêmes contaminants qui sont observés sur les trois sites et les niveaux de contamination sont comparables. Les pesticides, les PCB et les organoétains sont peu représentés et les quelques congénères détectés ne l'ont été qu'à une ou deux reprises. En revanche, les HAP et les métaux sont détectés dans la totalité des échantillons (Tableau 4).

Les données brutes sont présentées en annexe 9.

	Substance	Saint Leu n=12		Trou d'eau n=12		Grande Anse n=2
		Moy	EC	Moy	EC	Moy
Métaux (mg/kg/sec)	Cadmium	2,1	0,3	2,3	0,3	2,0
	Chrome total	4,5	5,0	2,0	0,6	13,0
	Cuivre	10,4	2,8	9,4	1,1	14,8
	Mercurure	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1
	Nickel	14,1	6,7	9,3	1,9	22,7
	Plomb	0,5	0,1	0,4	0,1	1,2
	Zinc	65,6	9,5	68,1	6,7	90,1
	Vanadium	2,8	0,8	3,4	0,5	3,0
	Argent	0,8	0,3	0,7	0,2	0,2
	Arsenic	57,8	28,4	88,6	36,4	95,2
PCB (µg/kg/sec)	PCB 28	<1	0,0	2,3	0,7	<1
	PCB 138	5,6	0,0	<1	0,0	<1
	PCB 153	1,2	0,0	<1	0,0	2,3
Pesticide (µg/kg/sec)	DDT pp'	1,0	0,0	<1	0,0	<1
	DDE op'	1,5	0,0	<1	0,0	<1
	DDE pp'	1,5	0,3	1,6	0,3	<1
	DDD op'	1,5	0,0	2,2	0,1	<1
	Alpha endosulfan	<1	0,0	1,0	0,0	<1
HAP (µg/kg/sec)	Naphtalène	27,1	18,0	25,3	16,3	20,1
	Acénaphène	14,9	13,0	15,5	13,8	12,3
	Fluorène	5,2	2,1	4,7	2,7	5,9
	Phénanthrène	4,8	2,6	4,4	1,3	5,6
	Anthracène	1,5	0,4	1,1	0,1	1,0
	Fluoranthène	2,5	1,5	2,0	0,8	1,2
	Pyrène	4,8	4,1	3,4	2,8	2,9
	Benzo (a) anthracène	1,4	0,6	1,4	0,5	1,0
	Chrysène	1,3	0,5	1,6	0,8	1,2
	Benzo (b) fluoranthène	1,7	1,0	1,4	0,5	1,9
	Benzo (k) fluoranthène	3,3	3,3	1,1	0,1	2,0
	Benzo (a) pyrène	11,0	14,6	2,6	1,2	16,0
	Dibenzo (a,h) anthracène	<5	0,0	5,0	0,0	1,1
	Benzo (g,h,i) pérylène	6,0	0,0	<5	0,0	<5
Indéno (1-2-3-cd) pyrène	14,0	0,0	5,0	0,0	<5	
Organoétains (µgSn/kg)	Dibutylétain	2,3	0,7	1,4	0,2	4,1
	Tributylétain	<1	0,0	2,5	0,0	2,4

Tableau 4 : Moyenne et écart type des concentrations en contaminants observées dans n échantillons de modioles entre août 2004 et juillet 2005 sur les sites de suivi (Saint Leu, Trou d'eau et Grande Anse)

La relation entre les indices écophysologiques et les paramètres environnementaux (indice gonadique, indice de condition, pourcentage de matières grasses, pluviométrie et température des eaux de surface) a été étudiée avec les données de HAP et de métaux. Le nombre réduit de résultats supérieurs au seuil de détection n'a pas permis cette étude pour les pesticides, les PCB et les organoétains.

Pour certains HAP les corrélations sont très faibles mais deux paramètres environnementaux présentent une corrélation significative avec les niveaux de contamination mesurés dans les bivalves :

- Le pourcentage de matière grasse des modioles est corrélé avec la concentration en HAP. Cette corrélation atteint 93 % à Saint Leu pour l'Anthracène et le Benzo (k) fluoranthène et 65 % pour le Fluoranthène à Trou d'eau.
- La pluviométrie est corrélée à 60% avec les concentrations en HAP. En effet, les fortes pluies et notamment le premier lessivage des sols au début de la saison des pluies amène entre autre les dépôts du réseau routier dans le milieu marin.

Il est à noter que sur les douze mois de suivi une corrélation supérieure à 80 % a été observée entre quatre molécules HAP : Anthracène, Fluoranthène, Pyrène et Benzo (b) anthracène.

Pour les métaux, seule une corrélation à 79% a pu être observée entre l'arsenic et la pluviométrie sur le site de Saint Leu. Aucune corrélation n'existe entre les concentrations en ETM et les indices écophysologiques et aucune corrélation entre les différents ETM n'a été observée.

A ce stade de l'étude, il semble qu'il ne soit pas nécessaire de tenir compte de la croissance des modioles pour interpréter les résultats bruts de contamination chimique.

Métaux

À l'exception du cuivre, les niveaux sont stables sur l'année et ne semblent donc pas reliés à la croissance et au cycle sexuel des individus (Figure 15). La présence d'un niveau élevé de cuivre de janvier à mars correspond à la période maximale de pluviométrie qui pourrait expliquer une augmentation des apports pour cet ETM utilisé dans le traitement des cultures. Les concentrations en cuivre sont largement supérieures aux concentrations détectées dans *Mytilus galloprovincialis* qui le régule naturellement aux alentours de 6 µg /kg ps (Tableau 5).

Les niveaux de contamination observés pour le chrome, le nickel et l'arsenic sont également supérieurs à ceux observés en Europe.

Les niveaux de contamination observés pour le cadmium, le mercure et le plomb sont par contre comparables aux niveaux moyens mesurés en Europe.

Les niveaux en zinc sont quant à eux nettement inférieurs.

Tableau 5 : Comparatif des résultats moyens obtenus pour les contaminants métalliques dans le cadre du suivi modiole 2004-2005, du Rinbio 2006, de Mytilos (2004-2006), du RNO Méditerranée et Manche Atlantique

	Substance	Modiole (2004-2005)	Rinbio (2006)	Mytilos (2004-2006)	RNO Méditerranée	RNO Manche Atlantique
Métaux (mg/kg/sec)	Cadmium	2,1	0,88	1,29	0,72	0,6
	Chrome total	6,5	0,4		0,83	1,17
	Cuivre	11,5	3,7		6,8	6,7
	Mercure	0,1	0,07	0,09	0,12	0,12
	Nickel	15,3	0,93	0,94	1,48	1,55
	Plomb	0,7	1,07	1,17	1,8	1,4
	Zinc	74,6	118		152	85
	Arsenic	80,5	21,25			

PCB et pesticides organochlorés

Les niveaux de contamination par les pesticides et les PCB sont comparables sur les deux sites (Figure 16). Le maximum de contamination est observé lors des premières pluies après la saison sèche, lors du premier lessivage.

Pour le PCB 153, les niveaux moyens de contamination observés en Europe sont comparables avec ceux observés dans les populations naturelles de modioles (Tableau 6).

Tableau 6 : Comparatif des résultats moyens obtenus pour le PCB 153 dans le cadre du suivi modiole 2004-2005, du Rinbio 2006, de Mytilos (2004-2006), du RNO Méditerranée et Manche Atlantique

	Substance	Modiole (2004-2005)	Rinbio (2006)	Mytilos (2004-2006)	RNO Méditerranée	RNO Manche Atlantique
PCB ($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{sec}$)	PCB 153	14,2	4,04	2,2	18,7	19,4

HAP

Les niveaux moyen de contamination sont faibles sans réelle variation au cours de l'année (Figure 17). Seuls le Naphtalène, l'Acénaphène et la Pyrène présentent des variations significatives sur les deux sites.

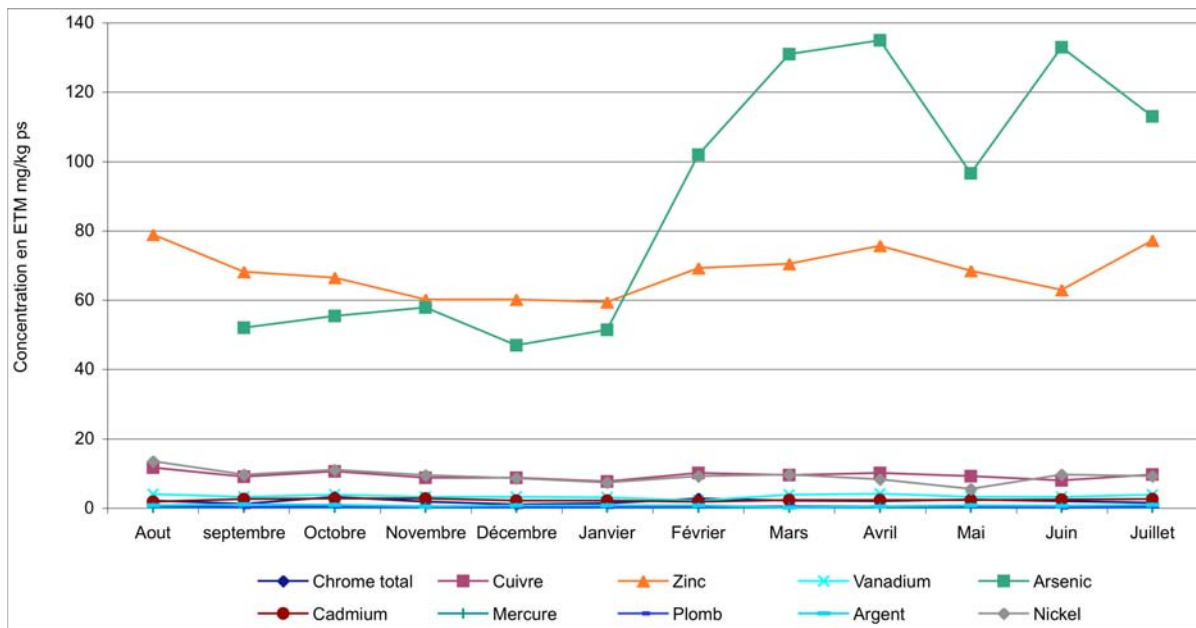
D'une manière générale, les concentrations en HAP semblent augmenter lors de la saison des pluies (février mars).

La somme des 16 HAP donne des résultats légèrement supérieurs aux données recueillies en Europe. Le niveau détecté reste très significativement inférieur au seuil de 500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ps déterminé par l'AFSSA, à l'occasion du naufrage de l'Erika, pour interdire la mise sur le marché des coquillages contaminés. De plus, le fluoranthène, considéré comme un bon indicateur de la contamination par les HAP, ne présente pas de niveaux élevés de contamination (Tableau 7). Ces niveaux sont équivalents avec ceux mesurés par biomonitoring actif en Méditerranée et nettement inférieurs à ceux mesurés par biomonitoring passif.

Tableau 7 : Résultats moyens obtenus pour la somme des 16 HAP et pour le fluoranthène dans le cadre du suivi modiole 2004-2005, du Rinbio 2006, de Mytilos (2004-2006), du RNO Méditerranée et Manche Atlantique

	Substance	Modiole (2004-2005)	Rinbio (2006)	Mytilos (2004-2006)	RNO Méditerranée	RNO Manche Atlantique
HAP ($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{sec}$)	Somme 16 HAP	90,2	34,1	44,8		
	Fluoranthène	1,9	2,1	1,75	13,2	21,4

(a) Trou d'eau



(b) Saint Leu

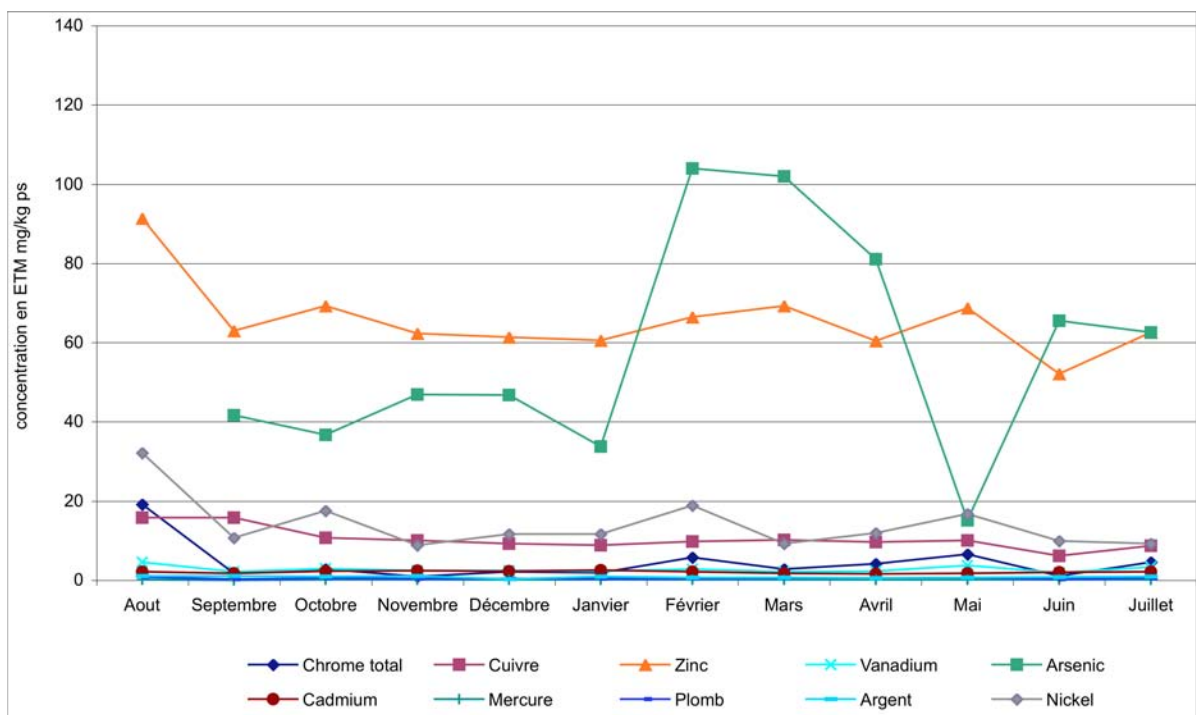
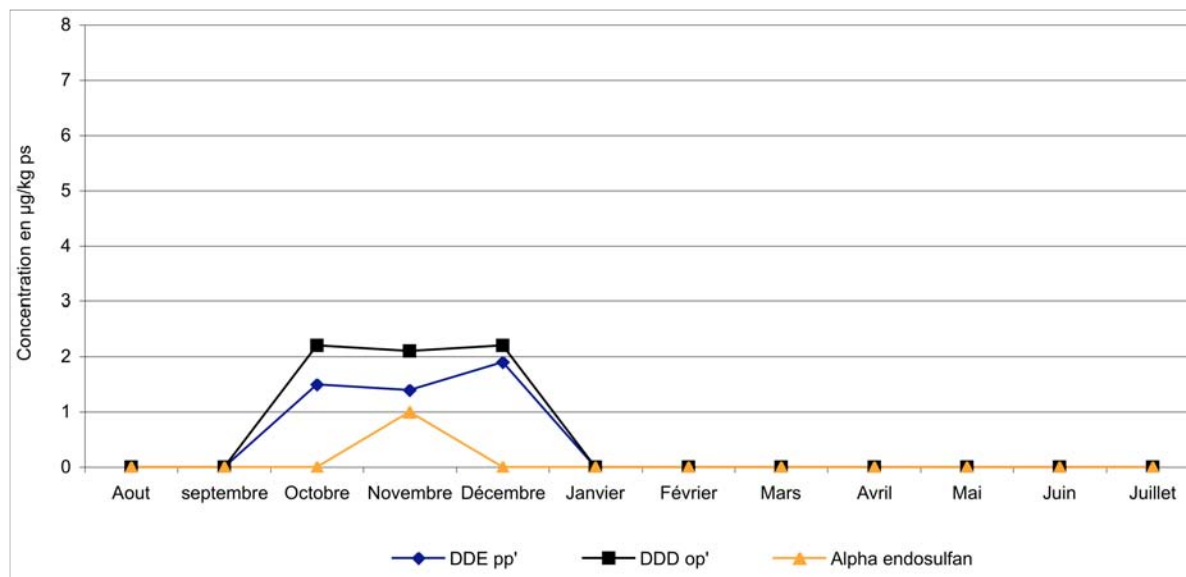


Figure 15: Courbes de concentration en métaux dans la chair des modioles des deux foyers naturels de Trou d'eau et Saint Leu de août 2004 à juillet 2005

(a) Trou d'eau



(b) Saint Leu

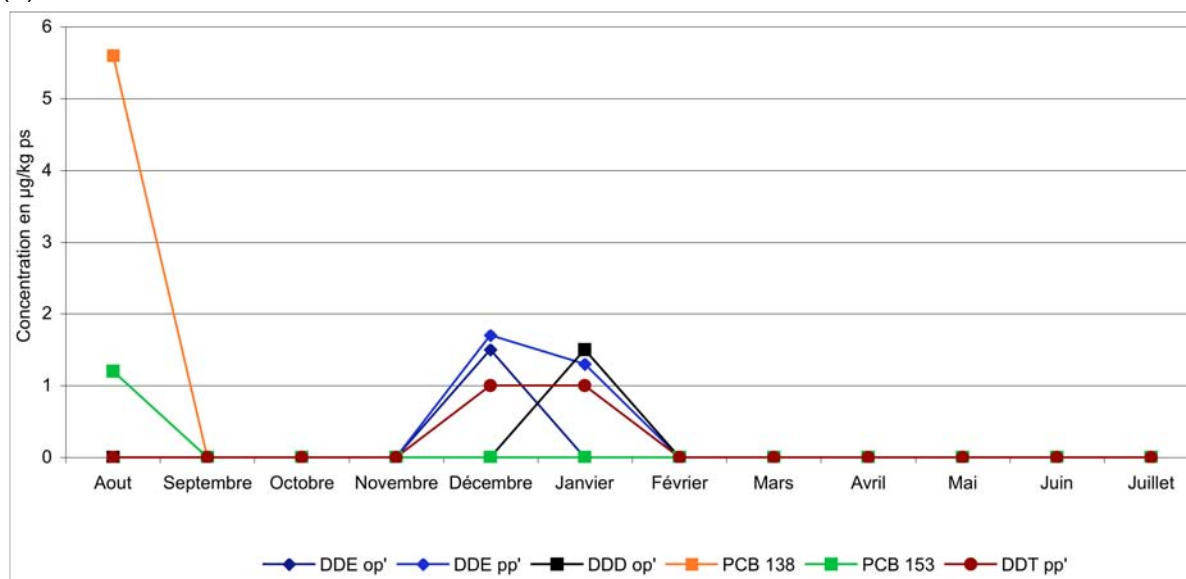
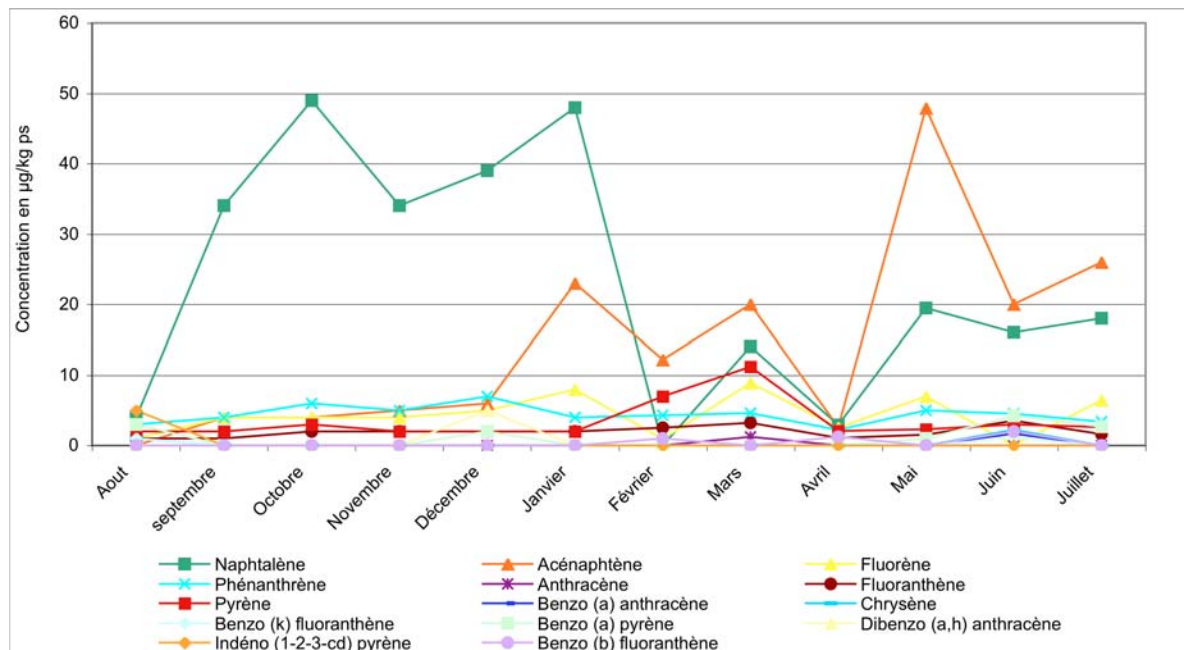


