



SUIVI DE LA QUALITE ECOTOXICOLOGIQUE (METAUX) DES EAUX DE LA ZONE
SUD DU LAGON DE NOUVELLE-CALEDONIE PAR TRANSPLANTATION
D'ESPECES BIOINDICATRICES (BIOACCUMULATION)

RAPPORT FINAL

Octobre 2010



CONTRAT DE CONSULTANCE AEL-LEA/VALE-NC

Convention n°C2466

SUIVI DE LA QUALITE ECOTOXICOLOGIQUE (METAUX) DES EAUX DE LA
ZONE SUD DU LAGON DE NOUVELLE-CALEDONIE PAR TRANSPLANTATION
D'ESPECES BIOINDICATRICES (BIOACCUMULATEURS)

Ludovic BREAU

Adeline GOYAUD

Hélène LEGRAND

Mathieu DOLBECQ

AEL-LEA, Nouvelle-Calédonie, Octobre 2010

Nombre de pages : 37

	N/Réf	V/Réf
Identification	100217-VI-05	C2466

Titre	SUIVI DE LA QUALITE ECOTOXICOLOGIQUE (METAUX) DES EAUX DE LA ZONE SUD DU LAGON DE NOUVELLE-CALÉDONIE PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIOINDICATRICES (BIOACCUMULATEURS)
-------	---

Auteurs	Ludovic BREAU, Adeline GOYAUD, Hélène LEGRAND, Mathieu DOLBECQ
---------	--

APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Ludovic Breau		15/10/2010
Vérificateur	Jean-Michel Fernandez		18/10/2010
Approbateur	Jean-Michel Fernandez		18/10/2010

EVOLUTION		
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR	DATE
1.0	Rapport final	18/10/2010

COPIE - DIFFUSION	
NOM	ORGANISME
Casalis C	VALE NC, Département Environnement

SOMMAIRE

Introduction.....	- 9 -
Objectifs	- 9 -
Méthodologie	- 9 -
Récolte et sélection des spécimens à transplanter	- 10 -
Immersion, contrôle et récupération des cages	- 11 -
Conditions météorologiques.....	- 12 -
Traitement et analyse des échantillons	- 14 -
Résultats - Discussion	- 16 -
Croissance des bivalves transplantés	- 16 -
Condition physiologique des bivalves transplantés.....	- 17 -
Concentrations en métaux dans les bivalves	- 19 -
Niveaux de concentration	- 19 -
Variabilité temporelle des concentrations.....	- 21 -
Concentrations en métaux dans les algues	- 23 -
Niveaux de concentration	- 23 -
Variabilité temporelle des concentrations.....	- 25 -
Conclusion	- 27 -
Remerciements.....	- 28 -
Références bibliographiques	- 29 -
Liste des figures	- 30 -
Liste des tableaux	- 30 -
Annexes.....	- 31 -

Introduction

L'étude présentée ici a été conduite par le Laboratoire AEL-LEA à la demande de l'industriel Vale NC afin de répondre au cahier des charges établi par la Province Sud de Nouvelle Calédonie en matière d'environnement. Ce travail s'inscrit dans le cadre de la surveillance écotoxicologique du milieu marin et de l'évaluation des risques environnementaux et sanitaires associés aux rejets liquides du complexe minier de Vale NC dans le Canal de la Havannah.

Sur la base des précédents travaux de recherche réalisés dans ce domaine par notre équipe et nos partenaires, la méthode de transplantation en stations artificielles d'espèces marines bioindicatrices capables de bioaccumuler certains métaux a été proposée à Vale NC pour effectuer un suivi à long terme des apports en métaux biodisponibles d'origines naturelle et industrielle dans cette zone.

Ce rapport présente les résultats obtenus dans le cadre de la mise en œuvre de la seconde campagne de transplantation.

Objectifs

La méthode de transplantation d'espèces bioindicatrices en stations artificielles consiste à immerger pendant trois mois deux espèces bioindicatrices accumulatrices de métaux (une algue et un bivalve) dans des cages en plastique disposées à une profondeur et des localisations géographiques prédéfinies. A l'issue de cette période d'immersion des spécimens dans le milieu récepteur à surveiller, les concentrations en différents métaux accumulés dans les tissus des deux espèces sont mesurées par analyse chimique ; divers paramètres physiologiques (taux de croissance et condition physiologique globale) sont également étudiés chez les bivalves. Les données ainsi obtenues avant le début des rejets liquides dans le milieu marin puis chaque année à la même période pendant toute la durée d'exploitation du complexe minier permettront d'évaluer quantitativement l'évolution des apports en métaux biodisponibles dans le milieu marin côtier sur le long terme.

Méthodologie

Le principe, les avantages, la mise au point et les aspects techniques de la méthode de transplantation sont présentés de manière détaillée dans le rapport [Breau *et al.*, 2009b](#) ; cette méthode suit en outre étroitement les recommandations formulées dans le protocole international standardisé [ASTM E2122-02](#).

Récolte et sélection des spécimens à transplanter

Les bivalves *Isognomon isognomon* Linnaeus et les macroalgues brunes *Lobophora variegata* (Lamouroux) Womersley ont été récoltés les 19 et 20 mai 2010 dans la Baie Maa, précédemment identifiée comme un site de référence pour l'étude de la plupart des métaux étudiés (Breau, 2003 ; Breau *et al.*, 2003).

Après tri et brossage des coquilles à l'aide d'une brosse, les bivalves (n = 394) ont été mis en dépuration pendant 48 h dans de l'eau de mer décantée (Aquarium des Lagons) afin d'éliminer les matières ingérées. Après dépuration, les spécimens ont été épongés et pesés (poids frais total de l'animal vivant) puis mesurés au dixième de millimètre à l'aide d'un pied à coulisse (longueur linéaire de la coquille à partir de la pointe de la charnière, près du byssus).