Figure 16 : Courbes de concentration en pesticides et PCB dans la chair des modioles des deux foyers naturels de Trou d'eau et Saint Leu de août 2004 à juillet 2005

(a) Trou d'eau



(b) Saint Leu

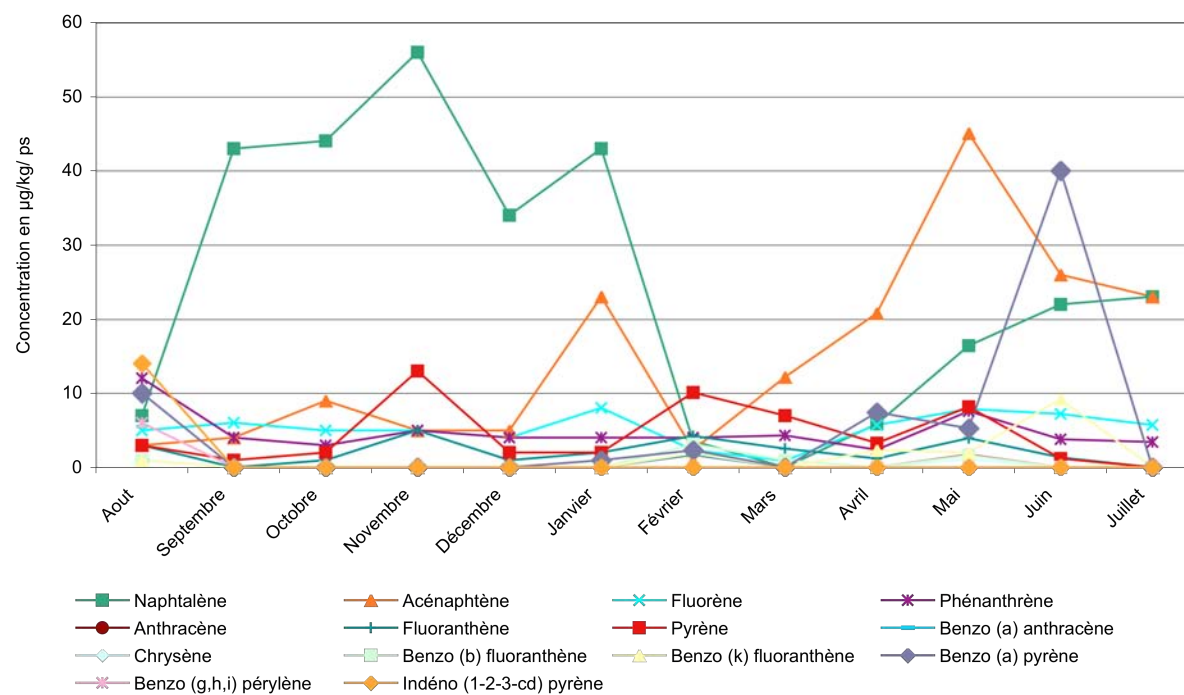
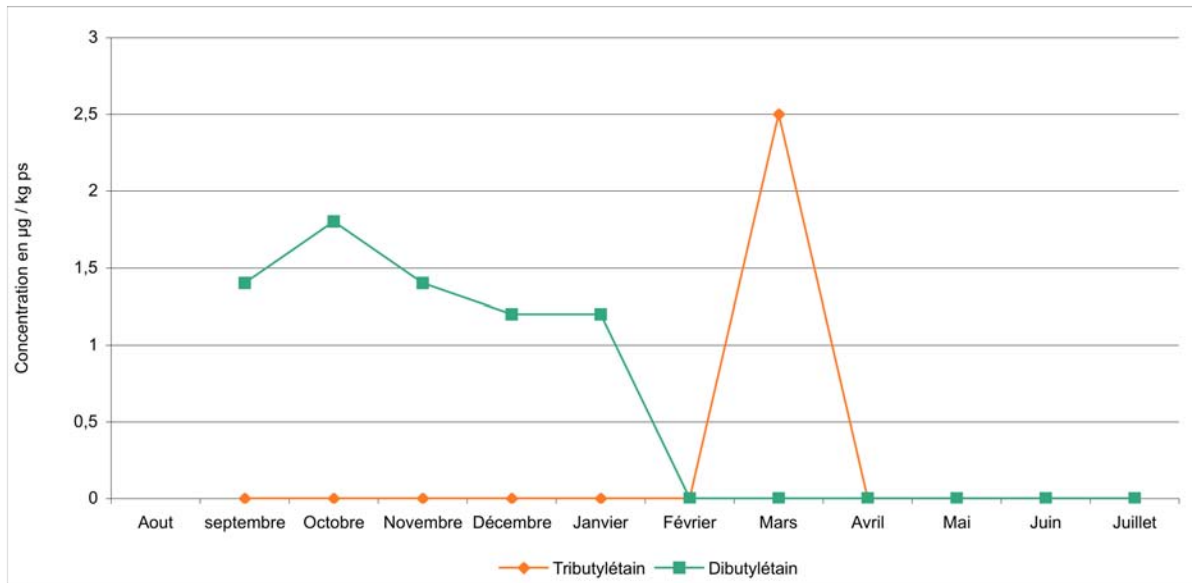


Figure 17 : Courbes de concentration en HAP dans la chair des modioles des deux foyers naturels de Trou d'eau et Saint Leu de août 2004 à juillet 2005

(a) Trou d'eau



(b) Saint Leu

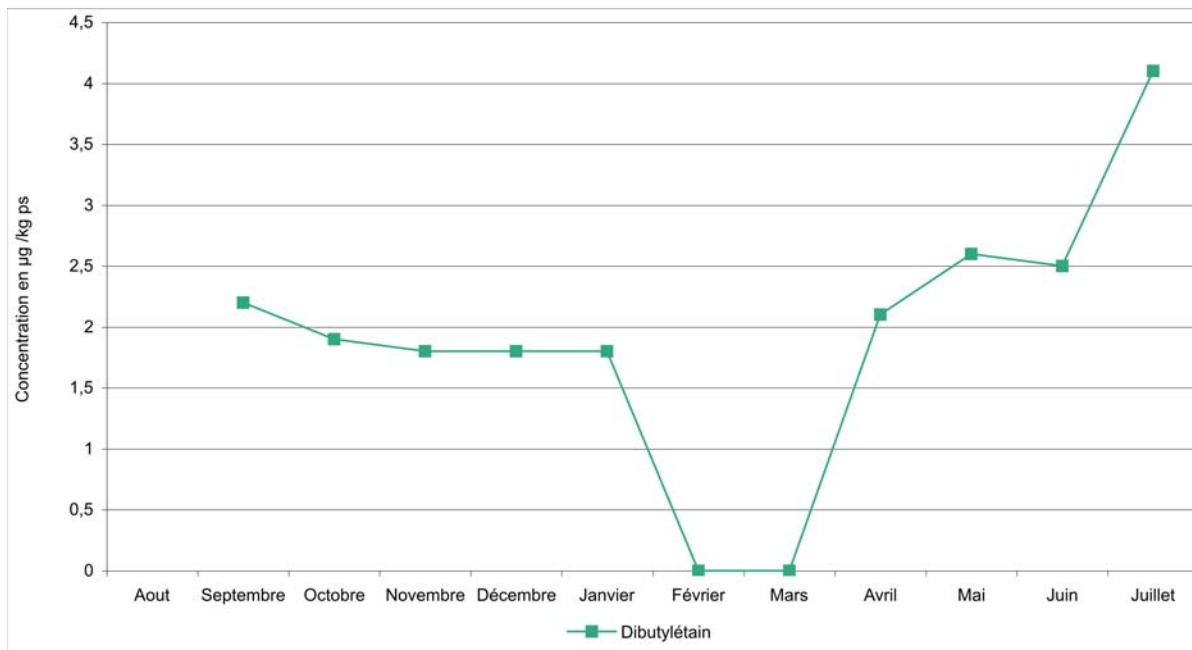


Figure 18 : Courbes de concentration en organoétains dans la chair des modioles des deux foyers naturels de Trou d'eau et Saint Leu de août 2004 à juillet 2005

4.2.3 Synthèse

Les données obtenues dans cette étude montrent que l'ensemble des familles de micropolluants suivis classiquement dans le cadre des programmes de biomonitoring ont été détectés dans la modiole à des niveaux significatifs : pesticides, éléments traces métalliques, hydrocarbures aromatiques polycycliques et organoétains.

D'un point de vue quantitatif, le bruit de fond de la contamination d'un récif frangeant réunionnais a ainsi pu être décrit et semble correspondre à une contamination faible du milieu.

L'absence de corrélations entre les concentrations en contaminants et les indices écophysologiques habituellement utilisés ne semble pas nécessiter un traitement statistique des données pour éliminer un éventuel biais lié à la croissance des échantillons sur les résultats bruts obtenus dans la chair de moule exprimés par rapport au poids sec de chair.

4.3 Etude la cinétique de contamination et de décontamination

Une étude de cinétique de contamination et de décontamination a été réalisée en milieu naturel. Cette étude a permis en parallèle l'utilisation pour la première fois à la Réunion d'échantillonneurs passifs pour la sélection des sites propices à cette expérience.

Le principe de ce type d'échantillonneur spécifique aux ETM (DGT), ainsi que la méthodologie, sont présentés en annexe.

Ce travail préliminaire a permis de mettre en œuvre une première expérience de cinétique début 2006 puis une seconde fin 2006.

Plusieurs objectifs étaient visés :

1. Vérifier les capacités bio accumulatrices de populations transplantées ;
2. Observer le comportement des modioles en phase de contamination en milieu pollué et de décontamination en milieu peu contaminé ;

4.3.1 Méthodologie

4.3.1.1 Sélection des sites expérimentaux

En avril 2005, une campagne de mise en place de DGT a été réalisée dans différents sites. Un rapport présentant les données obtenues et leur interprétation a été publié (Gonzalez *et al.*, 2005 voir annexe 7).

Les DGT ont été déployés sur 5 stations pour évaluer les concentrations en contaminants métalliques "labiles" sur les sites susceptibles d'accueillir les expérimentations de cinétique de contamination/décontamination de modioles : 3 stations ont été positionnées sur des platiers coralliens (Trou d'eau, L'Hermitage, St Leu), 1 station dans la darse du port ouest (darse du matériel de la DDE), 1 station au droit de la station d'épuration de St Denis (rejet direct à la côte).

Des sédiments de surface ont été également prélevés sur 4 stations où les sédiments étaient relativement homogènes et fins, pour l'analyse de contaminants métalliques: stations Trou d'eau, L'Hermitage, Darse du port et St Denis.

Les techniques de prélèvement et d'analyse des sédiments sont présentées en annexe.

Les concentrations mesurées par DGT montrent, que par rapport aux autres sites, la darse portuaire est un site nettement contaminé par Cd, Cu, Pb, et Zn. Cette tendance se retrouve dans les sédiments.

Le site de L'Hermitage (site potentiellement "contaminé") présente des C_{DGT} légèrement plus élevées en Cr et Ni, tandis que ces deux éléments sont nettement plus abondants dans les sédiments prélevés au niveau de St-Denis. Dans l'ensemble, une assez bonne correspondance entre les données DGT et sédiments est mise en évidence.

Cette étude a permis de caractériser la contamination métallique des eaux des sites "modioles". Ces premiers résultats indiquent clairement que les sites potentiels pour la collecte des modioles (St-Leu, Trou d'eau) présentent des niveaux de contamination équivalents et bas.

Suite à cette étude il a donc été décidé de réaliser les expériences de contamination des modioles en site "contaminé" à la darse portuaire à partir de lots de modioles "propres" collectés à St-Leu.

4.3.1.2 Cinétique de contamination et de décontamination

L'étude de cinétique a été programmée sur cinq mois.

Les pochons de modioles nécessaires ont été immergées à T0 sur le site de contamination (darse portuaire), l'objectif étant de relever et analyser un échantillon à 1 semaine, 15 jours, 1 mois, 2 mois, 3 mois, 4 mois, 5 mois, soit en théorie un maximum de 8 mesures pour la cinétique de contamination (Figure 19).

Conditionnement des modioles en pochon avant immersion

Après prélèvement sur le site de Saint Leu, 5000 individus ont été transportées en glacière jusqu'à l'ARDA au Port où les coquilles ont été nettoyées avant de les mettre en pochons. Une moyenne de 450 individus a été placée dans chaque pochon. Les pochons de stabulation ont été confectionnés selon le modèle utilisé par le programme Rinbio.

Site de contamination et de décontamination

Le site choisi pour l'étude de la cinétique de contamination est la darse « matériel » de la DDE dans le port Ouest.

Le site de décontamination a été fixé au niveau des cages de l'ARDA en baie de Saint Paul. Ce site est en milieu ouvert, il présente donc un fort renouvellement et représente là encore un bon compromis pour la sécurité des pochons.

Suivi de la contamination des modioles

Sur chaque pochon, la biométrie et les indices écophysologiques des modioles vivantes ont été étudiés selon le protocole décrit dans le paragraphe 3.1.2.1.

Les échantillons de chair lyophilisée ont été envoyés au laboratoire de Rouen et selon les expériences, les paramètres suivants ont été analysés : métaux, PCB, pesticides organochlorés et HAP et Organoétains (tableau 8). Les méthodes d'analyse sont présentées en annexe 10 et 11.

(a)

Collecte de modioles en milieu naturel



Pochon de modioles dans la darse portuaire



Conditionnement des modioles au laboratoire de l'ARVAM



(b)

Mise en place du DGT sur la banquette de modioles



Récupération du DGT après 48 heures



Traitement en laboratoire



Figure 19 : Illustrations des opérations menées sur le terrain et en laboratoire dans le cadre des premiers essais de transplantation de modioles en darse portuaire (janvier 2006) (a) et de mesure de DGT (avril 2005) (b)

Tableau 8 : Liste des contaminants analysés lors de l'expérience 1 (a) et de l'expérience 2 (b) de contamination et de décontamination

(a)

Métaux (mg/kg ps)	Cadmium Chrome total Cuivre Mercure Nickel Plomb Zinc Cobalt	Organochlorés et apparentés (µg/kg ps)	pp'DDE pp'DDT pp'DDD Alpha HCH Beta HCH Gamma HCH (Lindane)
	PCB (µg/kg ps)		PCB 28 PCB 31 PCB 52 PCB 101 PCB 105 PCB 118 PCB 138 PCB 153 PCB 156 PCB 180 PCB 205 PCB 207

(b)

Métaux (mg/kg ps)	Cadmium Mercure Nickel Plomb	HAP (µg/kg ps)	Naphtalène Acénaphtylène Acénaphtène Fluorène Phénanthrène Anthracène Fluoranthène Pyrène Benzo(a)anthracène Chrysène Benzo(b)fluoranthène Benzo(k)fluoranthène Benzo(a)pyrène Dibenzo(a,h)anthracène benzo(g,h,i)pérylène Indéno(1-2-3-cd)pyrène
	PCB (µg/kg ps)		PCB 28 PCB 52 PCB 101 PCB 118 PCB 138 PCB 153 PCB 180
Organochlorés et apparentés (µg/kg ps)		Oxadiazon Lambda-cyhalothrine Deltamethrine Fipronil désulfinyl Fipronil sulfide Fipronil Fipronil silfone Endosulfan alpha Endosulfan beta op'DDE pp'DDE op'DDT pp'DDT op'DDD pp'DDD Alpha HCH Gamma HCH (Lindane)	

Suivi hydrologique

Mesures DGT

Des dispositifs DGT ont été immergés sur le site en suivant la même fréquence d'échantillonnage que pour les modioles. Le temps d'immersion est de l'ordre de 48 h. La mise en place et le conditionnement de ces systèmes sont présentés en annexe.

Mesure des paramètres hydrologiques généraux

Lors de la mise en place des pochons et à l'occasion de chaque relevé, un suivi hydrologique a été réalisé.

Une mesure de l'**oxygène dissous**, de la **température**, de la **salinité** à l'aide d'une sonde multiparamètres (wtw ou Ysi 600 QS)

Des prélèvements d'eau pour le suivi a posteriori les paramètres physicochimiques suivants :

1. **La turbidité** : Elle est mesurée à l'aide d'un turbidimètre de paillasse IR conforme à la norme en vigueur (NF EN 27027).
L'unité de mesure FNU est maintenant d'usage pour la méthode normalisée (conformément à Aminot & Kérouel, 2004). Limite de détection portée à 0,01 FNU;
2. **L'ammonium** a été analysé par la méthode spectrophotométrique au bleu d'indophénol (spectrophotomètre JENWAY équipé de cuves de 10 cm de trajet optique), telle que décrite dans l'ouvrage d'Aminot et Kérouel (2004). Limite de détection : 0,05 $\mu\text{mol/l}$, précision 5% ;
3. **Le phosphate** a été analysé par la méthode spectrophotométrique au bleu phosphomolybdique (spectrophotomètre JENWAY équipé de cuves de 10 cm de trajet optique), telle que décrite dans l'ouvrage d'Aminot et Kérouel (2004). Limite de détection : 0,02 $\mu\text{mol/l}$, précision 0,015 $\mu\text{mol/l}$;
4. **Les nitrates et les nitrites** ont été sous-traités en métropole au laboratoire de Rouen. Les méthodes utilisées sont conformes aux préconisations du contrôle de surveillance. Le laboratoire de Rouen est accrédité COFRAC pour ces paramètres. Limite de détection 0,08 $\mu\text{mole/L}$;
5. **La matière en suspension (MES)** a été analysée selon la méthode décrite dans l'ouvrage d'Aminot et Kérouel (2004) ;
6. **Le carbone organique particulaire (COP)** a été sous-traités en métropole au laboratoire de Rouen. Limite de détection 50 mg/ech ;
7. **Les métaux associés aux MES** ont été analysés par le laboratoire de Rouen (Cadmium, mercure, nickel et plomb). Limite de détection de 0,01 à 0,1 $\mu\text{g/éch}$.