L'âge et la croissance des bivalves étant susceptibles d'exercer une influence sur les processus de bioaccumulation, une sélection des spécimens à transplanter a été réalisée d'après des critères biométriques, en particulier le poids frais total de l'animal vivant (Breau *et al.*, 2009b). Sur la base de l'étude de la structure biométrique de la population récoltée en Baie Maa puis de la campagne de transplantation réalisée en 2009 (Breau *et al.*, 2009c), une sélection des spécimens ayant un poids frais total compris entre 12 et 18 g a été réalisée. Neuf lots de quinze bivalves chacun ont ensuite été constitués par tirage aléatoire au sein des individus sélectionnés précédemment. Les poids frais moyens varient de $15,38 \pm 2,48$ g à $16,03 \pm 2,04$ g, soit une moyenne globale de $15,74 \pm 2,19$ g. Ces neuf lots ne présentent aucune différence significative de poids frais total ($p=0,983$, test de Kruskal-Wallis) (Figure 1). Les longueurs moyennes des coquilles varient de $70,7 \pm 5,3$ mm à $77,3 \pm 9,6$ mm, soit une moyenne globale de $73,8 \pm 8,8$ mm, et ne diffèrent pas significativement ($p=0,527$).

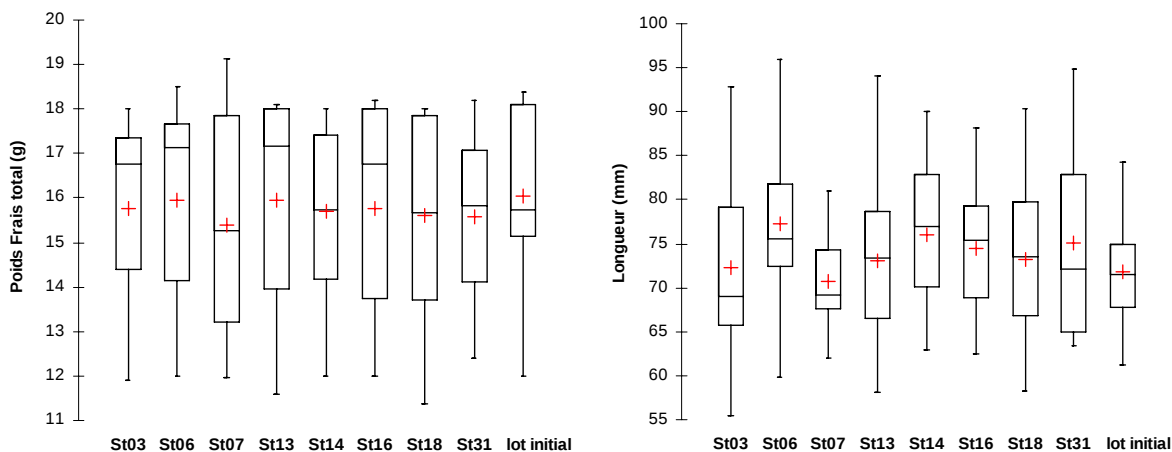


Figure 1 : Variabilité des poids frais moyens et des longueurs moyennes des neuf lots de bivalves *Isognomon isognomon* vivants sélectionnés pour l'étude. Les rectangles représentent la distribution de 50 % des spécimens ; à l'intérieur de ces « boîtes de Tuckey », la croix représente la moyenne des valeurs et le trait horizontal la médiane (valeur centrale du lot). Les traits verticaux entourant les boîtes représentent la distribution des autres spécimens.

Les algues *Lobophora variegata* récoltées ont été triées afin de sélectionner les frondes de taille supérieure à la maille des cages de transplantation. Celles-ci ont ensuite été brossées puis distribuées de façon à constituer neuf lots de vingt algues chacun. Contrairement aux bivalves, aucune mesure individuelle n'a été réalisée sur les algues.

Pour chacune des deux espèces, huit des neuf lots ont été transférés dans des glacières compartimentées remplies d'eau de mer jusqu'à leur immersion en cages dans les jours suivants ;

le neuvième lot a été congelé à -25°C dans l'attente de son traitement pour la détermination des concentrations initiales en métaux avant transplantation.

Immersion, contrôle et récupération des cages

Sept des huit stations de transplantation ont été sélectionnées parmi les quatorze stations du plan de suivi du milieu marin mentionnées dans la Convention Province Sud/Vale Inco NC (Tableau 1 et Figure 2). Suite à la réalisation de la première campagne de 2009 (Etat de référence), des propositions de déplacement de certaines stations, notamment St 05 (îlot Kié), St 07 (Récif Ioro), et St 14 (Baie de Goro) ont été formulées afin de soustraire les cages aux forts courants observés dans ces zones (Breau *et al.*, 2009c). En outre, la station St 16 (Port commercial) étant localisée dans la zone de manœuvres des navires, il a été proposé de la déplacer hors de cette zone. Ces propositions n'ayant à ce jour pas été intégrées officiellement dans le plan de suivi du milieu marin, sept des huit cages ont à nouveau été déployées sur les positions fixées par la Convention provinciale précédemment citée afin de rester en conformité avec celle-ci. En revanche, les courants trop puissants régnant à la station St 05 (îlot Kié) ayant entraîné une perte du dispositif de suivi et un risque non négligeable pour les plongeurs lors de la première campagne de 2009, cette station a été remplacée par une nouvelle station « St 31 » non référencée dans la Convention, créée sous le vent de l'îlot Nouaré, sur le bord sud-est du Canal de la Havannah (Figure 2). Cette station est supposée pouvoir être utilisée comme station de référence, ce que les résultats de la présente étude permettront d'établir.

La campagne d'immersion des cages a été réalisée les 25 et 26 mai 2010. A chaque station, un lot de bivalves et un lot d'algues, stockés dans les glacières compartimentées remplies d'eau de mer, ont été transférés dans une cage en plastique rigide surmontée d'un flotteur et reliée par un bout à une gueuse. Les cages ont été immergées entre 10 et 12,5 m de profondeur.

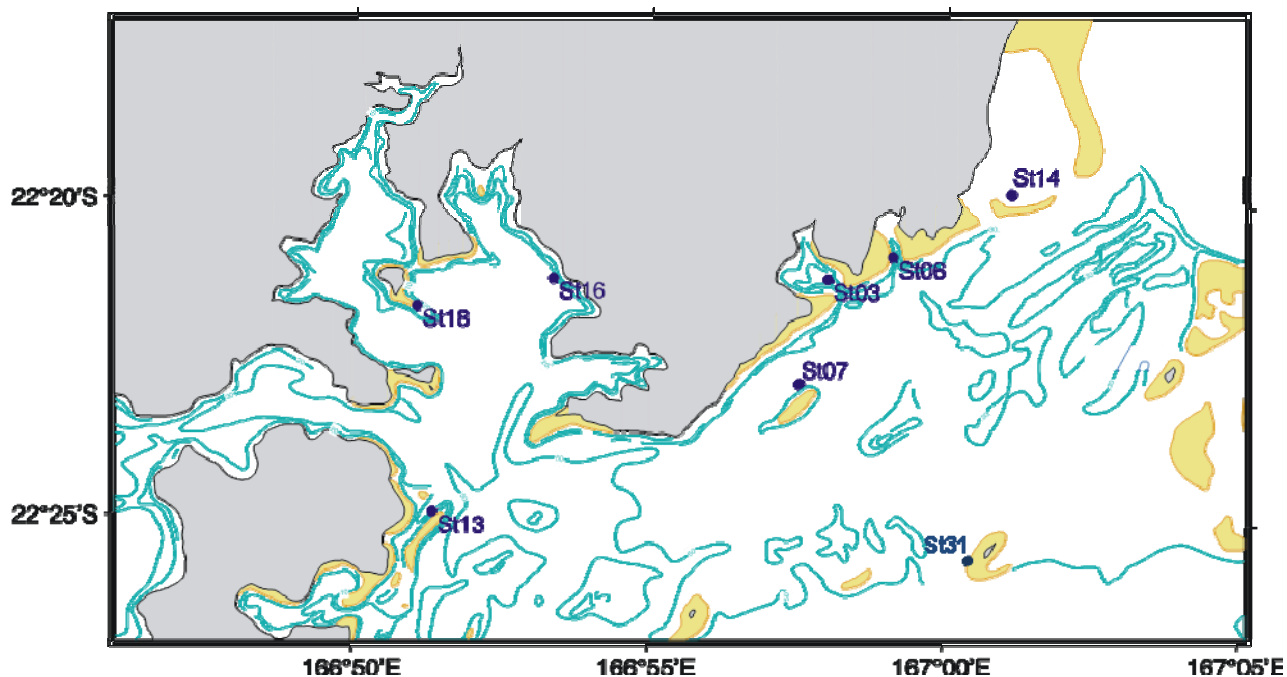


Figure 2 : Localisation géographique des huit stations de suivi écotoxicologique du milieu marin par transplantation d'espèces bioaccumulatrices.

Après un mois et demi d'immersion, les dispositifs de transplantation immergés à sept des huit stations (St 03, St 06, St 13, St 14, St 16, St 18 et St 31) ont été contrôlés en plongée puis brossés afin d'éliminer le biofouling déposé sur les cages et les flotteurs. En revanche la cage de la station St 07 (Ioro) n'a pas été retrouvée.

Tableau 1 : Description et localisation des stations de suivi écotoxicologique par transplantation d'espèces bioaccumulatrices.

Station	Localisation	Position GPS cage		Prof. (m)	Prof. Cage
St 03	Chenal de la Baie de Port Boisé	22°21,19	166°58,01	28,4	10,5
St 06	Chenal de la Baie Kwé	22°20,83	166°59,11	27,2	10,0
St 07	Récif Ioro (pointe nord)	22°22,83	166°57,90	38,5	12,5
St 13	Récif Ma (pointe nord), Ile Ouen	22°24,91	166°51,36	32,4	10
St 14	Baie de Goro	22°19,35	167°01,15	35,2	12,5
St 16	Port commercial de l'usine Vale NC	22°21,42	166°53,30	42,6	12,5
St 18	Îlot Casy (pointe du platier sud-est)	22°21,67	166°51,06	22,0	10,0
St 31	Îlot Nouaré (bord ouest)	22°25,46	167°00,45	35,0	11,5

Les 17 et 18 août 2010, soit après trois mois d'immersion, sept des huit dispositifs de transplantation ont été récupérés en plongée sous-marine. Seule la cage St 16 (Port commercial) a été retrouvée posée sur le fond, son flotteur ayant été coupé (vraisemblablement par une hélice de navire) ; la cage St 07 (Récif Ioro), située dans une zone de forts courants, n'a en revanche pas retrouvée.

Une fois les cages remontées à bord, les spécimens des deux espèces ont immédiatement été transférés et stockés dans des glacières compartimentées référencées contenant de l'eau de mer du site jusqu'à leur retour au laboratoire. Comme l'année précédente, une diminution parfois importante du nombre d'algues dans les cages en fin de transplantation a été notée sans que la raison précise ait pu être identifiée (mortalité et/ou broutage et passage des morceaux à travers les mailles des cages ?).

Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques régnant dans la zone pendant les trois mois d'immersion des cages, notamment la force et la direction des vents ainsi que les précipitations, sont susceptibles d'influer sur la nature et la quantité des apports en métaux à chaque station de suivi (lixiviation plus ou moins marquée des sols selon l'intensité des précipitations, puis variation de la dispersion des apports en mer selon la direction et la force des vents). La température de l'eau peut également influencer sur le métabolisme des organismes transplantés, donc potentiellement sur la croissance et la bioaccumulation des contaminants chimiques.

La pluviométrie est mesurée par la station météo de Vale NC, située à l'ancienne usine pilote en bordure de la baie de Prony. Les données de vents et de température sont obtenues grâce à la station météo d'AEL/IRD installée sur la balise du récif Ioro, dans le Canal de la Havannah.

Lors de la campagne de 2010, la pluviométrie totale sur toute la période d'immersion (du 25 mai au 18 août) était de 315 mm sur 85 jours de mesures disponibles. Plus d'un tiers de ce total (soit 123,4 mm) est tombé lors de la seule journée du 13 août (Figure 3). En 2009, la pluviométrie mesurée sur toute la période de transplantation (soit 83 jours de mesures effectives) était sensiblement inférieure, soit 245,4 mm (Figure 3).

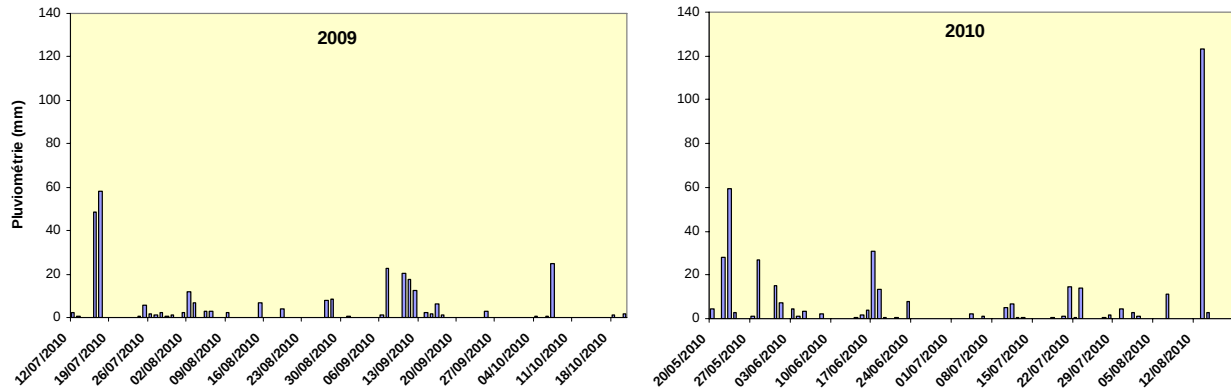


Figure 3 : Pluviométrie journalière mesurée au niveau de l'ancienne usine pilote de Goro Nickel pendant toute la durée des campagnes de transplantation 2009 et 2010.

La force des vents pendant les deux campagnes est généralement comprise entre 3 et 9 m/s, et peut ponctuellement atteindre 10 à 11 m/s en moyenne journalière (Figure 4). Les vents sont très majoritairement de secteur Sud à Est, et basculent occasionnellement à l'ouest, notamment en 2010 (Figure 4).

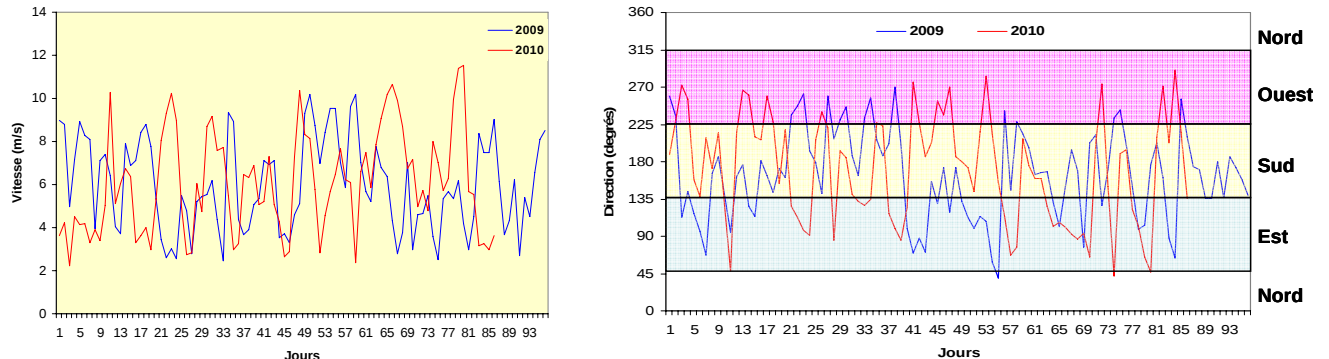


Figure 4 : Force (à gauche) et direction (à droite) des vents (moyennes journalières) mesurées en continu à la station de Ioro pendant toute la durée de transplantation.

Les températures de l'eau (mesurées au pied de la balise de Ioro) montrent en revanche une différence marquée entre les deux campagnes, les températures de 2010 étant nettement supérieures à celles de 2009 pendant la plus grande partie de la période d'immersion (Figure 5).