4.3.2 Résultats

Expérience 1 (25/01/06 au 23/03/06)

Résultats DGT

Les résultats obtenus par la technique DGT montrent que pendant la durée de l'expérience de contamination (Figure 20) les concentrations en :

- Cd varient peu et sont inférieures aux mesures réalisées en 2005 dans la darse ;
- Co présentent une variabilité plus importante et sont légèrement supérieures aux concentrations mesurées en 2005 sur même site ;
- Cr et Zn sont très variables, mais restent du même ordre que les données obtenues en 2005 ;
- Cu et Ni sont caractérisées par une amplitude de variation importante et des niveaux plus importants que ceux déterminés en 2005 ;
- Pb diminuent de façon importante et régulière au cours de l'expérience.

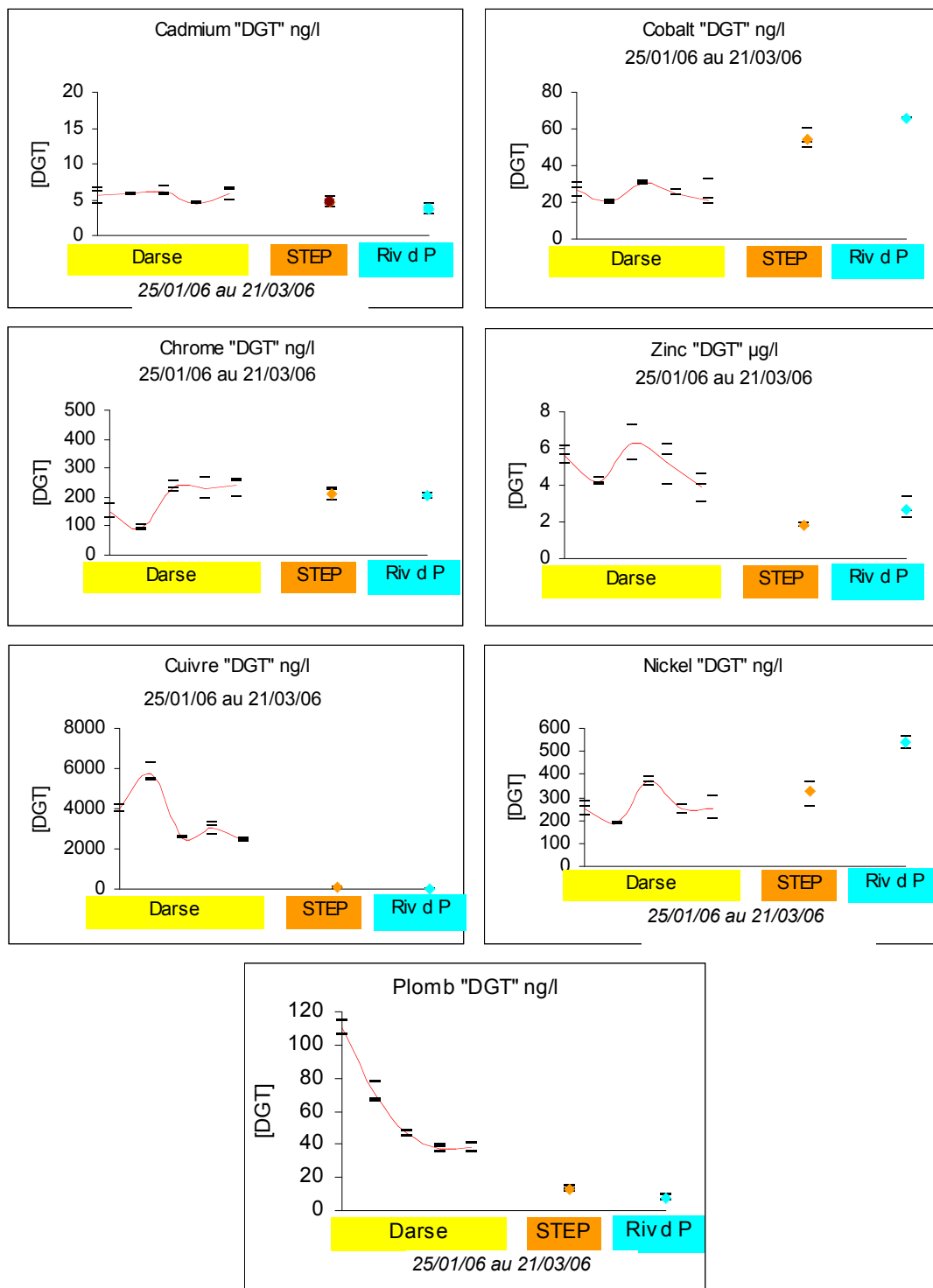


Figure 20 : Evolution des concentrations "DGT" mesurées lors de la première expérience de contamination réalisée dans la darse. Les concentrations mesurées lors de la même période au niveau du rejet de St Denis (STEP) et de de la Rivière des pluies (Riv d P) sont présentées à titre indicatif. Les données présentées correspondent à la moyenne (courbe rouge pour la cinétique de contamination dans la darse et losange pour la STEP et la Rivière des pluies) calculées à partir des mesures de chaque triplicat (barres noires).

Résultats Modioles

Cinq prélèvements ont été réalisés :

- T0 (25/01/06),
- T1 = T0+ 1 semaine (01/02/06)
- T2 = T0 +2 semaines (09/02/06)
- T3 = T0+1 mois (23/02/06)
- T4 = T0+2 mois (23/03/06)

L'opération a dû être arrêtée à T4 consécutivement à la mortalité brutale de la totalité des modioles. Une contamination par des vers plats prédateurs semble expliquer en partie cette mortalité soudaine. L'ensemble des pochons restant a été touché et l'opération de décontamination n'a pu être lancée.

Malgré l'échec de ce premier essai, les échantillons de chair lyophilisée ont été envoyés au laboratoire de Rouen.

D'après la bibliographie et les connaissances acquises par l'IFREMER sur le biomonitoring actif et passif, la durée d'immersion maximale pour atteindre un pseudo équilibre avec le milieu est de l'ordre de 3 mois. L'arrêt à T0+ 2 mois n'a sans doute pas permis d'atteindre ce niveau d'intégration pour plusieurs contaminants. Néanmoins, les résultats des analyses ont fourni les premières informations sur les capacités de bioaccumulation des modioles :

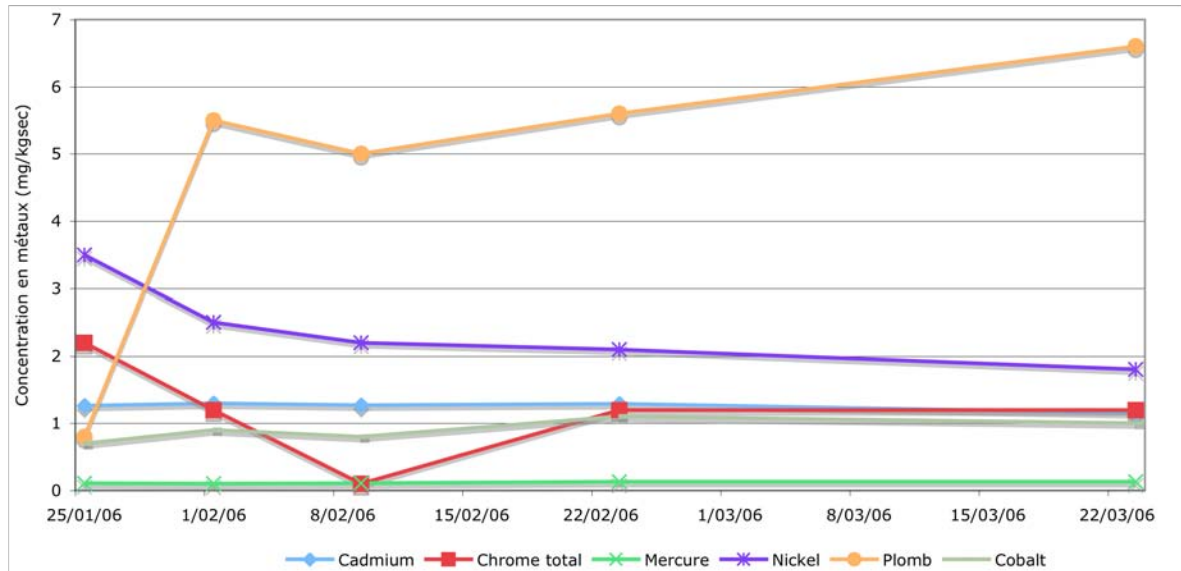
1. Les concentrations élevées en cadmium, chrome, cobalt et nickel observées deux ans auparavant sur le site source (Saint Leu) n'ont pas été confirmées lors du T0 (Figure 21). Les niveaux sont plus faibles et donc plus conformes avec la bibliographie disponible et les niveaux observés dans les DGT et le sédiment (avril 2005). L'hypothèse d'un problème analytique sur les échantillons du suivi annuel (2004-2005) n'est pas à exclure ;
2. Les données en mercure sont stables durant les deux mois de contamination et sont conformes à la bibliographie ;
3. Le cuivre, le plomb et le zinc, retrouvés à de fortes concentrations dans la phase dissoute et dans le sédiment, ont été fortement bioaccumulés par les modioles. La phase de contamination semble commencer à se stabiliser à T4 (soit T0 + 2 mois) pour le plomb et le zinc ;
4. Le DDT et les PCB ont été bioaccumulés dans des gammes de valeurs très largement supérieures aux données bibliographiques et aux valeurs obtenues lors du suivi des populations naturelles à Trou d'eau et Saint leu (Figure 22) ;
5. Les résultats pour les HAP confirment également la capacité des modioles à accumuler cette famille de contaminant (Figure 23). En terme purement quantitatif, les concentrations maximales observées sont très importantes pour plusieurs d'entre elles: le fluoranthène, le pyrène, le benzo (a) anthracène, le chrysène, le benzo (b) fluoranthène, le benzo (a) pyrène. La cinétique observée est particulière puisqu'un pic est observé pour toutes les molécules à T2 (T0+ 2 semaines). Le fluoranthène atteint alors à T2 112 µg/kg/sec. Puis à partir de T3, les concentrations diminuent avant d'atteindre des niveaux proches de T0 à T4 (T0+ 2 mois). A T4, le fluoranthène présente une concentration de 10 µg/kg de poids sec de chair.

Au terme de ce premier essai, et malgré l'impossibilité de réaliser l'expérience de décontamination, la capacité de la modiole à bioaccumuler les métaux, les organochlorés et

les semble confirmée et ce dans des gammes parfois élevées. Cependant, à T0+2mois, l'équilibre avec le milieu ne semble pas encore atteint pour tous les contaminants.

Les données brutes sont présentées en annexe 12.

(a)



(b)

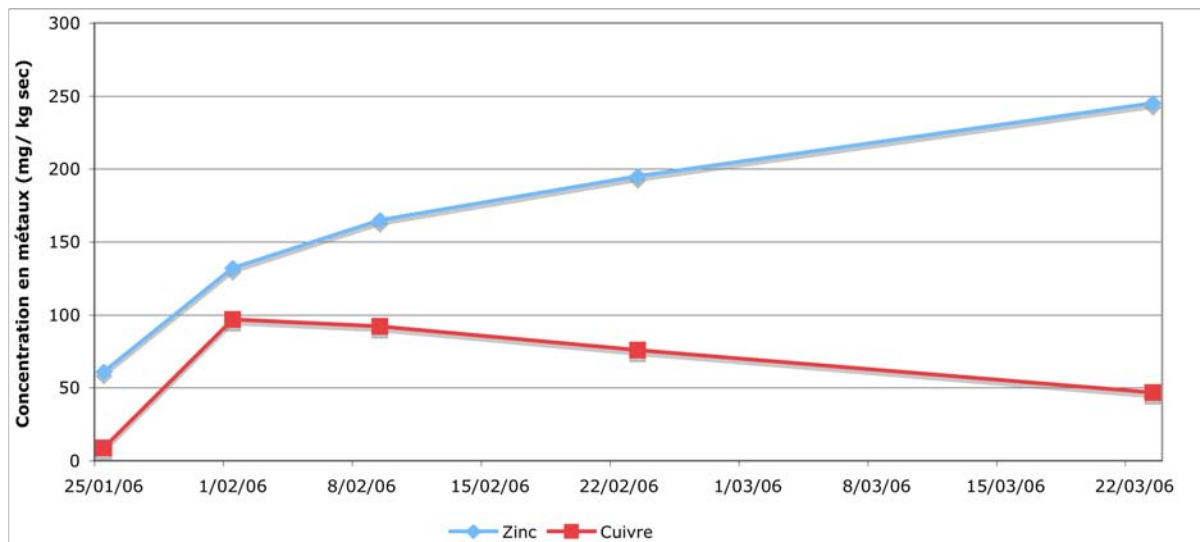


Figure 21 : Expérience 1 de cinétique de contamination, données de métaux (a) et (b)

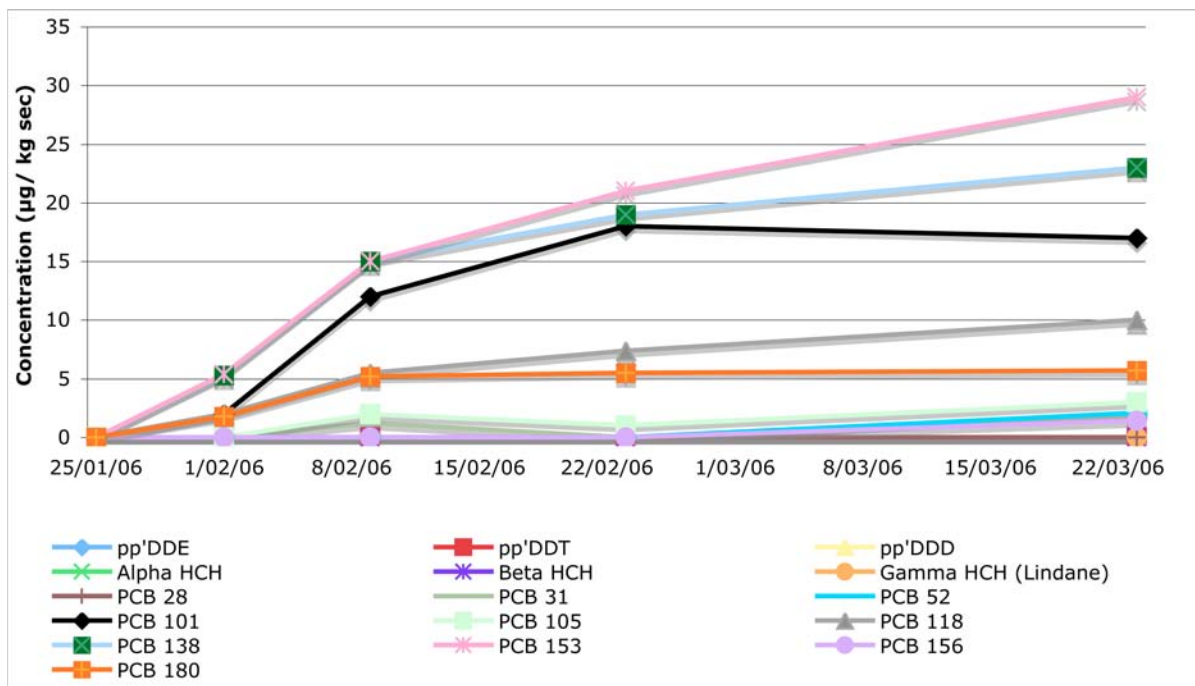


Figure 22 : Expérience 1 de cinétique de contamination, données de pesticides et PCB

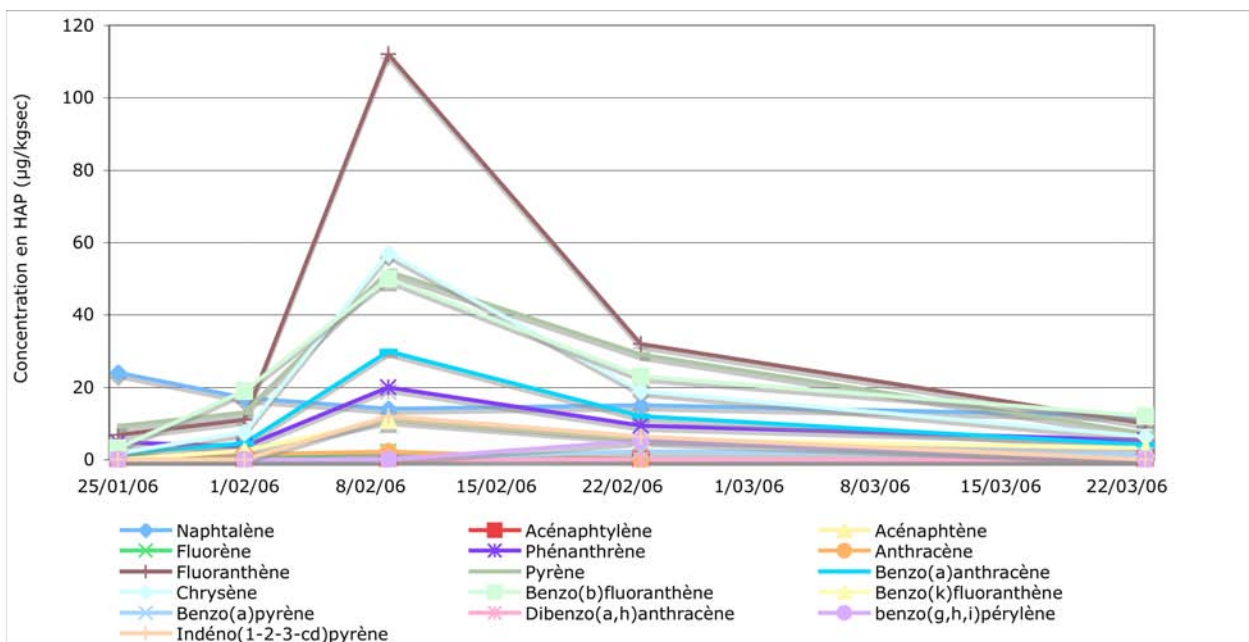


Figure 23 : Expérience 1 de cinétique de contamination, données de HAP

Expérience 2 (21/09/06 au 13/12/06)

Les prélèvements et l'immersion des pochons ont été réalisés en septembre 2006. Cinq relevés consécutifs ont pu être fait en phase de contamination avant qu'une nouvelle mortalité de modioles oblige d'avancer les opérations de décontamination à T0+ 2,5 mois.