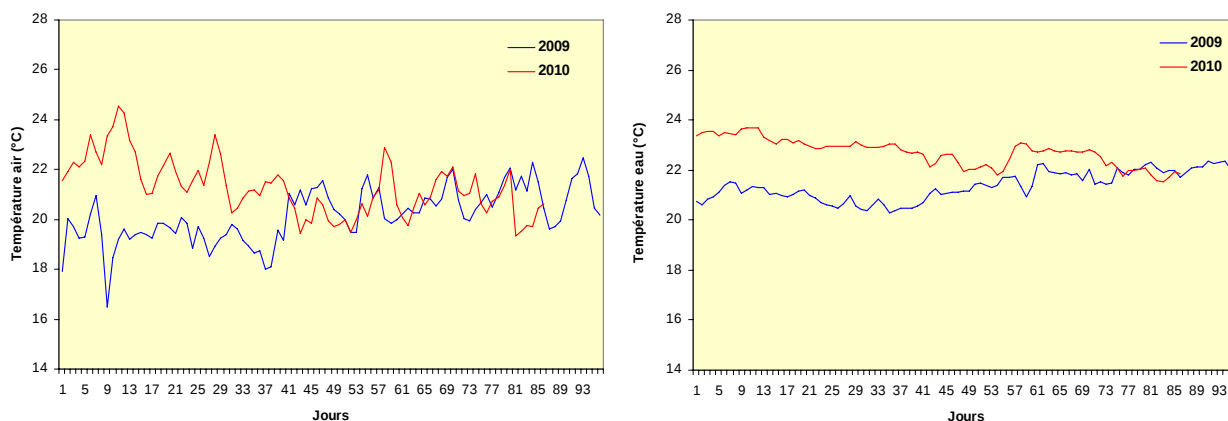


Figure 5 : Température de l'air (à gauche) et de l'eau (à droite) (moyennes journalières) mesurées en continu à la station de Ioro pendant toute la durée de transplantation.

Traitement et analyse des échantillons

Après récupération des cages, les bivalves transplantés ont été placés 48 h en dépuración puis brossés afin d'éliminer les matières ingérées ainsi que les sédiments et l'épibiose adhérents. Après dépuración, chaque spécimen a été mesuré au pied à coulisse, épongé et pesé pour l'obtention du poids frais total, puis disséqué. Les tissus mous ont été pesés pour l'obtention du poids frais des chairs, puis congelés, lyophilisés et repesés pour l'obtention du poids sec individuel. Les valves sèches ont également été pesées. A partir des variables biométriques obtenues, différents paramètres physiologiques ont été calculés :

- **la croissance relative et le taux de croissance journalière (TCJ) en longueur et en poids frais total :**

$$TCJ (\%) = ((\ln V_f - \ln V_i) \times 100) / (T_f - T_i)$$

Avec **Ln V** : logarithme népérien de la variable biométrique V (longueur ou poids frais total) mesurée à **Ti** (**Vi**) et à **Tf** (**Vf**) ; **Ti** : début de transplantation ; **Tf** : fin de transplantation.

- **L'indice de condition physiologique (IC) :**

Cet indice reflète l'importance du remplissage de l'intérieur de la coquille du bivalve par la chair, donc son l'état physiologique global ; celui-ci dépend principalement de la quantité et de la qualité de la nourriture phytoplanctonique disponible ainsi que des conditions physico-chimiques du milieu ambiant. Plusieurs auteurs ont proposé différentes formules pour le calcul de cet indice ; trois d'entre elles (les plus couramment utilisées) ont été retenues dans le cadre de cette étude : l'indice (**IC 1**) de [Lucas & Beninger \(1985\)](#), l'indice (**IC 2**) de [Lawrence & Scott \(1982\)](#), et l'indice AFNOR ou indice de qualité (**IC 3**) (norme AFNOR NF V45056, 1985) obtenus selon les formules suivantes :

$$IC\ 1 = (PS / PC) \times 1000$$

$$IC\ 2 = (PS / [PF\ tot - PS]) \times 1000$$

$$IC\ 3 = (PF\ chairs / PF\ tot) \times 100$$

avec : **PS** : poids sec des chairs entières lyophilisées ; **PC** : poids sec de la coquille ; **PF tot** : poids frais total de l'animal vivant ; **PF chairs** : poids frais des chairs.

L'étude de ces paramètres a pour but d'estimer l'état physiologique global des spécimens transplantés, lequel reflète en particulier les conditions trophiques ambiantes ainsi que l'état de maturité sexuelle. Des travaux conduits sur la moule *Mytilus galloprovincialis* transplantée dans

des zones de conditions trophiques hétérogènes en Méditerranée ont permis de mettre en évidence l'existence de relations de proportionnalité inverse entre l'indice de condition de Lucas et Beninger (1985) (IC1 dans notre étude) et les concentrations en métaux ([Andral et al., 2004](#)). Ces résultats suggèrent qu'un bivalve vivant dans de bonnes conditions trophiques bioaccumule moins de métaux qu'un bivalve soumis à des conditions trophiques moins favorables, ou bien que des concentrations en métaux significatives dans les tissus induisent une toxicité pouvant altérer cet état physiologique global. L'identification de telles relations chez *Isognomon isognomon* nécessite d'obtenir un nombre significatif de données au niveau géographique et temporel, d'où l'intérêt de cette étude.

Les chairs lyophilisées des quinze bivalves de chaque station ont été combinées trois par trois de manière aléatoire pour constituer cinq pools par station. Cette méthode du « pooling » permet de réduire significativement le nombre total d'échantillons à analyser.

De même, les algues ont été brossées et rincées à l'eau de mer, puis combinées pour former cinq lots par station. Les lots d'algues ont été congelés dans des sachets référencés puis lyophilisés.

Chaque lot de bivalves et d'algues a ensuite été minéralisé en conditions hyperbares (four micro-ondes) avec un mélange d'acide nitrique et de peroxyde d'hydrogène (qualité analytique) afin de solubiliser les métaux accumulés dans les tissus selon la méthode décrite dans [Breau \(2003\)](#) et [Breau et al. \(2009b\)](#). Un contrôle qualité des méthodes de minéralisation et d'analyse a été effectué en insérant du matériel biologique de référence certifié d'origine marine (TORT-2) entre les séries d'échantillons.

Les solutions obtenues ont été diluées puis analysées par ICP-OES (Varian, Modèle 730 ES) afin de déterminer les concentrations en As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn). La justesse obtenue avec ces séries d'échantillons est de 100 % pour As, 76 % pour Co, 92 % pour Cr, 81 % pour Cu, 88 % pour Fe, 85 % pour Mn, 102 % pour Ni et 100 % pour Zn. Les limites de détection moyennes suivantes ont été obtenues (en µg/g de poids sec) : As : 6,3 µg/g ; Co : 0,14 µg/g ; Cr : 0,05 µg/g ; Cu : 0,08 µg/g ; Fe : 1,2 µg/g ; Mn : 0,17 µg/g ; Ni : 1,3 µg/g ; Zn : 8,0 µg/g.

Résultats - Discussion

Croissance des bivalves transplantés

En fin d'expérience, les poids frais totaux moyens s'échelonnent entre $17,24 \pm 3,44$ g (station St 31-Nouaré) et $20,76 \pm 1,71$ g (station St 03-Port Boisé), soit une moyenne globale de $18,22 \pm 2,61$ g toutes stations confondues. A chacune des sept stations, le poids frais total moyen est supérieur à celui mesuré en début d'expérience (Figure 6A), soit une croissance moyenne relative allant de 9,6-9,8 % (St 06-Kwé et St 16-Port) à 31,7 % (St 03-Port Boisé) ; cette différence observée est statistiquement significative (test de Wilcoxon pour échantillons appariés, $p < 0,05$) pour toutes les stations à l'exception de St 06-Kwé ($p = 0,208$), St 16-Port ($p = 0,169$) et St 31-Nouaré ($p = 0,188$). Après trois mois de transplantation, les poids frais totaux présentent une différence significative ($p < 0,01$) entre les stations, due à la croissance nettement plus forte des bivalves de la station St 03-Port Boisé.

De même, les longueurs des coquilles ont sensiblement augmenté pendant la période de transplantation, pour atteindre $77,2 \pm 7,8$ mm (St 18-Casy) à $87,2 \pm 9,6$ mm (St 03-Port Boisé), soit une moyenne globale de $81,6 \pm 7,5$ mm (Figure 6B). Les croissances relatives moyennes sont de 4,0 et 5,4 % aux stations St 06-Kwé et St 18-Casy, respectivement, de 8,0 à 9,2 % aux stations St 31-Nouaré, St 16-Port et St 14-Goro, de 11,7 % à la station St 13-Ouen, et de 20,7 % à la station St 03-Port Boisé. Cette augmentation en longueur est significative (test pour échantillons appariés, $p < 0,05$) à toutes les stations sauf St 06-Kwé ($p = 0,151$), St 18-Casy ($p = 0,229$) et St 31-Nouaré ($p = 0,169$).

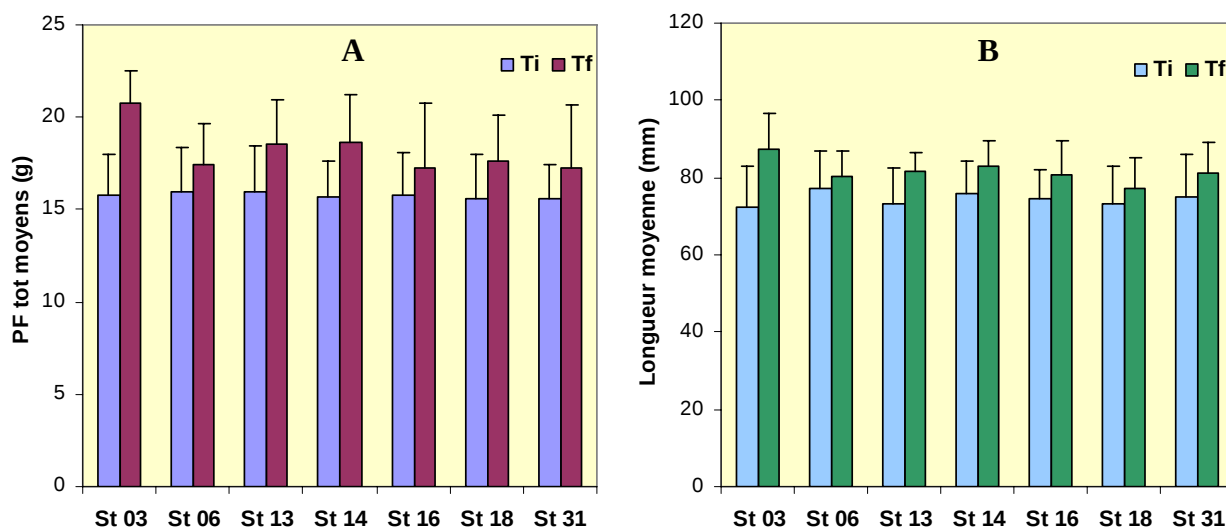


Figure 6 : Comparaison des poids frais totaux moyens (A) et des longueurs des coquilles (B) avant (Ti) et après (Tf) transplantation chez le bivalve *Isognomon isognomon* (n=15/station).