Les pochons ont été attachés aux câbles en subsurface de la concession aquacole de l'ARDA en baie de Saint Paul.

L'opération a dû être avortée après deux semaines suite à l'arrachage de la structure par une très forte houle de Nord survenue sur la zone.

Phase de contamination en darse portuaire

T0 (21-sep-06)

T1 = T0+ 1 semaine (27-sep-06)

T2 = T0+ 2 semaines (4-oct-06)

T3 = T0 + 1 mois (18-oct-06)

T4 = T0 + 2 mois (15-nov-06)

T5 = T0 + 2 mois et demi (1/12/06)

Phase de décontamination en baie de Saint Paul (cages aquacoles de l'ARDA)

T0d (1-déc-06)

T1d = T0d + 1 semaine (8-déc-06)

T2d = T0d + 2 semaines (13-déc-06)

Résultats DGT

Pour pratiquement tous les ETM (Figure 24), les concentrations dans l'eau varient de façon plus ou moins notable au cours de l'expérience de contamination. Il n'y a que le Pb qui se caractérise par une variabilité relativement faible, avec une nette tendance à l'augmentation au cours de la durée de l'expérimentation.

Il est important de noter qu'il n'y a que pour Cd, Pb et Cu que les concentrations dans la baie de St Paul sont nettement plus faibles au cours de l'expérience de décontamination. Pour les autres éléments, il y a assez peu de différences entre les concentrations moyennes mesurées au cours des expériences de contamination et de décontamination.

Résultats modioles

L'arrêt de l'expérience 2 après seulement 2 mois et demi de contamination et 2 semaines de décontamination n'a sans doute pas permis d'observer complètement les processus de décontamination.

Métaux

Lors de la phase de contamination (Figure 25), seul le plomb présente une hausse significative de sa concentration, la phase plateau est atteinte au bout de 2 semaines (environ 5 mg/kg ps). La décontamination semble assez lente pour ce métal en site propre. Ces résultats sont conformes aux résultats DGT qui indiquent des concentrations moyennes de l'ordre de 50ng/l dans la darse.

Le niveau de contamination des autres contaminants est resté stable.

Ces résultats sont conformes à ce qui avait été observé dans l'expérience 1, à l'exception du nickel qui présente dans cette expérience des niveaux de l'ordre du double que dans l'expérience 1.

PCB

Les PCB 153, 118, 101, 180 et 52 ont été accumulés jusqu'à atteindre des niveaux élevés. Un pic de 42 µg/kg ps a ainsi été détecté pour le PCB 153 à T0 + 2 mois. En comparaison les niveaux observés sur les populations naturelles étaient 15 à 40 fois inférieurs (Figure 25). Le processus de décontamination est nettement plus rapide et une part significative de la contamination a disparu après 2 semaines en site propre.

Pesticides

Peu de pesticides ont été détectés (Figure 25) à l'exception du beta endosulfan dont le niveau initial a été multiplié par 10 en 1 mois (près de 10 µg/kg ps), avant de retrouver un niveau identique à celui observé dans les populations naturelles.

HAP

Les 16 HAP testés ont été détectés (Figure 26). Tout comme lors du suivi des populations naturelles, les niveaux sont très variables. On ne distingue pas de cinétique clairement établie pour cette famille de contaminants.

Organoétains

Trois composés ont été détectés sur les deux sites : MBT, DBT et TBT (Figure 26). Le taux de contamination est très élevé durant la première semaine. Un pic à 700 µg/kg ps a été mis en évidence à T0 + 1 semaine pour le TBT.

La phase de décontamination montre une diminution relativement rapide des niveaux de contamination à l'identique des PCB.

Les données brutes sont présentées en annexe 13 et 14.

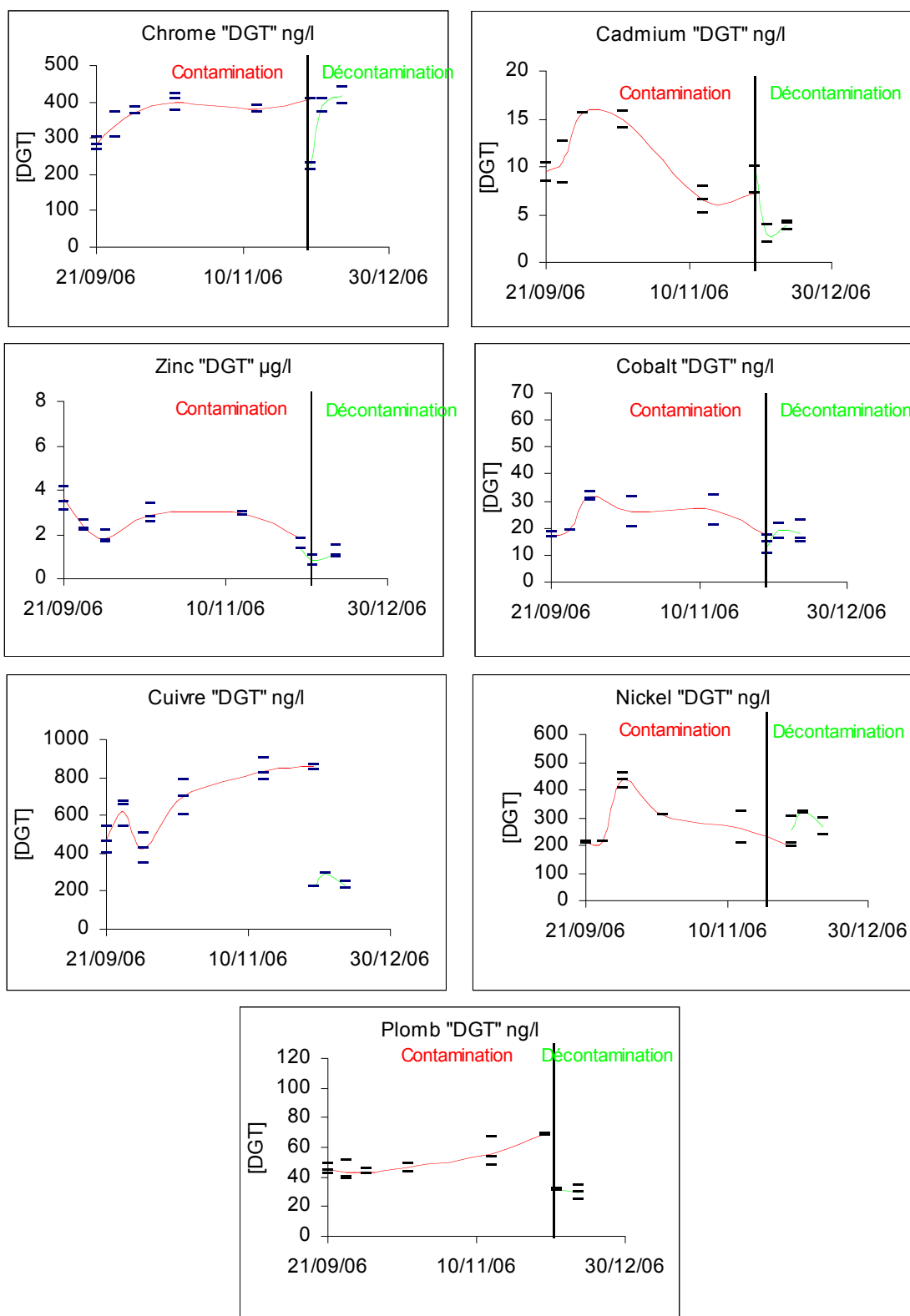
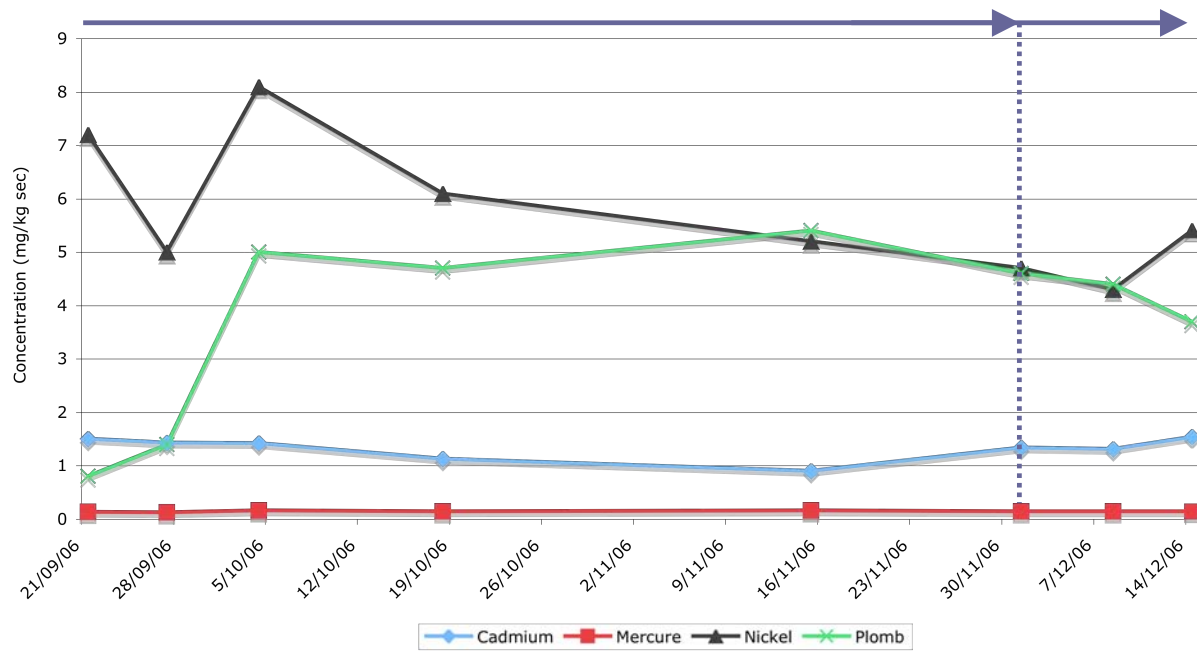


Figure 24 : Evolution des concentrations "DGT" mesurées lors des expériences de contamination (darse portuaire) et de décontamination (baie de St Paul). Les données présentées correspondent à la moyenne (courbe rouge pour la cinétique de contamination dans la darse)

Résultats modioles

(a) Métaux



(b) Organochlorés et PCB

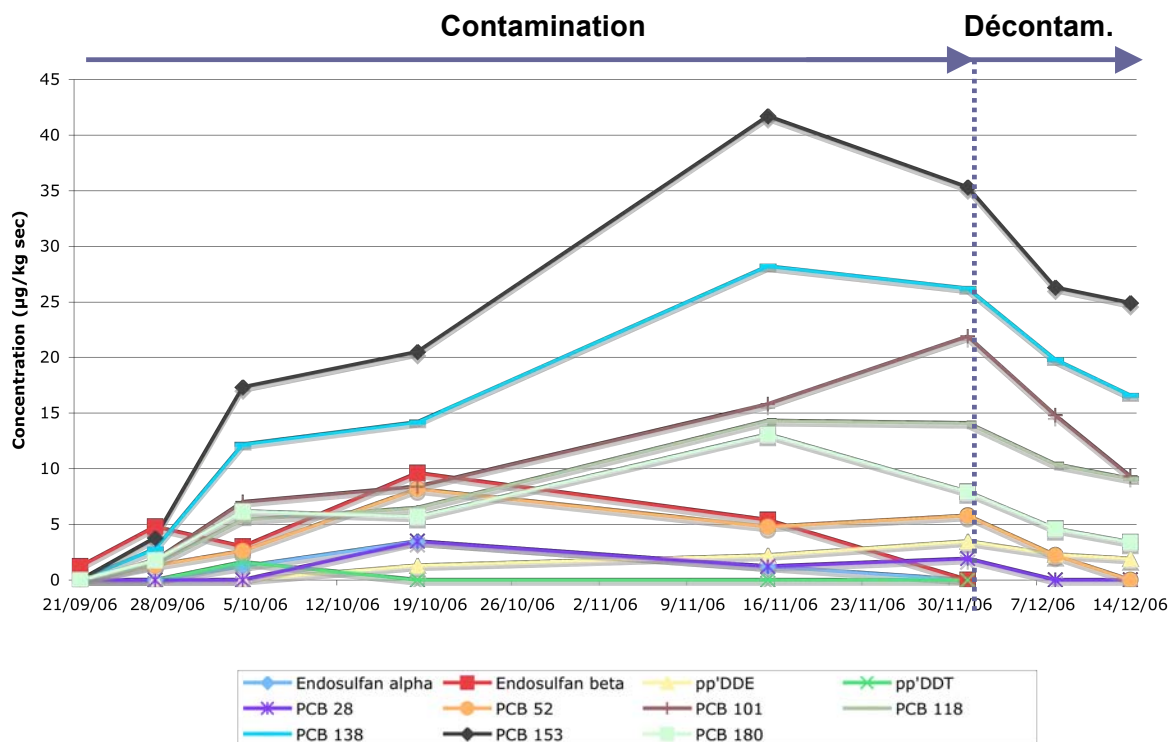
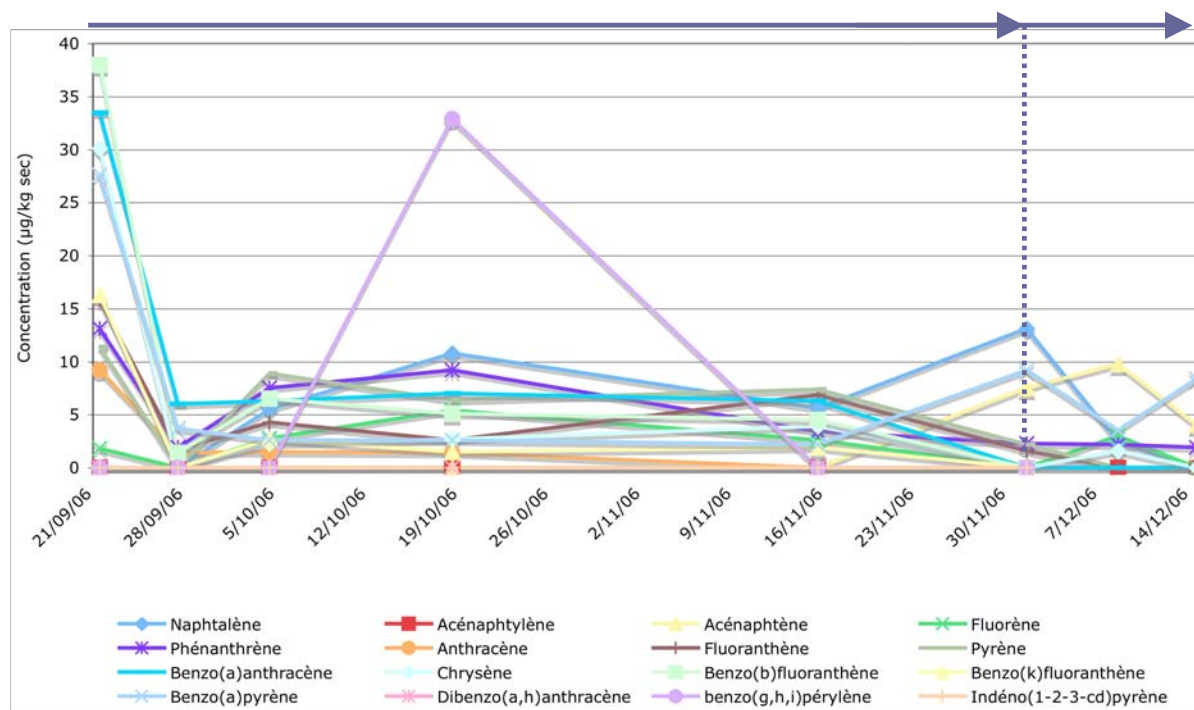


Figure 25 : Expérience 2 de cinétique de contamination et décontamination, données des métaux (a) et des organochlorés et des PCB (b)

(a) HAP



(b) Organoétains

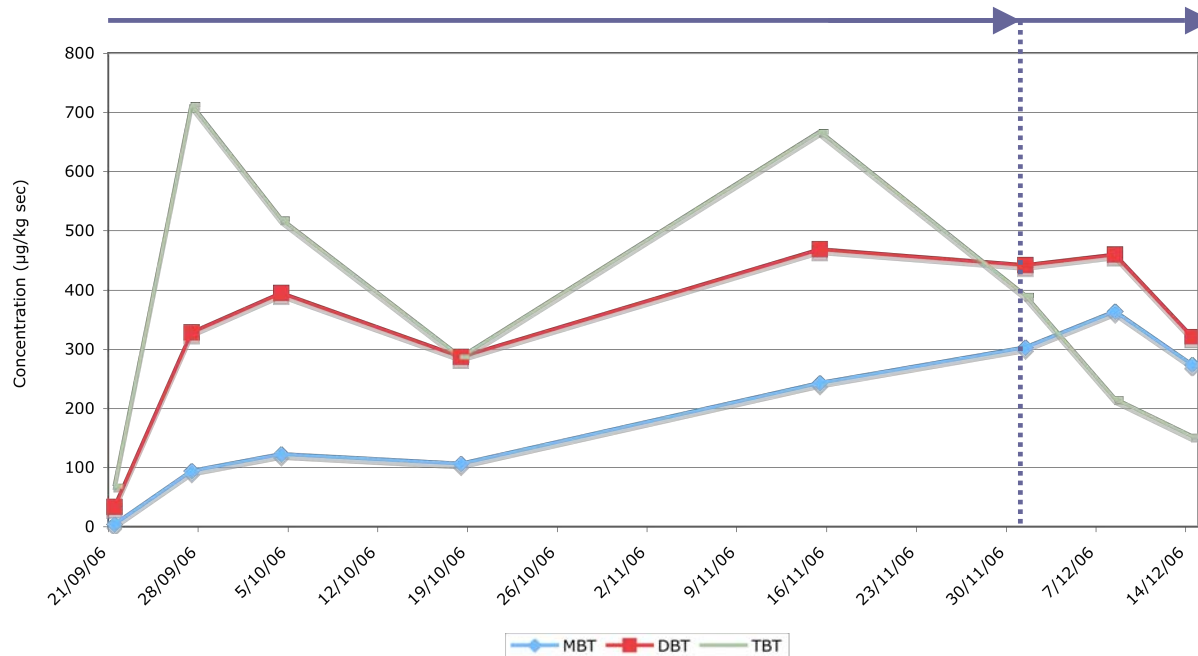


Figure 26 : Expérience 2 de cinétique de contamination et de décontamination, données des HAP (a) et des organoétains (b)

4.3.3 Synthèse

Les résultats des deux expériences montrent des cinétiques équivalentes malgré qu'elles aient été réalisées pour la première durant la saison humide et la deuxième durant la saison sèche. Il semble donc que la saison à laquelle les modioles sont exposées à la contamination a peu d'impact sur les niveaux de contamination biodisponibles pour les modioles.