Les taux moyens de croissance journalière correspondants sont de 0,11 % (St 06-Kwé et St 16-Port usine), 0,12-0,14 % (St 31-Nouaré et St 18-Casy), 0,18-0,21 % (St 13-Ouen et St 14-Baie de Goro) et 0,33 % (St 03-Port Boisé) pour le poids frais total (Figure 7A). Pour la longueur des coquilles, les taux moyens de croissance journalière sont de 0,05-0,06 % pour St 06 et St 18, 0,09-0,10 % pour St 31, St 14 et St 16, de 0,13 % pour St 13, et de 0,22 % pour St 03 (Figure 7B).

Les taux de croissance journalière du poids frais total sont supérieurs à ceux obtenus lors de la première campagne de 2009 (Figure 7A) à toutes les stations sauf à la station St 16-Port, à laquelle une diminution d'environ 30 % est observée. En fin de transplantation, la cage de cette dernière station a été retrouvée posée au fond suite à la destruction de son flotteur ; la différence de croissance observée s'explique donc probablement par la diminution des apports trophiques (microalgues planctoniques) à 42 m de fond par rapport à ceux précédemment rencontrés à 16 m de profondeur (correspondant à la position de cage St 16 lors de la première campagne).

L'importance de l'augmentation des taux de croissance pondérale varie selon les stations et est de 20-25 % aux stations St 18-Casy et St 06-Kwé, de 92-103 % aux stations St 13-Ouen et St 14-Baie de Goro, et atteignent 279 % à la station St 03-Port Boisé. En ce qui concerne la longueur des coquilles, les taux de croissance obtenus en 2010 sont supérieurs de 21-26 % aux stations St 16 et St 14, de 35 % à St 13, et de 132 % à St 03 ; les taux ont en revanche diminué de 12 % à St 18, et de 37 % à St 06.

En l'absence actuelle de rejets industriels, ces différences reflètent la variabilité naturelle de la croissance de ces bivalves en relation avec les conditions du milieu. Parmi ces conditions, l'augmentation de la température de l'eau par rapport à celle mesurée lors de la campagne de 2009 pourrait en partie expliquer cette hausse de croissance.

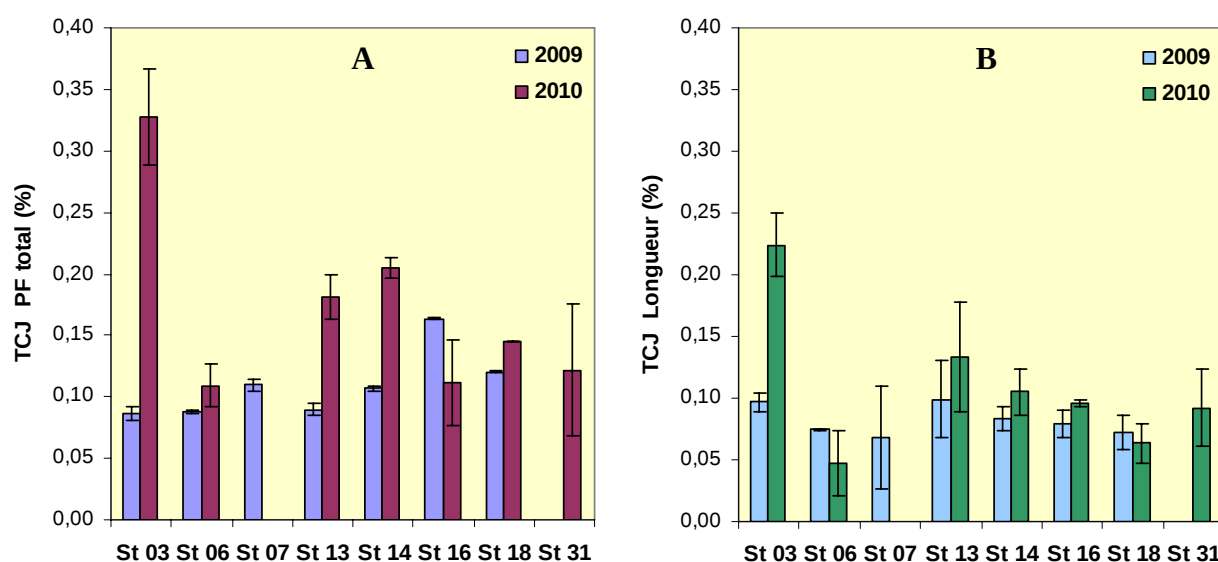


Figure 7 : Taux moyens de croissance journalière (en %, $\pm$ intervalle de confiance à 95 %) chez les bivalves transplantés (A : poids frais total ; B : longueur coquille) (n=15/station).

Condition physiologique des bivalves transplantés

Les différents indices de condition physiologique (IC) médians varient de 11,2 (St 03-Port Boisé) à 13,0 (St 18-Casy) pour IC1 (valeur médiane avant transplantation (Ti) : 12,9), de 41,5 (St 03-Port Boisé) à 51,1 (St 06-Kwé) pour IC2 (Ti : 45,8), et de 10,2 (St 06-Kwé) à 11,0 (St 03-Port Boisé) pour IC3 (Ti : 11,3) (Figure 8). Le classement des stations par ordre d'indice de condition diffère selon l'IC considéré et aucune tendance commune nette ne se dégage de l'étude comparative de ces trois indices.

Comme en 2009, la variabilité des IC entre stations est globalement peu marquée. Cette relative homogénéité des indices implique que si des relations de proportionnalité sont

ultérieurement mises en évidence entre certains IC et les concentrations en divers métaux chez *I. isognomon*, la correction des concentrations en métaux en prenant en compte un indice de condition standard (Andral *et al.*, 2004) affecterait peu les niveaux de concentrations en métaux présentés dans la suite de notre étude.