Les courbes de contamination et de décontamination suivent le modèle théorique pour plusieurs éléments parmi lesquels le plomb, les PCB et les organoétains. Ce résultat est confirmé pour le plomb grâce à l'expérience réalisée en parallèle avec les DGT.

Les résultats du suivi hydrologique montrent par ailleurs une grande variabilité de l'exposition des modioles à la contamination, ce qui confirme la relativité du résultat obtenu par une mesure ponctuelle dans l'eau.

L'observation des courbes de décontamination montre une baisse rapide dès les premières semaines des concentrations dans la chair des modioles. Ce phénomène a également été décrit par Stellio Casas (2006) sur une espèce tempérée.

Dans l'optique d'une opération de cagging, il apparaît donc primordial de bien cibler la période de mise en stabulation des modioles afin de ne pas perdre d'information dans le cas d'un apport ponctuel de contaminant. Ainsi à la Réunion il semble plus judicieux de cibler la saison humide : décembre à mars.

4.4 Campagne de biomonitoring actif par transplantation de pochons de modioles en mer

Un essai de biomonitoring actif a été réalisé en sélectionnant six stations autour de l'île entre juillet et octobre 2007. Les objectifs de cette étude étaient de :

- confirmer les capacités de survie et de bioaccumulation des modioles placées durant plusieurs mois en stabulation dans la colonne d'eau ;
- obtenir les premiers niveaux de contamination chimique biodisponibles dans le champ moyen de zones où aucune population naturelle de modiole n'est présente ;
- confirmer la faisabilité technique de la méthode des transplants à la Réunion durant la période la plus contraignante, l'hiver austral.

4.4.1 Méthodologie

Sélection des sites de transplantation

Dans la logique du contrôle de surveillance de la qualité des eaux (Cosur) six stations ont été installées dans 6 masses d'eau sur des fonds de 20 à 75 m de profondeur (Tableau 9).

Tableau 9 : Positions des six stations cagging sélectionnées

Station	Profondeur (m)	Masse d'eau	Point GPS
Sainte marie	20	LC1	20° 52,992 S 55° 33,845 E
Saint benoit	75	LC3	21° 00,461 S 55° 42,966 E
Grande Anse	75	LC12 et LC13	21° 22,666 S 55° 32,475 E
Saint Louis	60	LC9	21° 17,401 S 55° 20,651 E
Saint Paul	50	LC4	21° 00,265 S 55° 15,329 E
Possession	75	LC2	20° 54,911 S 55° 19,853 E

Prélèvement et conditionnement des modioles

Les modioles ont été prélevées manuellement sur le site de référence de Saint Leu et transportées en glacière jusqu'au site de conditionnement de l'ARDA au Port.

Sur site les modioles ont été triées, débarrassées des épiphytes (voir paragraphe 3.1.2) et placées en pochons par groupe de 400-500 individus. Au total, 3500 individus ont ainsi été prélevés et conditionnés pour constituer 7 échantillons : un pochon témoin de 500 modioles et 6 pochons à transplanter.

Les pochons à transplanter sont restés une nuit en stabulation à l'ARDA avant d'être déployés autour de l'île avec le support logistique d'un bateau. Le pochon témoin a été

transféré le jour même au laboratoire de l'ARVAM pour traitement et conditionnement avant analyse.

Mise en place des mouillages

Sur chaque station, la technique utilisée est directement inspirée de celle développée avec succès depuis 1996 par le programme Rinbio en Méditerranée.

Un pochon est placé sur un mouillage maintenu au fond grâce à un corps mort en béton de 30 kg (Figure 27). Le pochon est placé à 5 m de la surface. Le pochon est réalisé avec un grillage plastique laissant suffisamment passer le courant d'eau afin de limiter l'envasement des pochons par les fèces.

Le déploiement des 6 stations a été réalisé sur deux jours : le 11 juillet 2007, les stations de Sainte Marie, Saint Benoît, Grande Anse et Saint Louis et le 12/07/07 les stations de Saint Paul et de La Possession.

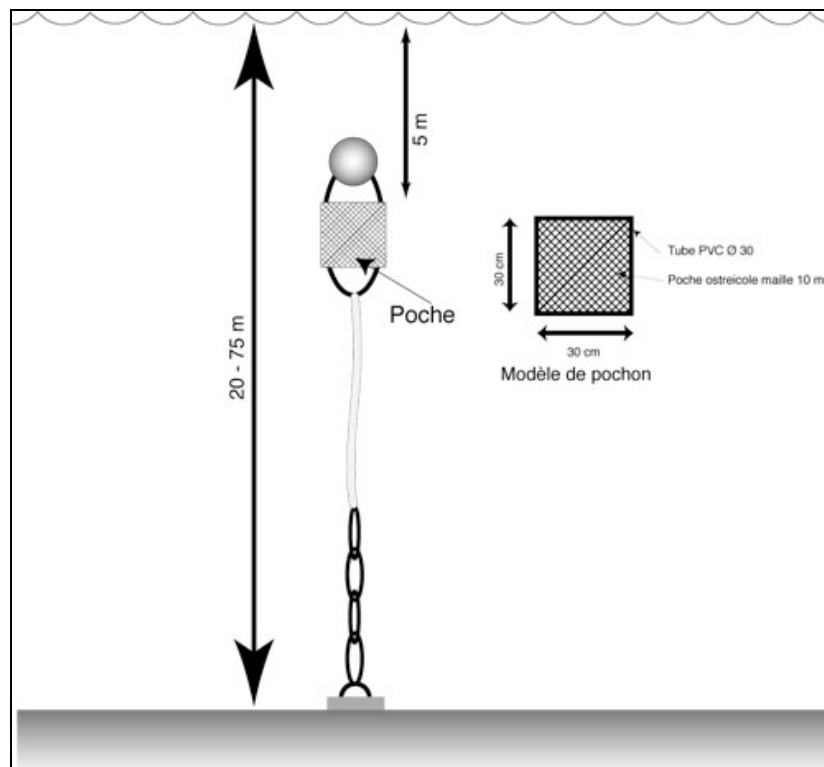


Figure 27 : Schéma des mouillages déployés sur les six stations du Contrôle de Surveillance en juillet 2007

Récupération des mouillages

La récupération des pochons a nécessité l'intervention de deux plongeurs professionnels (Class IB), aucun témoin surface n'ayant été mis en place sur le mouillage pour des raisons de sécurité (navigation et perte éventuelle du mouillage par vandalisme).

A l'arrivée sur le point GPS, un plongeur, relié à la surface par un bout de survie et surveillé par un plongeur de sécurité en surface, se met à l'eau afin de repérer le mouillage et d'attacher le pochon avec un bout relié au treuil du navire. Le plongeur remonte à la surface puis l'ensemble du mouillage est relevé à bord et le pochon est placé en glacière.

Traitement des pochons en laboratoire

Les pochons ont été traités au laboratoire de l'ARVAM selon le protocole mis en place lors du suivi 2004-2005 (paragraphe 3.1.2.1). Ainsi pour chaque pochon :

- le taux de survie a été constaté ;
- un travail de nettoyage des coquilles a été réalisé ;
- la longueur de chaque individu a été mesurée au pied à coulisse ;
- l'indice gonadique a été évalué ;
- la chair des modioles a été conditionnée;
- les piluliers ont été lyophilisés et les coquilles ont été séchées afin de mesurer l'indice de condition de chaque pochon.

Analyse des contaminants

Une liste de 150 contaminants, inspirée des annexes 3 et 4 de la circulaire DCE 2007/20, a été analysée sur les échantillons par le laboratoire de Rouen (Figure 28). Les protocoles analytiques et les limites de détection sont présentés en annexe 15.

Famille	Contaminant	Famille	Contaminant	Famille	Contaminant
Métaux	Argent	Organochlorés et apparentés	Fipronil disulfonil	Phénols et dérivés	Nonylphénols
	Arsenic		Fipronil sulfide		4-tert-octylphénol
	Cadmium	Fipronil	4-n-octylphénol		
	Chrome	Fipronil sulfone	4-para-nonylphénol		
	Cobalt	DDT pp'	2,4,5 trichlorophénol		
	Cuivre	Hexachlorobutadiène	2,4,6 trichlorophénol		
	Mercuré	Benfluraline	4-Chloro-3-méthylphénol		
	Nickel	Butraline	Pentachlorophénol		
	Plomb	Chlorméphos	Phtalates		DEHP
	Vanadium	Epoxiconazole	Chloroalcanes		C10-13 Chloroalcanes
Zinc	Fluzilazole	Polybromodiphényléthers	BDE 47		
PCB	PCB 028		Hexaconazole	BDE 77	
	PCB 052		Métamidophos	BDE 99	
	PCB 101		Méthidathion	BDE 100	
	PCB 118		Pendiméthaline	BDE 153	
	PCB 153		Phosalone	BDE 181	
	PCB 105		Phosphate de tibutyle	BDE 209	
	PCB 138		Pyrazophos	Penta-bromodiphényléther	
	PCB 156		Tébuconazole	Octa-bromodiphényléther	
	PCB 180		Tébutame	Déca-bromodiphényl éther	
	PCB 035	Terbutryne	Solvants arom.	1,3,5-trichlorobenzène	
Urées- Carbamates et apparentés	Methomyl	Tétraconazole		1,2,4-trichlorobenzène	
	Pyrimicarbe	Terbutylazine		1,2,3-trichlorobenzène	
	Chlorprophame	Trifluraline			
	Mercaptodiméthur	Organophosphorés et apparentés	Diazinon		
	Fludioxonyl		Pyrimiphos ethyl		
	Iprodione		Diethion		
	Cyprodinil		Chlorpyriphos méthyl		
	Krésoxim méthyl		Fenitrothion		
	Fénoxycarbe		Chlorpyriphos éthyl		
	Acides phenoxy-acétiques		Fluroxyppyr méthyl heptyl ester	Ethoprophos	
Dichlorprop 2,4-DP			Cadusafos		
Bromoxinyl			Irgarol 1051		
Organochlorés et apparentés	Pentachlorobenzène		Chlorfenvinphos	HAP	Naphtalène
	HCH alpha	Organostain	Acénaphtène		
	HCH beta		Acénaphtylène		
	Hexachlorobenzène		Fluorène		
	Lindane		Phénanthrène		
	HCH delta		Anthracène		
	Aldrine		Fluoranthène		
	Isodrine		Pyrène		
	DDE op'		Benzo(a)anthracène		
	Endosulfan alpha		Chrysène		
	DDE pp'		Benzo (b) Fluoranthène		
	Dieldrine	Benzo (k) Fluoranthène			
	DDD op'	Benzo (a) Pyrène			
	Endrine	Indeno (1,2,3-cd) Pyrène			
	Endosulfan beta	Dibenzo(ah)anthracène			
	DDD pp'	Benzo (g, h, i) Pérylène			
	DDT op'	Fluorène D10			
	Endosulfan sulfate	Fluorène D12			
	Chlorothalonil	2-méthyl-fluoranthène			
	Acétochlore	2-méthyl-naphtalène			
	Metolachlore	Diphényléthers	Monobutylétain		
	Captane		Dibutylétain		
	Folpet		Tributylétain		
	Oxadiazon	Tétrabutylétain	Autre	Biphényle	
	Propyzamide	Triphénylétain		Alkanamide	Napropamide
	Procymidone	Aclonifen			
	Diflufénicanil				
	Dicofol				
	Lambda cyhalothrine				
	Cyperméthrine				
Deltaméthrine					

Figure 28 : Liste des contaminants analysés sur les échantillons de cagging

4.4.2 Résultats

4.4.2.1 Données techniques

Les échantillons ont été immergés **105 jours**. La relève des mouillages a été réalisée sur deux jours les 25 et 26 octobre 2007 et a mobilisé deux plongeurs durant 2 jours. La technique adoptée, avec un repérage par un plongeur et une relève au treuil, s'est révélée parfaitement adaptée aux conditions de terrain.

Les dispositifs de corps mort et de bouée en surface semblent bien adaptés aux conditions locales puisque cinq pochons sur six ont été retrouvés (83,3 % de récupération). Seul le pochon de Grande Anse n'a pu être localisé au sondeur et aucune trace n'a pu être observé en surface. Mais les courants et les houles sont très forts sur ce site notamment durant la saison hivernale. Le dispositif a donc pu dériver voir couler.

4.4.2.2 Données biométriques et écophysiologiques

Les modioles ont parfaitement supporté les conditions de stabulation puisque le taux de survie est resté supérieur à 95 % pour toutes les stations.

L'observation des indices gonadiques montre que les modioles ont pu consacrer une part de leur métabolisme à l'élaboration de gonades ce qui montre des conditions favorables à leur développement. Lors du prélèvement dans le foyer naturel de Saint Leu l'indice IG était nul or après 105 jours de stabulation, les gonades ont présenté des niveaux de développement comparables à ceux observés en milieu naturel pour cette période de l'année. Les modioles placées sur la station de Sainte Marie se démarquent très nettement des autres. L'indice gonadique, l'indice de condition et le pourcentage de matière grasse montre un état physiologique particulièrement favorable (Figure 29). Les apports terrestres (rivières, STEP) ont vraisemblablement favorisé l'alimentation des modioles sur site.

(a)

	Station	Prélèvement à Saint Leu	Mise en place des stations	Date de récupération	Taux de survie (%)	Longueur moyenne (mm)	EC longueur (mm)	Indice gonadique (IG)	Indice de condition
Témoin	Saint Leu	10/07/07				36,63	3,28	0	0,046
Station 1	Sainte marie	10/07/07	11/07/07	25/10/07	97	38,4	3,3	2,2	0,635
Station 2	Saint benoit				98	38	3,2	1,2	0,052
Station 3	Grande Anse			-	-	-	-	-	-
Station 4	Saint Louis		26/10/07	98	37,6	3,5	1,3	0,058	
Station 5	Saint Paul			96	37,1	3,8	0,9	0,052	
Station 6	Possession			98	36,8	3,5	0,5	0,011	

(b)

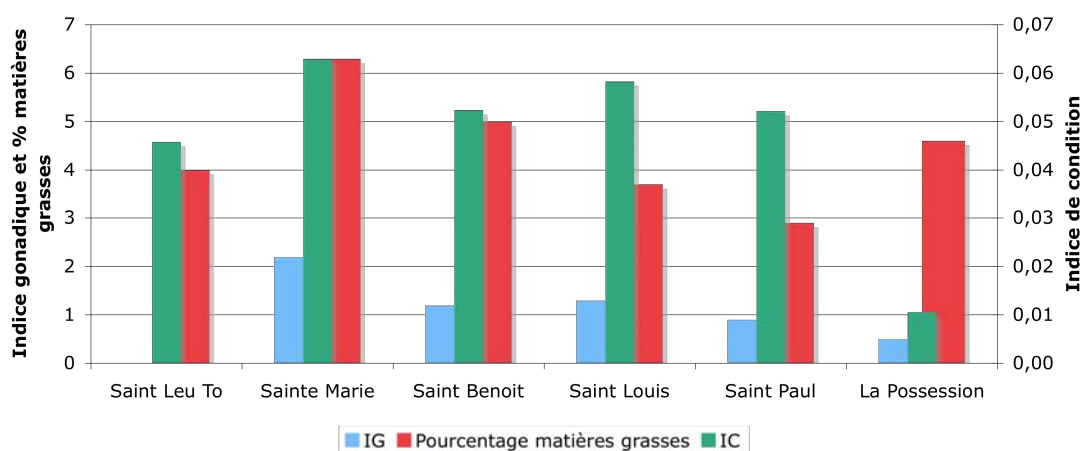


Figure 29 : Dates des différentes phase de la transplantation et données de biométrie et indices écophysiologiques relevés sur les pochons (a) et représentation graphique des indices (b)

1.4.2.3 Contamination chimique

Au total, **34** contaminants ont été détectés sur les 150 contaminants analysés :

- **11 métaux** (argent, cadmium, chrome, cobalt, mercure, nickel, plomb, vanadium, arsenic, zinc et cuivre) ;
- **6 pesticides** (Isodrine, endosulfan alpha et beta, dieldrine, DDD op' et fluroxypyr) ;
- **1 PCB** (PCB 138) ;
- 11 HAP (naphtalène, anthracène, chrysène, acénaphthylène, fluoranthène, benzo (b) fluoranthène, fluorène, pyrène, benzo (a) pyrène, phénanthrène et benzo (a) anthracène)
- **2 organoétains** (MBT et DBT) ;
- **2 phénols et phtalates** (4-para-nonylphénol et DEHP) ;
- **1 polybromodiphényléthers** (BDE 77).

Les données brutes sont présentées en annexe 16.

1. Métaux

Il semble exister à la Réunion un bruit de fond naturel élevé en nickel, en cobalt, en vanadium en arsenic et en chrome certainement en liaison avec la nature du socle géologique (Figure 30). On observe un pic élevé en chrome sur le site de Saint Louis. La proximité de la zone de l'étang du Gol peut expliquer ce résultat.

Le niveau de contamination au vanadium est élevé à Sainte Marie.

Pour le reste des éléments, il n'existe pas de différence significative entre le site témoin et les sites retenus pour cette première expérience.

2. Pesticides et PCB

Seul l'endosulfan se retrouve sur tous les sites avec un pic élevé à Saint Paul (Figure 31). Le PCB 138 était présent dans les modioles prélevées sur le site source mais la contamination par les PCB est nulle sur les sites de cagging, ce qui montre qu'en 105 jours les modioles ont le temps de se décontaminer s'il existe un problème pour cette famille de contaminant sur le lot témoin.

Le fluroxypyr a été détecté pour la première fois dans une matrice biologique à la Réunion. Un pic important de l'ordre de 35 µg/kg ps est également observé à Saint Paul ce qui laisse supposer l'utilisation de cet herbicide hydrophobe (log kow = 5,04) sur le bassin versant.

3. HAP

Les profils de contamination sont très hétérogènes sur les différentes stations, à l'image de ce que l'on peut observer sur l'ensemble du littoral français (Rinbio, 2007). Cette observation est certainement liée à la contamination diffuse des eaux côtières et aux nombreuses sources ponctuelles d'apports possibles (Figure 32).

Sur tous les sites, la somme des HAP est inférieure à celle observée sur le site source, plus proche du réseau routier (42,2 µg/kg ps). Ce résultat est très inférieur au seuil de contamination par les HAP fixé pour les coquillages par l'AFSSA (500 µg/kg ps).

Comme dans l'étude de la contamination des populations naturelles le naphthalène ressort sur chaque site et semble être un bon marqueur des HAP à la Réunion.

4. Organoétains

Le MBT et le MBT ont été détectés sur deux sites : Saint Benoît et la Possession (Figure 32). Un pic de DBT est également observé à la Possession où les activités portuaires à proximité et les travaux d'agrandissement de la darse du Port Est peuvent expliquer ces résultats.

Les niveaux de contamination détectés sont cependant modérés puisqu'ils sont 50 fois inférieurs pour les DBT et 150 fois inférieurs pour le DBT à ceux observés en milieu très contaminé lors de l'expérience de contamination dans la darse du Port Ouest.

5. Phénols et phtalates

Deux contaminants ont été détectés (4-para-nonylphénol et DEHP).

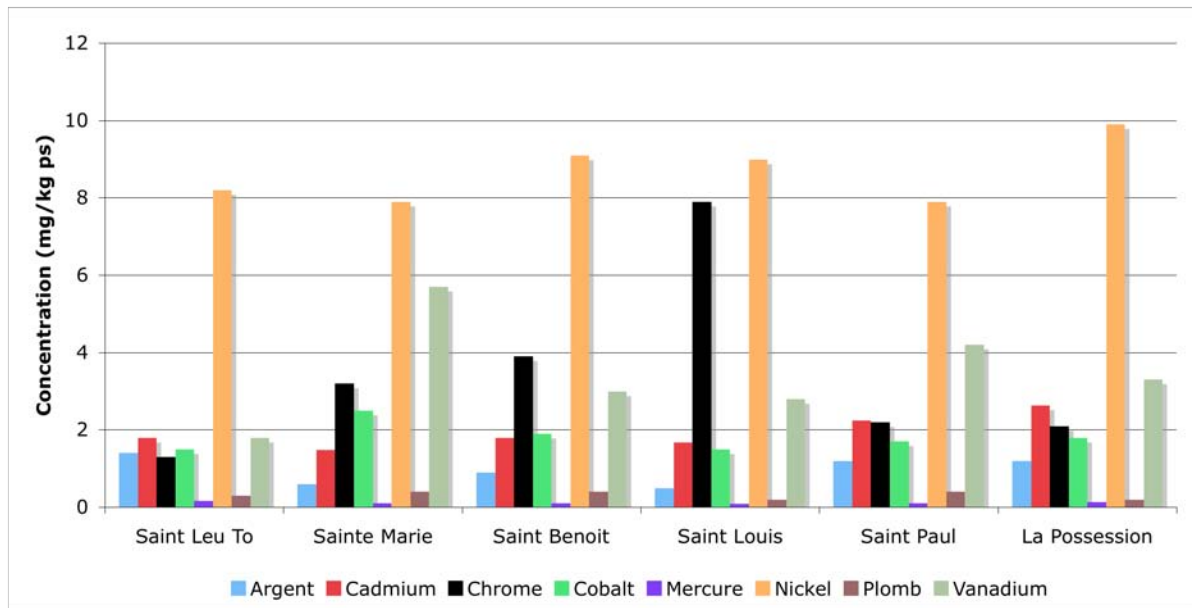
Le 4-para-nonylphénol présente des niveaux de contaminations plus élevés à La Possession, Saint Benoît et Sainte Marie (Figure 33). Ce détergent a également été détecté dans le cadre du Rinbio 2006 mais les contaminations étaient significativement plus faibles (100 fois inférieures).

Le DEHP présentait un niveau de contamination plus important sur le site source (2000 µg/kg ps) néanmoins des niveaux proches ont été détectés à Saint Paul et Saint Louis. Aucune donnée comparative n'est disponible pour ce plastifiant.

6. Polybromodiphényléthers

Un pic de BDE 77 a été détecté sur le site source à 15 µg/kg ps (Figure 33). Des niveaux de contamination plus faibles ont été observés à Sainte Marie, Saint Benoît et Saint Louis (entre 1,7 et 2,1 µg/kg ps).

(a)



(b)

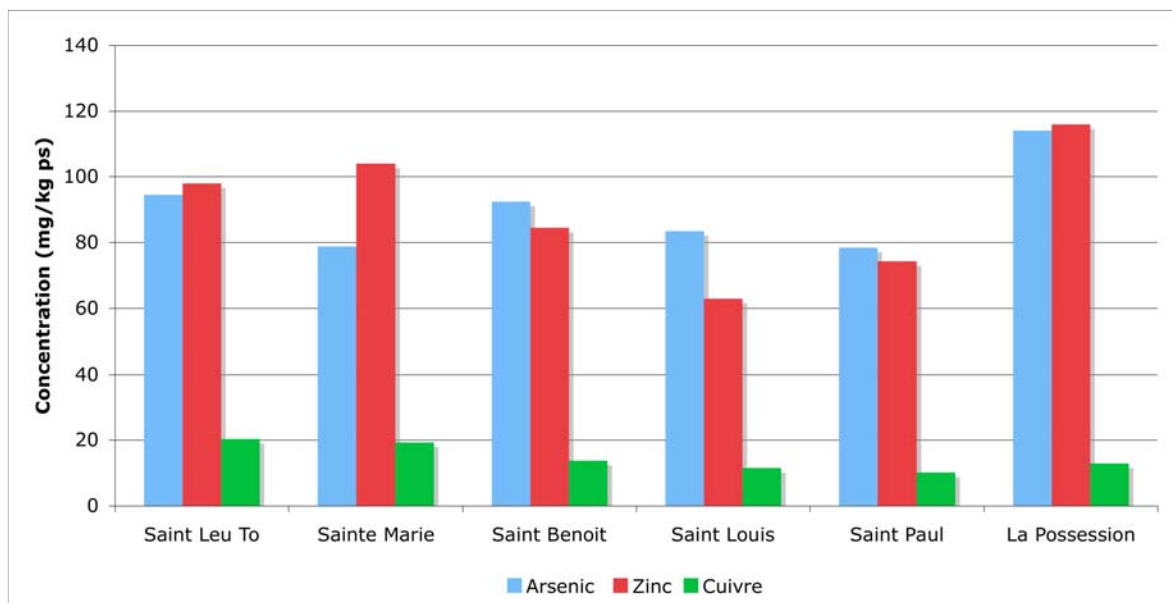
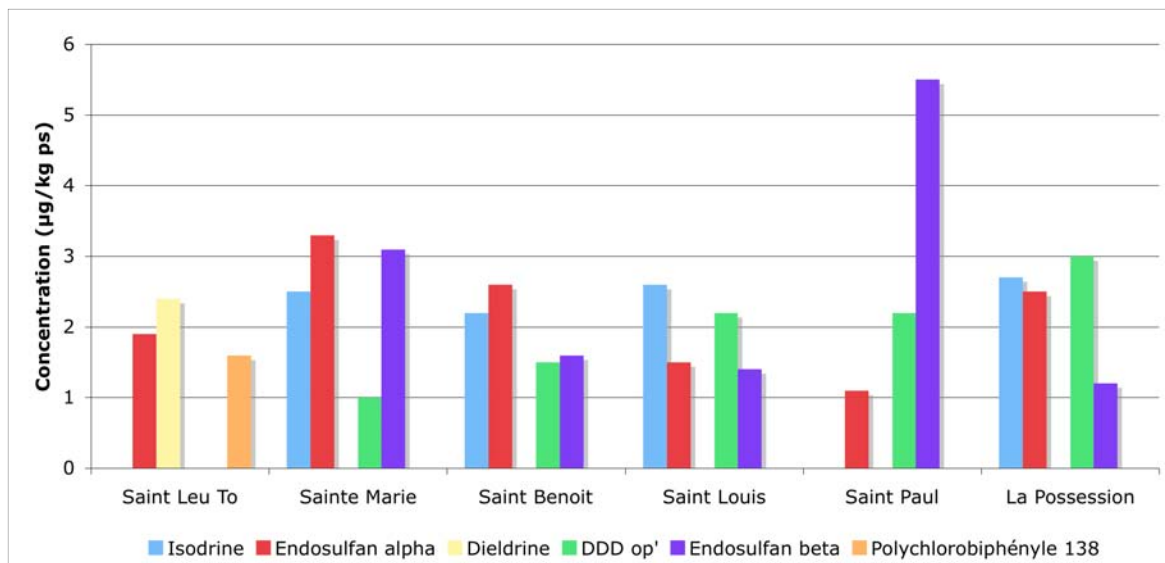


Figure 30 : Contamination par les métaux des modioles sur le site source (Saint Leu) et sur les sites de cagging

(a)



(b)

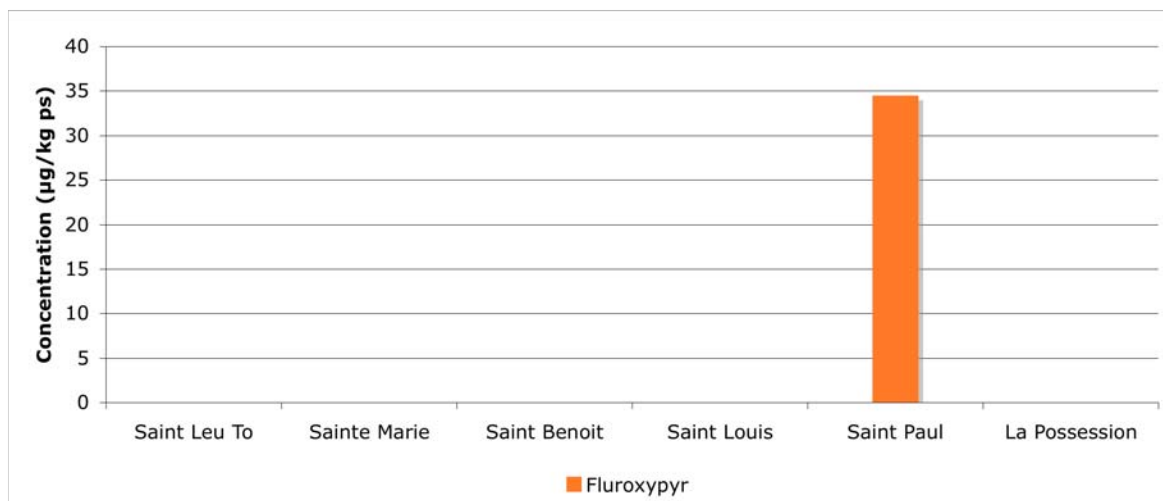
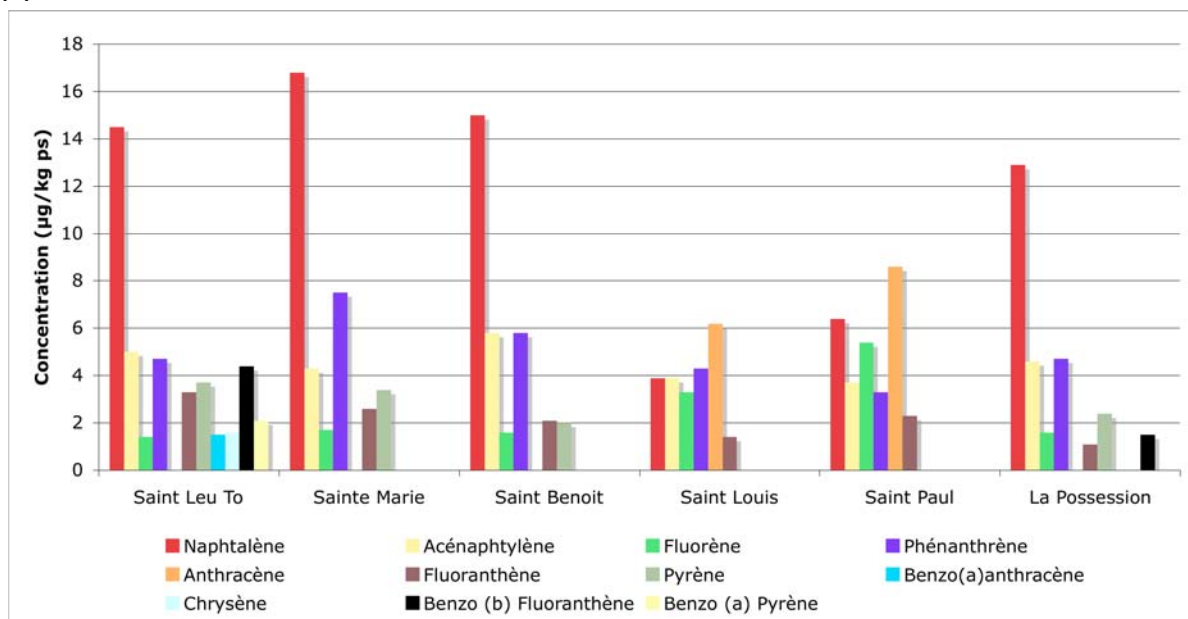


Figure 31 : Contamination des modioles par les pesticides sur le site source (Saint Leu) et sur les sites de caging

(a)



(b)

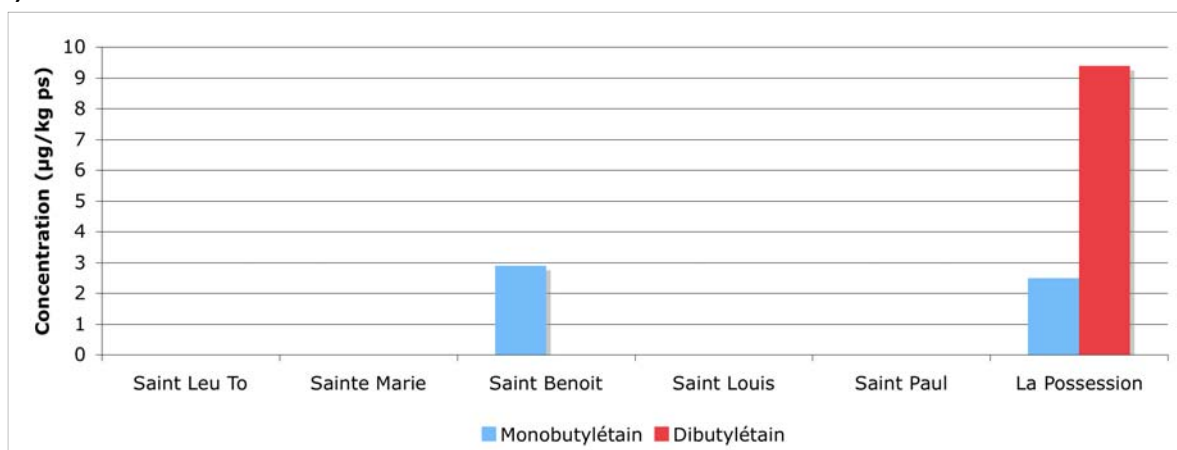
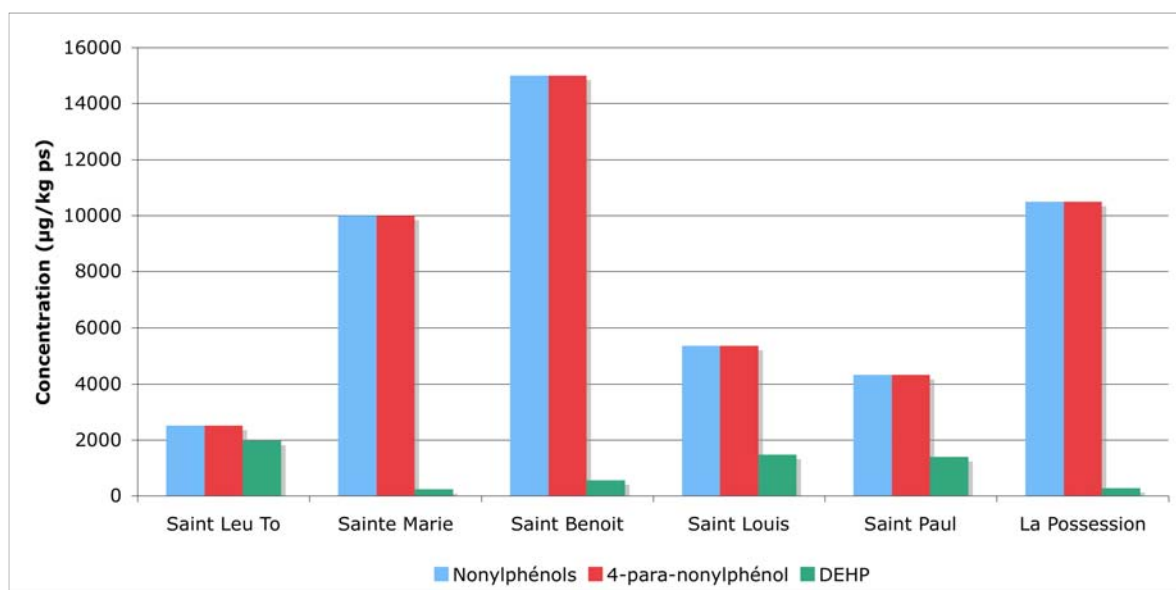


Figure 32 : Contamination des modioles par les HAP (a) et les organoétains (b) sur le site source (Saint Leu) et sur les sites de cagging

(a)



(b)

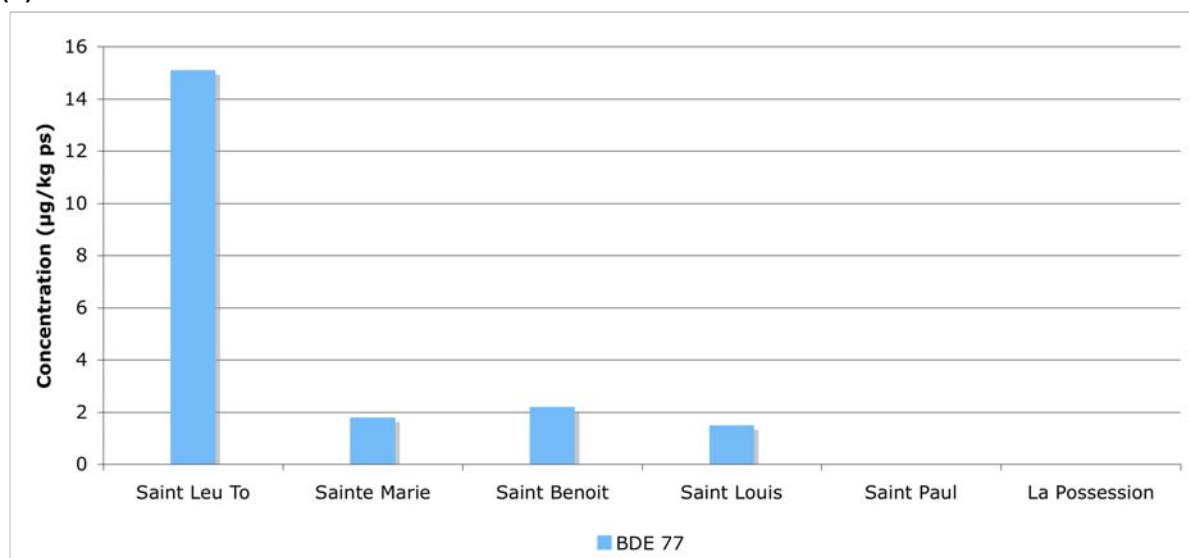


Figure 33 : Contamination des modioles par les phénols et les phtalates (a) et par les polybromodiphényléthers (b) les sur le site source (Saint Leu) et sur les sites de cagging

4.4.3 Synthèse

D'un point de vue technique cette première expérience de transplantation à la Réunion est une réussite.

La méthodologie permet de sélectionner les stations indépendamment de la présence de populations naturelles, de leur distance à la côte et de leur profondeur. Le mouillage est léger, discret, adapté à toutes les conditions hydro-dynamiques et procure ainsi beaucoup de souplesse au plan de l'échantillonnage. Les opérations de pose et de relève sont facilitées par la précision du positionnement (GPS), la taille du mouillage et sa signature caractéristique (sonar ou sondeur). Ainsi, même en période hivernale, le taux de récupération des mouillages est de 83 %.

Les modioles ont parfaitement supporté ces conditions de stabulation puisque la mortalité est inférieure à 10 % et les indices écophysologiques montrent un bon état de santé des individus.

Les modioles ont bioaccumulé des contaminants absents du site source sur l'ensemble des sites.

Les analyses montrent un bruit de fond naturel élevé en nickel, en cobalt, en vanadium et en chrome certainement en liaison avec la nature du socle géologique et le volcanisme.

Pour les pesticides, l'endosulfan se retrouve sur tous les sites avec un pic élevé à Saint Paul et le fluroxypyr a été détecté pour la première fois dans une matrice biologique à la Réunion avec un pic à près de 35 µg/kg ps Saint Paul

Les HAP présentent des profils de contamination très hétérogènes sur les différentes stations, à l'image de ce que l'on peut observer sur l'ensemble du littoral français (Rinbio, 2007) et le naphthalène ressort sur chaque site.

Des organoétains, MBT et MBT ont été détectés sur deux sites : Saint Benoît et la Possession. Les niveaux de contamination détectés sont très significativement inférieurs à ceux observés en milieu très contaminé lors de l'expérience de contamination dans la darse du Port Ouest.

Le 4-para-nonylphénol et le DEHP ont été analysés pour la première fois dans une matrice biologique à la Réunion et les niveaux de contamination semblent importants sur l'ensemble des sites.

Un pic de BDE 77 a été détecté sur le site de Saint Leu.

THEME 3 : COMPLEMENTS D'INFORMATIONS SUR D'AUTRES MATRICES NATURELLES

En milieu tropical, à ce jour, aucun réseau pérenne de suivi de la qualité des eaux basé sur une matrice biologique n'a été mis en place.

D'après la bibliographie disponible, la modiole semble l'espèce la plus indiquée pour un tel développement et à ce titre elle a été sélectionnée pour ce programme pilote. Cependant il est primordial de recueillir des données sur d'autres matrices présentes dans les milieux littoraux réunionnais afin de disposer d'alternatives à la modiole. De plus afin d'avoir une image plus réaliste du degré de contamination de l'écosystème, il est important de disposer d'un premier état des lieux du degré de contamination de différents organismes benthiques de niveaux trophiques différents.

Aussi une étude bibliographique a été réalisée sur les capacités bioaccumulatrices des espèces répertoriées sur les récifs de la Réunion. Cette étude a permis de définir une liste d'espèces cibles et deux campagnes de prélèvement et d'analyse de la contamination de ces espèces cibles a été réalisée en 2005.

4.5 Synthèse bibliographique sur les capacités bioaccumulatrices d'autres matrices biologiques des milieux récifaux de l'île de la Réunion

De nombreuses études ont été menées sur la bioaccumulation par les biocénoses tropicales marines. Et afin d'estimer le potentiel biointégrateur des biocénoses littorales locales, pour chaque matrice, la liste des espèces ayant fait l'objet d'une publication a été croisée avec l'inventaire des espèces marines de l'île publié en 2003 par le laboratoire ECOMAR (Bourmeaud, 2003). En 2004, les données recueillies ont été synthétisées sous forme de fiches listant pour chaque matrice (les éponges, les coraux, les crustacés, les mollusques, les échinodermes, les poissons et les macroalgues) les rubriques suivantes :

- Polluants analysés toutes espèces confondues ;
- Technique d'analyse ;
- Points forts;
- Points faibles;
- Conclusion ;
- Tableau de synthèse des espèces ayant fait l'objet de mesure de contamination par les micropolluants.

Ces fiches sont présentées en annexe 17 et il ressort de cette étude les principaux points suivants:

En zone tropicale, de nombreuses études ont été menées sur le dosage des micropolluants dans les organismes marins. La quasi totalité des grands types de matrices biologiques aisées à échantillonner ont fait l'objet d'analyses : spongiaires, cnidaires, crustacés, mollusques, échinodermes, poissons et macroalgues. Le plus souvent des dosages de métaux ont été réalisés néanmoins pour de nombreuses espèces des dosages de pesticides et d'hydrocarbures ont été réalisés.

Malgré ces résultats illustrant une contamination significative de nombreux récifs, aucune application n'a été développée en terme de gestion de l'environnement côtier à travers un véritable réseau de surveillance. En effet, si la plupart des organismes du récif exposés à une contamination semblent fixer une part de cette charge polluante, aucune étude n'indique d'espèce particulièrement adaptée au biomonitoring. La plupart des études ne présentent qu'une seule campagne de prélèvement et d'analyse or le processus de validation d'un modèle de bioindicateur impose la réalisation d'études plus poussées à l'image du programme modiole.

Parmi les espèces étudiées aux travers de ces travaux, les écosystèmes littoraux de l'île de La Réunion abritent plusieurs espèces présentant des capacités biointégratrices potentiellement intéressantes. Ces organismes peuvent tous, en théorie, être intégrés en tant qu'organismes bioindicateurs au sein d'un réseau de surveillance des eaux marines. Cependant, comme l'illustre le tableau 11, ces matrices répondent plus ou moins bien au cahier des charges définissant l'organisme bioindicateur modèle publié par Phillips en 1977.

Tableau 10: Synthèse des avantages et limites des matrices identifiées comme bioaccumulatrices vis à vis des paramètres idéaux d'un organisme bioindicateurs

	Abondance	Sédentarité	Echantillonnage simple	Protocole analytique simple	Longévité	Euryhalinité	Transplantation simple
Spongiaires	**	*****	**	***	***	**	*
Cnidaires	***	*****	***	*	*****	*	*
Crustacés	**	**	*	**	*	*	**
Mollusques	***	*****	*****	*****	**	*****	*****
Echinodermes	***	***	*****	**	**	*	**
Poissons	***	*	**	**	**	**	*
Macroalgues	**	*****	**	*****	**	**	**

Dans l'état actuel des connaissances scientifiques, seuls les bivalves ont montré une capacité à bioaccumuler la plupart des familles de micropolluants (métaux, HAP, pesticides, polluants organiques industriels). Et seul *Modiolus auriculatus* est reconnu par la communauté scientifique comme un véritable outil de biomonitoring. Très abondante et largement répartie sur les côtes de l'île, la modiole est très sédentaire, facilement échantillonnée et analysée. Sa longévité est moyenne mais elle présente une euryhalinité importante lui permettant notamment de supporter plus aisément une transplantation (Bourdeline, 1994).

Au final, aucune espèce ne semble véritablement apte à la biosurveillance à la Réunion à l'exception de la modiole. Cependant l'analyse d'autres matrices peut permettre d'affiner les connaissances sur le degré de contamination des écosystèmes littoraux de l'île et d'identifier une matrice biologique complémentaire à la modiole.

4.6 Contamination d'autres matrices biologiques en milieu récifal

À ce jour, très peu de données sont disponibles sur la contamination des milieux récifaux de la Réunion. Le programme modiole, notamment à travers le suivi mensuel de contamination

de deux populations naturelles réalisé entre août 2004 et juillet 2005 a permis de décrire en partie le bruit de fond de cette contamination. Mais le champ d'étude est vaste, il existe au sein de ces écosystèmes récifaux une multitude d'organismes aux modes de vie et d'alimentation très diversifiés et donc aux potentiel de bioaccumulation différents sur le plan qualitatif et quantitatif.

Aussi dans le cadre du programme modiole, il était primordial d'étudier ces phénomènes de contamination à différents niveaux trophiques afin d'avoir d'approcher une vision écosystémique du degré de contamination. De plus, dans l'optique d'un réseau de surveillance basé sur les populations de modioles, l'étude d'autres matrices du lagon peut permettre d'identifier une matrice pouvant remplacer la modiole en cas de crise grave altérant la ressource (maladies, cyclone...).

4.6.1 Méthodologie

4.6.1.1 Sélection des espèces cibles

Sur la base de la synthèse bibliographique présentée en annexe (Cambert, 2004), une liste de 10 espèces potentielles a pu être établie (Tableau 12).

Cette liste reste indicative et indique surtout les matrices biologiques cibles, le choix de l'espèce a ensuite été réalisé sur site lors de l'échantillonnage après observation des abondances spécifiques.

Matrice	Espèce
Eponges	<i>Cliona inconstans</i>
	<i>Sphaciospungia sp</i>
Echinodermes	<i>Echinometra mathaei</i>
	<i>Holothuria sp</i>
Mollusques	<i>Modiolus auriculatus</i>
	<i>Tridacna sp</i>
Poissons	<i>Stegastes fasciolatus</i>
	<i>Abudefduf sexfasciatus</i>
Algues	<i>Dictyota sp</i>
	<i>Padina tenuis</i>
	<i>Turbinaria ornata</i>

Tableau 11 : Liste des matrices et espèces tropicales potentiellement bioaccumulatrices et présentes en milieu récifal à la Réunion

4.6.1.2 Sélection des sites de prélèvements et programmation des campagnes

Concernant la sélection des sites, l'objectif était d'avoir des informations sur le degré de contamination des espèces sélectionnées au niveau de trois sites appartenant à des bassins versant différents, avec une géomorphologie littorale différente et où des modioles ont été observées. Ainsi trois sites ont été retenus :

- **Trou d'eau** : A l'ouest de l'île, ce site se trouve dans la portion du linéaire côtier protégée par une barrière corallienne. Il est sous l'influence du bassin versant de Saint Paul-Trois Bassins. Il s'agit du second site référence du programme modiole, la diversité biologique y est importante et les conditions d'accès sont favorables ;
- **Grande Anse** : Au sud de l'île, ce site est influencé par un régime de houle important notamment en saison sèche. Un bassin versant riche en activité agricole (Petit île) se trouve en amont. Un platier caractérisé par un fort courant abrite de nombreuses modioles et la piscine artificielle du site est riche en faune et flore. Les conditions d'accès sont bonnes ;
- **Sainte Rose** (Pointe corail) : Seul site sélectionné à l'Est de l'île, il se trouve en aval d'une grande étendue de culture de cannes à sucre. Il présente des falaises volcaniques battues par de fortes houles en saison sèche. La diversité est importante entre 1m et 10 m de profondeur, il est nécessaire de s'y rendre en bateau depuis Sainte Rose et d'intervenir en scaphandre autonome. L'accessibilité est donc limitée.

Deux campagnes de prélèvements ont été programmées sur chaque site : une en saison sèche (août 2004) et une en saison humide (avril 2005).

4.6.1.3 Prélèvement et conditionnement

L'ensemble des prélèvements ont été réalisés manuellement en apnée ou en scaphandre autonome. Pour les poissons, les prélèvements ont nécessité l'utilisation d'une arbalète pour les sites en lagon ou en piscine artificielle et d'un fusil de chasse pour le site en pleine eau.

Les échantillons ont été placés en glacière immédiatement après leur prélèvement puis conduits au laboratoire de l'ARVAM. Les échantillons ont été traités le jour même du prélèvement dans des conditions répondant aux critères de qualité préconisés par Ifremer (Claisse, 2001). Les opérateurs ont travaillé munis de blouses, de masques et de gants en polyéthylène pour limiter toute contamination et l'ensemble des précautions préconisées par Ifremer et décrites au paragraphe 3.1.2.1 ont été respectées.

L'ensemble des échantillons a été conditionné en piluliers verre stérile recouvert d'une feuille d'aluminium calciné. Pour le conditionnement, les méthodes décrites dans les fiches pour chaque matrice ont été appliquées en laboratoire le jour même du prélèvement (annexe) :

- Pour les spongiaires et les algues, aucune dissection n'a été réalisée. Les prélèvements ont été nettoyés des épiphytes, égouttés sur Buchner et placés en pilulier ;
- Chez les oursins, et les mollusques seuls la masse viscérale et le contenu digestif ont été prélevés et conditionnés. Le test calcaire ou la coquille n'ont pas été intégrés à l'échantillon ;
- Les poissons ont été disséqués et seuls les filets (avec les écailles) ont été mis en piluliers. Les viscères et la tête n'ont pas été conditionnés.

Les échantillons ont été lyophilisés à l'ARVAM avant d'être envoyés au laboratoire de Rouen pour analyse.

4.6.1.4 Analyse chimiques

Les analyses ont été réalisées en métropole par le laboratoire de Rouen. Les échantillons ont été envoyés par Chronopost express (livraison en 48h). Les analyses ont porté sur une liste approuvée par le comité de suivi du programme et inspirée des listes des principaux réseaux de biosurveillance (RNO, Mussel watch et Rinbio) et de la liste 33 substances prioritaires de l'annexe X de la DCE (Figure 34). Les méthodes d'analyses appliquées par le laboratoire de Rouen sont précisées en annexe 18.

Métaux (mg/kg ps)	Cadmium Chrome total Cuivre Mercure Nickel Plomb Zinc Vanadium Argent Arsenic	Organochlorés et apparentés (µg/kg ps)	Cadusafos Diazinon Diethion Pendimethaline Pyrazophos Pyrimiphos ethyl Terbutylazine Trifluraline Diuron Methomyl Isoproturon Linuron Mercaptodimethur Fipronil Fipronil sulfone Fipronil sulfide Fipronil desulfenil
	PCB (µg/kg ps)		PCB 28 PCB 52 PCB 101 PCB 118 PCB 138 PCB 153 PCB 180
Organochlorés et apparentés (µg/kg ps)	DDT op' DDT pp' DDE op' DDE pp' DDD op' DDD pp' Alpha HCH Lindane Deltamethrine Alachlore Alpha endosulfan Beta endosulfan Lambda cyalothrine Oxadiazon Ethoprophos Chlorpyriphos Atrazine	HAP (µg/kg ps)	Naphtalène Acénaphtylène Acénaphène Fluorène Phénanthrène Anthracène Fluoranthène Pyrène Benzo (a) anthracène Chrysène Benzo (b) fluoranthène Benzo (k) fluoranthène Benzo (a) pyrène Dibenzo (a,h) anthracène Benzo (g,h,i) pérylène Indéno (1-2-3-cd) pyrène
	Organoétains (µg/kg ps)		Monobutylétain Dibutylétain Tributylétain

Figure 34 : Liste des contaminants analysés sur les autres matrices biologiques

4.6.2 Résultats

Les deux campagnes ont pu être réalisées sans difficulté sur les trois sites durant les deux saisons (Tableau 13). Comme l'indique le tableau 14, au final 5 matrices et 12 espèces autres que la modiole ont été échantillonnées tous sites confondus. Les espèces prélevées varient selon les sites car il a fallu s'adapter à la composition et l'abondance des peuplements sur les différents sites.

Tableau 12 : Date de prélèvement sur les trois sites lors des campagnes de saison humide et de saison sèche

	Saison sèche	Saison humide
Trou d'eau	24-août-04	19-avr-05
Grande Anse	26-août-04	20-avr-05
Sainte Rose	6-sep-04	22-avr-05

Tableau 13 : Espèces prélevées en saison sèche (août 2004) et en saison humide (avril 2005) sur les sites de Trou d'eau, Grande anse et Sainte Rose

Matrice	Espèce	Sites		
		Trou d'eau	Grande Anse	Sainte Rose
Eponges	<i>sp 1</i>			
	<i>sp2</i>			
	<i>Bienma sp</i>			
Echinodermes	<i>Tripneuste sp</i>			
	<i>Echinotrix diadema</i>			
	<i>Holothuria sp</i>			
Mollusques	<i>Modiolus auriculatus</i>			
	<i>Tridacna sp</i>			
Poissons	<i>Stegastes nigricans</i>			
	<i>Ctenochaetus striatus</i>			
Algues	<i>Codium sp</i>			
	<i>Amphiroa sp</i>			
	<i>Amansia sp</i>			

Les résultats bruts des analyses sont présentés en annexe 19.

Les niveaux de contamination sont faibles même si de nombreuses molécules ont été détectées. On observe des variations intéressantes selon les sites, la saison et les matrices et il apparaît au final que les oursins représentent une matrice complémentaire intéressante.

4.6.2.1 Résultats par site

Les niveaux de contamination sont faibles et les données recueillies sont comparables sur les trois sites. Si l'on considère les résultats par site, toutes matrices confondues, sur les 70 molécules analysées :

- Trou d'eau, 30 molécules détectées (4 pesticides, 15 HAP, 10 ETM et 1 organoétain) ;
- Grande Anse, 24 molécules détectées (2 pesticides ; 12 HAP et 9 ETM) ;
- Sainte Rose, 23 molécules détectées (12 HAP, 10 ETM et 1 organoétain).

Le site de Trou d'eau confirme une contamination plus importante mise en évidence avec le suivi modiole 2004-2005. Une matrice urbaine plus dense, la proximité du réseau routier et la présence d'infiltration d'eau douce en bordure littorale peuvent expliquer ce résultat. Les sites de Grande Anse et de Sainte Rose semblent légèrement moins exposés bien que l'activité agricole soit importante en amont du bassin versant.

4.6.2.2 Résultats par saison

En considérant le nombre de molécules détectées par campagne tous sites et toutes matrices confondues, il apparaît une différence entre la saison sèche et la saison humide :

- Saison sèche (hiver austral) : 27 molécules détectées (5 pesticides, 13 HAP et 9 ETM) ;
- Saison humide (été) : 32 molécules détectées (6 pesticides, 15 HAP, 10 ETM et 1 organoétain).

Les peuplements littoraux semblent donc légèrement plus exposés aux contaminants en période humide qu'en période sèche. Ce résultat s'explique en partie par le fait que les prélèvements de saison humide ont été réalisés en fin de saison or de très fortes pluies ont été enregistrées sur l'île 1 mois et demi avant (fin février, début mars 2005).

4.6.2.3 Résultats par matrice

Tous sites confondus, les niveaux de contamination en métaux et HAP sont très comparables alors que des différences apparaissent pour les autres types de contaminants (Tableau 15).

Tableau 14 : Nombre de molécules captées par les différentes matrices selon la famille de micropolluant

	HAP	ETM	Pesticides	Organoétain	Total	% matière grasse
Algues	12	10	2	1	25	5,23
Oursins	13	10	2	0	25	4,92
Bénitier	12	10	0	1	23	3,91
Eponge	12	10	0	1	23	5,28
Holothuries	12	9	0	0	21	9,65
Poissons	12	10	0	0	22	4,38

Seules les algues ont capté les quatre types de polluants analysés. Et au final, il ressort que les oursins et les algues semblent être les deux matrices les plus aptes à capter la charge polluante.

D'un point de vue technique et en considérant les qualités requises à une espèce pour la biosurveillance la matrice oursins est très intéressante :

- Population abondante sur une grande partie du linéaire côtier de l'île;
- Quasi - sédentaire et en ce sens plutôt représentative de la zone étudiée ;
- Échantillonnage manuel très simple et rapide ;
- Conditionnement aisé en comparaison de la modiole notamment ;
- Taille raisonnable et tissus qui semblent adaptés à la réalisation d'analyses tant en terme qualitatif que quantitatif.

Si des études complémentaires (cinétiques de contamination..) manquent pour statuer clairement sur les capacités bioindicatrices des oursins, cette matrice est déjà très intéressante et peut représenter une alternative aux modioles.

D'ailleurs, à la vue de ces premiers résultats, la matrice oursin a été sélectionnée en 2006 par la DIREN, suite à la crise du Chikungunya, pour suivre la contamination du compartiment biologique marin lors du suivi de la contamination par les pesticides utilisés dans le cadre de la lutte anti-vectorielle. En effet, les sites d'études ne présentaient pas de population naturelle de modiole et le protocole de transplantation de modioles n'avait pas encore été testé. Aussi des mesures ont été réalisées sur des populations naturelles d'oursins à Grand fond et en baie de Saint Paul. Ces résultats ont confirmé les capacités bioaccumulatrices des oursins et les avantages techniques de la matrice oursins (DIREN *et al.*, 2006).

4.6.3 Synthèse

D'après la littérature scientifique, de nombreux organismes autres que la modiole et répertoriées sur les récifs de la Réunion présentent un potentiel de bioaccumulation intéressant. Ils peuvent être regroupés en 7 matrices biologiques : les éponges, les coraux, les crustacés, les mollusques bivalves (bénitiers, huitres), les échinodermes (oursins, holothuries), les poissons et les macroalgues.

Si aucune espèce ne semble véritablement apte à la biosurveillance à la Réunion à l'exception de la modiole, il est apparu possible d'identifier une matrice biologique complémentaire à la modiole. L'analyse des niveaux de contamination a porté sur 12 espèces prélevées sur trois sites (Trou d'eau, Grande Anse et Sainte Rose). Ainsi 5 matrices biologiques ont pu être étudiées (algues, oursins, bénitiers, éponge, holothurie et poisson). Au final, trois sites étudiés ont présenté un niveau de contamination modéré et les oursins et les algues ressortent comme les matrices complémentaires à la modiole les plus pertinentes au plan local.

Ces résultats ont déjà été valorisés à travers l'utilisation de la matrice oursins dans le cadre du suivi de la contamination du milieu marin par les pesticides utilisés pour la lutte anti-vectorielle.

5 THEME 4 : FAISABILITE D'UN BIOMONITORING ACTIF DES CONTAMINANTS CHIMIQUES A LA REUNION AU SEIN DU RESEAU DCE

Ce programme pilote a permis de valider à la Réunion l'adéquation de la moule tropicale (*Modiolus auriculatus*) avec la méthode du biomonitoring actif. Cette espèce apparaît comme un outil pertinent dans le contexte de la mise en place de la Directive Cadre Eau dans les eaux côtières de l'île.

Il est d'ors et déjà possible, en s'appuyant sur l'expérience acquise au cours du programme, de définir les grandes lignes d'un suivi de la contamination chimique des eaux de surface par l'utilisation de la modiole, dans le futur réseau de surveillance DCE.

5.1 Le réseau de surveillance « DCE » des eaux côtières

La Directive Cadre Eau fixe un objectif de résultat à atteindre pour 2015, le bon état chimique et le bon état écologique des masses d'eau.

Ainsi un réseau de surveillance DCE doit être mis en place sur le district de la Réunion pour suivre l'état écologique (ou le potentiel écologique) et l'état chimique des eaux de surface. Ce programme est établi « de manière à dresser un tableau cohérent et complet de l'état des eaux au sein de chaque district hydrographique ». Il comprend plusieurs volets :

- **le contrôle de surveillance**, destiné à donner l'image de l'état général des eaux;
- **les contrôles opérationnels**, destinés à assurer le suivi de toutes les masses d'eau identifiées comme risquant de ne pas atteindre les objectifs environnementaux de la DCE;
- **les contrôles d'enquête**, effectués en cas de non atteinte vraisemblable des objectifs environnementaux et en l'absence d'explication par des pressions déterminées, afin de déterminer la cause (lorsqu'un contrôle opérationnel n'a pas encore été mis en place) et en cas de pollution accidentelle, pour en déterminer l'ampleur et l'incidence ;
- **les contrôles additionnels**, sur certaines zones protégées : zones d'habitats et de protection d'espèces lorsque les masses d'eau incluses dans ces zones risquent de ne pas répondre aux objectifs environnementaux visés à l'article 4 de la DCE.

Parmi les matrices indiquées pour cette surveillance, une matrice biologique peut être utilisée pour le suivi des niveaux de présence des contaminants hydrophobes listés dans la Circulaire DCE 2007/20.

5.2 *Modiolus auriculatus*, une espèce adaptée au biomonitoring type DCE à la Réunion

Le programme pilote Modiole a permis de valider la pertinence de l'utilisation de la modiole dans le cadre d'un réseau de surveillance DCE à l'île de la Réunion :

- La modiole est présente sur tout le littoral et des populations particulièrement denses sont observées en zone récifale. La ressource est donc abondante et facilement accessible. Son utilisation est donc envisageable pour plusieurs volets du réseau DCE ;

- L'échantillonnage manuel est aisé et les techniques de traitement en laboratoire préconisées par Ifremer dans le cadre du Rinbio ont été acquises par l'ARVAM et peuvent désormais fonctionner en routine ;
- Les analyses de niveaux de contamination ont confirmé le potentiel de bioaccumulation de cette espèce. Elle capte l'ensemble des familles de contaminants listés dans la DCE et susceptibles d'être présents dans le milieu ;
- La modiole apparaît parfaitement adaptée à la réalisation de transplantation (2-3 mois en stabulation) en champ proche ou moyen et à toute saison. Cette technique répond donc aux besoins des quatre types de contrôle d'un réseau DCE.

Il est à noter que ce programme a également montré la possibilité d'utiliser d'autres matrices biologiques marines. En effet, l'oursin s'avère être un outil complémentaire à la modiole. Il est pertinent pour un biomonitoring passif, s'appuyant sur une population naturelle.

5.3 Faisabilité technico-financière d'un biomonitoring modiole au sein du volet « contrôle de surveillance » de la DCE Réunion

Le volet « contrôle de surveillance » de la DCE inclus un suivi des niveaux de contamination dans le biote. La méthode modiole développée à travers ce programme pilote permet de répondre au cahier des charges du « contrôle de surveillance » détaillé dans la Circulaire DCE 2007/20.

5.3.1 Protocole DCE

Dans le cadre du programme Modiole, tous les travaux réalisés intégraient déjà la logique qualité DCE.

Ainsi le protocole utilisé lors de l'opération test de biomonitoring actif de juillet à octobre 2007 était inspiré du protocole Rinbio et des préconisations de l'Ifremer pour le biomonitoring dans le cadre de la DCE. Ce protocole s'est révélé parfaitement adapté aux conditions de terrain et répond aux prérogatives de la circulaire.

Concernant les analyses chimiques, l'ensemble des molécules listées dans la circulaire DCE 2007/20 comme pertinentes à suivre dans le biote ont pu être dosées dans les échantillons de modioles par le laboratoire de Rouen. Dans un premier temps, il convient de considérer cette liste de molécules comme référence même si des modifications pourraient être apportés par la suite (figure 28).

5.3.2 Fréquence et période

La Circulaire DCE 2007/20 impose une campagne de biomonitoring des stations du contrôle de surveillance 1 fois par plan de gestion soit une fois tous les 6 ans.

Les populations naturelles identifiées peuvent aisément alimenter un suivi à cette fréquence sans altérer la pérennité des peuplements.

Compte tenu des données recueillies au cours du programme modiole, il conviendra de mettre en place les dispositifs en début de saison humide (décembre-janvier) afin de capter les premières grosses pluies et de les relever après 2 à 3 mois de stabulation (février-mars) selon les conditions météorologiques.

5.3.3 Stations

Il est demandé de réaliser le biomonitoring sur l'ensemble des stations du contrôle de surveillance.

À ce jour le contrôle de surveillance compte 10 stations qui font l'objet de 6 campagnes hydrologiques par an : 8 stations en champ moyen et 2 stations en lagons.

Le programme Modiole a montré que la mise en place de structure de stabulation de modiole est techniquement réalisable à toute saison sur l'ensemble de ces stations. Des mouillages temporaires peuvent être déployés et récoltés en suivant le protocole Rinbio déjà appliqué en 2007 avec succès.

6 BIBLIOGRAPHIE

- Amiard, J. C., C. Amiard-Triquet, C. Berthet and C. Metayer (1986). "Contribution to the ecotoxicological study of cadmium lead, copper and zinc in the mussel *M. edulis* I: Field study." *Mar. Biol* 90: 425-431.
- Aminot, A., Kérouel, R., 2004. Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses. Ed. Ifremer, 336p.
- Andral, B. et Stanisière, J.Y., 1999. Réseau intégrateurs biologiques RINBIO. Evaluation de la qualité des eaux basée sur l'utilisation de stations artificielles de moules en Méditerranée : résultats de la campagne 1998. Rapp. Ifremer/DEL/TL pour le compte de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. 46p.+annexes.
- Andral, B., Stanisiere, J.Y. and Mercier, S., 2001. Réseau Intégrateurs Biologiques. RINBIO. Evaluation de la contamination chimique des eaux basée sur l'utilisation de stations artificielles de moules en Méditerranée: résultats de la campagne 2000., Ifremer. R.INT.DEL/TL/01-03.
- Andral, B., Stanisiere, J.Y, Sauzade D, Damier, E, Thebault, H, Galgani, F, Boissery, P, 2004. Monitoring chemical contamination levels in the Mediterranean based on the use of mussel caging *Marine Pollution Bulletin*, Volume 49, Issues 9-10, November 2004, Pages 704-712.
- Andral, B. et Tomasino, C., 2006. Réseau intégrateurs biologiques RINBIO : campagne 2006. Evaluation de la qualité des eaux basée sur l'utilisation de stations artificielles de moules en Méditerranée : résultats de la campagne 2006. Rapp. Ifremer pour le compte de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. 104 pages
- Bourdelin, F., 1994. Biologie et écophysiologie de deux populations de *Modiolus auriculatus* Krauss (Mytilidae) de Tahiti : application à l'étude des pollutions chimiques des milieux lagunaires. Thèse de doctorat en écologie marine. Université française du Pacifique. 212p.
- Bourdelin, F., 1996. Physiological Responses of the Tropical Mussel, *Modiolus auriculatus*--a Possible Biological Monitor in French Polynesia *Marine Pollution Bulletin*. 32, 480-485.
- Bourmaud, C., 2003. Inventaire de la biodiversité marine récifale à la Réunion. Laboratoire d'Ecologie Marine, ECOMAR. 137pp.
- Bowen, H.J.M.,1966. "Trace elements in biochemistry." Academic Press, Londres: 241.
- Butler, P. A., Andren, L., Bonde, G. J., Jernelov, A., and Reisch, D.J., 1971. Monitoring organisms. FAO Conference on marine pollution and its effects on living resources and fishing. Rome, FAO fisheries report 99, Suppl. 1: 101-112.
- Cain, D.J. and Luoma, S.N., 1986. "Effect of seasonally changing tissue weight on trace metal concentration in the bivalve *Macoma bathica* in San Francisco bay." *Mar. Ecol. Prog. Ser* 28: 209-217.

- Cambert H., 2004. Contribution à la mise en place d'un réseau de biomonitoring des micropolluants dans les eaux côtières de l'île de la Réunion. Rapport de DESS « Science et gestion de l'environnement tropical », Université de la Réunion. 90 pages + annexes.
- CE, 2000. Directive 2000/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Journal officiel des Communautés européennes, 22/12/2000 : L327/1-L327/71.
- CE, 2007. Circulaire DCE 2007/20 relative à la constitution et la mise en oeuvre du programme de surveillance (contrôle de surveillance, contrôles opérationnels, contrôles d'enquête et contrôles additionnels) pour les eaux littorales (eaux de transition et eaux côtières) en application de la directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau : Bulletin officiel du ministère de l'écologie et du développement durable. 36 pages. 15/05/2007 :
- Claisse, D., 1989. "Chemicals concentration of french coast : the result of ten year mussel watch." *Mar. Pollut. Bull.* 20: 523-528.
- Claisse, D., Joanny, M. and J. M. Quintin., 1992. "The French marine pollution monitoring network (RNO)." *Analisis (Masson, Paris)* 20(6): 19-22.
- Claisse, D., Cossa, D., Bretaudeau-Sanjuan, J., Touchard, G., and Bombled, B., 2001. "Methylmercury in molluscs along the French coast." *Mar. Pollut. Bull.* 42(4): 329-332.
- Claisse, D., 2001. Description des opérations du RNO matière vivante relevant des laboratoires côtiers de la DEL. Rapport DEL-Ifremer.
- Cossa, D., 1989. A review of the use of *Mytilus* spp. As quantitative indicators of cadmium and mercury contamination in coastal waters. *Oceanologica Acta.* 12, 417-432.
- Cunningham, P.A., 1979. "The use of bivalve molluscs in heavy metal pollution research." *Mar. Pollut Functionnal Responses.*
- DIREN, ARVAM, ARDA., 2006. Suivi environnemental de l'impact potentiel de la lutte anti-vectorielle mise en œuvre contre le chikungunya. Évaluation de la qualité de l'eau, des sédiments et de la contamination d'organismes aquatiques en milieux marin et estuarien. 51 pages.
- Eisler, R., 1981. Trace metal concentration in marine organisms. Oxford, Pergamon Press.
- El-Sikaily, A., Khaled, A., El Nemr, A., Said, T.O. and ABD-Allah, A.M.A., 2002. Determination of hydrocarbons in Bivalves from Egyptian Mediterranean Coast. *Mediterranean Marine Science.* 123-131.
- El-Sikaily, A., Khaled, A., El Nemr, A., 2003. Heavy metals monitoring using bivalves from Mediterranean sea and Red sea. *Environmental Monitoring and Assessment.* 1-18.
- Ernst, W., 1977. Détermination of the bioconcentration potential of marine organisms.-A steady approach- I. Bioconcentration data for seven chlorinated pesticides in mussels (*Mytilus edulis*) and their relation to solubility data. *Chemosphere*, 11 : 731-740.

- Fabris, J. G., Richardson, B. J., O'Sullivan, J. E. and Brown, F. C., 1994. "Estimation of cadmium, lead and mercury concentration in estuarine waters using the mussel *Mytilus edulis planulus* L." *Environ. Toxicol. Wat. Qual.* 9: 183-192.
- Fisher, H., 1988. "Mytilus edulis as a quantitative indicator of dissolved cadmium. Final study and synthesis." *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 48: 163-174.
- Goldberg, E.D., 1975. A first step in global marine monitoring. *Marine Pollution Bulletin*, 6, 111.
- Goldberg, E. D., Bowen, V. T., Farrington, J. W., Harvey, G., Martin, J. H., Parker, P. L., Risebrough, R. W., Robertson, W., Schneider, E. and Gamble, E., 1978. "The Mussel Watch." *Envir. Conserv.* 5: 101-125.
- Goldberg, E.D., 1994. Coastal zone space : prelude to conflict ?. *UNESCO*. 138pp.
- Gonzalez, J.L., Turquet, J. et Cambert, H., 2005. Evaluation des concentrations en contaminants métalliques dans les eaux littorales de La Réunion par la technique DGT (gel à gradient de diffusion): résultat des premiers essais (mission d'avril 2005). Programme modiole : suivi pilote des contaminants chimiques dans les organismes marins de la Réunion. Rapport Ifremer/ARVAM. 22 pages.
- Kock de, W. C., 1983. "Accumulation of cadmium and PCBs by *Mytilus edulis* transplanted from pristine water into polluted gradient." *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40 (sup 2): 282-294.
- Monirith, I., Ueno, D., Takahashi, S., Nakata, H., Sudaryanto, A., Subramanian, A., Karuppiyah, S., Ismail, A., Muchtar, M., Zheng, J., Richardson, B.J., Prudente, M., Duc Hue, N., Tana, T.S., Tkalin, A.V., Tanabe, S., 2003. Asia-Pacific mussel watch: monitoring contamination of persistent organochlorine compounds in coastal waters of Asian countries. *Marine Pollution Bulletin*. 46, 281-300.
- Naïm, O., Cuet, P., 1989. Les platiers récifaux de l'île de la Réunion. Géomorphologie, contexte hydrodynamique et peuplements benthiques. Université de la Réunion et Agence d'Urbanisme de la Réunion. 282 pages + annexes.
- Pellouin-Grouhel A. (Coord.), 2005. Recommandations techniques pour un programme de surveillance adapté aux objectifs de la DCE. Stratégies d'échantillonnages et protocole. Volume 1 : Contaminants chimiques, phytoplancton, hydrologie, Ifremer/RST/Dyneco/Vigies/05-12.
- Phillips, D. J. H., 1976. "The Common mussel *Mytilus edulis* as an indicator of pollution by zinc, cadmium, lead and copper II. Relationship of Metals in the mussel to those discharged by industry." *Mar. Biol.* : 38: 71-80.
- Phillips, D.J.H., 1977. The use of biological indicator organisms to monitor trace metal pollution in marine estuarine environments – a review. *Environmental Pollution*. 13, 281-317.
- Phillips, D.J.H., 1980. Use of biological indicator organisms to quantitative organochlorine pollutants in aquatic environments – A review. *Environmental bulletin*. 16, 167-229.
- Phillips, D. J. H. and Rainbow, P. S., 1994. Biomonitoring of trace aquatic contaminants, Aldenn Press Ltd, Oxford.

- Regoli, F. and Orlando, E., 1993. "Mytilus galloprovincialis as a bioindicator of lead pollution: biological variables and cellular responses." *The Science of the Total Environment Supplement*: 1283-1292.
- Sericano, J. L., Wade T.L., Jackson T.J., Brooks J.M., Tripp B.W., Farrington J.W., Mee L.D., Readmann J.W., Villeneuve J.P., and Goldberg., E. D., 1995. Trace Organic Contamination in the Americas: An Overview of the US National Status & Trends and the International 'Mussel Watch' Programmes. *Marine Pollution Bulletin*. 31, 214-225.
- Tanabe, S., Prudente, M.S., Kan-atireklap, S. and Subramanian, A., 2000. Mussel watch : marine pollution monitoring of butyltins and organochlorines in coastal waters of Thailand, Philipines and India. *Ocean Coast. Manage.* 43, 819-839.
- Thibaud, Y. and Boutier, B., 1988. "Surveillance du mercure et du cadmium dans les huîtres et les moules du littoral français (1979-1985)." Rapport Synthèse RNO Vol IV: 55-100.
- Tsirivelo, R., 2003. Bio-écologie de la moule autochtone *Modiolus auriculatus* (Krauss, 1848) et perspective de son élevage dans la région de Toliara (Sud-Ouest de Madagascar). Mémoire de DEA en Océanologie appliquée, Université de Toliara, Institut Halieutique et des Sciences Marines. 83 pp+annexes.
- Turquet J. et Cambert H., 2001. Mise au point d'un intégrateur biologique pour l'évaluation de la qualité du milieu marin insulaire tropicale. Etude de pré-faisabilité. Etude ARVAM pour le compte de la DIREN Réunion. 32 pages + annexes.

7 ANNEXES