Pour IC1, la valeur médiane la plus basse s'observe à la station St 03-Port boisé et est significativement inférieure à la valeur initiale avant transplantation et à celles de la plupart des autres stations ($p=0,020$) hormis St 13 et St 14. Les IC1 des autres stations ne diffèrent en revanche pas statistiquement.

Pour IC2, la valeur médiane la plus faible (St 03) est significativement inférieure à la valeur initiale avant transplantation (Ti) ainsi qu'aux médianes des stations St 06, St 16 et St 31, tandis que la valeur maximale à St 06 est significativement supérieure aux médianes à Ti ainsi qu'aux autres stations, sauf St 16-Port usine. Les IC2 médians des autres stations ne diffèrent en revanche pas statistiquement de celle avant immersion et présentent des écarts peu marqués.

Pour IC3, les IC de l'ensemble des stations ne diffèrent pas significativement entre eux ($p=0,375$) et sont tous sensiblement inférieurs à la valeur initiale avant transplantation ; cette différence avec Ti n'est cependant significative qu'aux stations St 06-Kwé et St 13-Ouen.

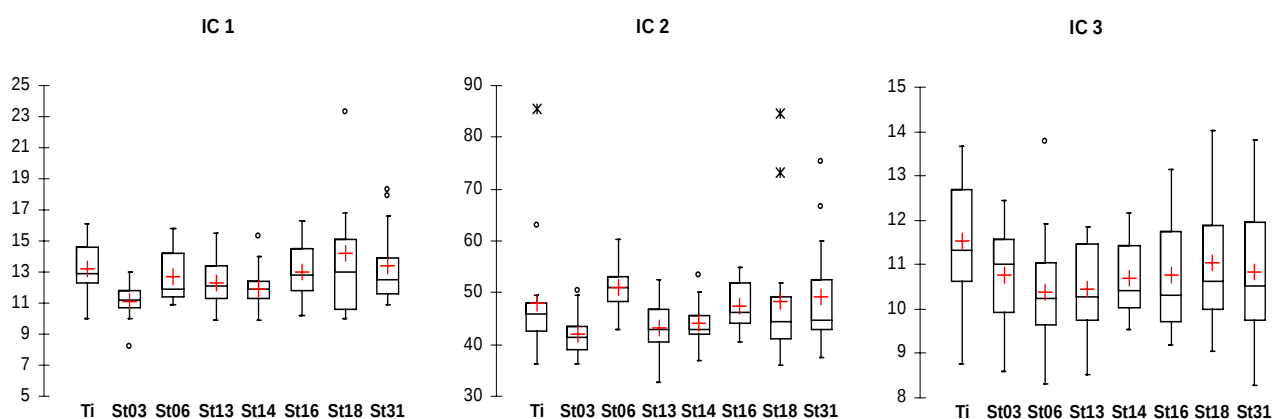


Figure 8 : Variabilité intra et interstations des trois indices de condition physiologique chez les bivalves sélectionnés ($n=15$ /station) (IC1 : indice de Lucas & Beninger (1985) ; IC2 : indice de Lawrence & Scott (1982) ; IC3 : indice AFNOR (norme AFNOR NF V45056)).

La comparaison de ces résultats avec les IC calculés lors de la précédente campagne de 2009 (Figure 9) indique que les IC moyens obtenus en 2010 sont globalement deux fois plus faibles pour IC1 et IC2, alors qu'ils sont quasiment similaires voire très légèrement supérieurs pour IC3.

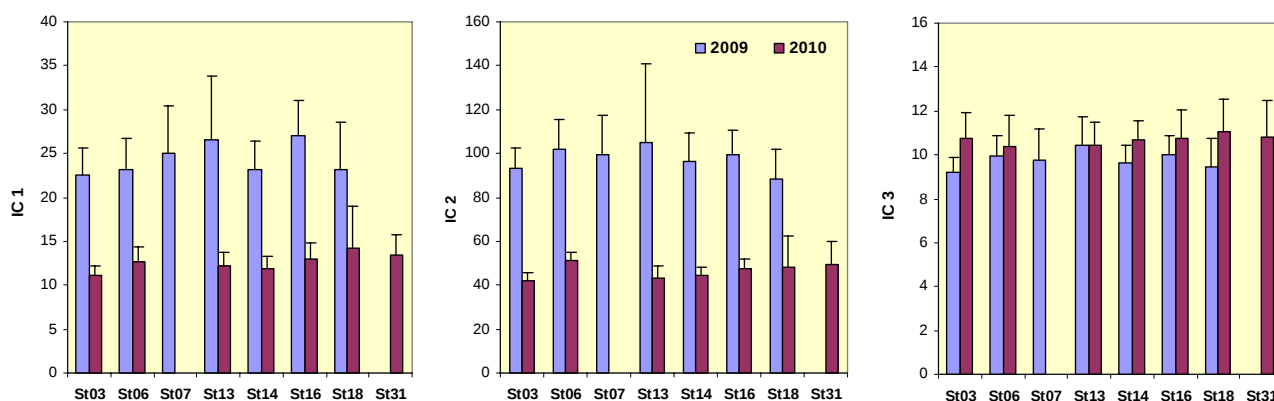


Figure 9 : Comparaison des indices de condition moyens ($\pm$ écart-type) chez les bivalves transplantés en 2009 ($n=20$ /station) et en 2010 ($n=15$ /station).

Concentrations en métaux dans les bivalves

Niveaux de concentration

La variabilité des concentrations en métaux mesurées dans les chairs entières des bivalves lors de la campagne de transplantation de 2010 est représentée à la [Figure 10](#).

- **Arsenic (As)** : les concentrations moyennes dans les bivalves transplantés s'échelonnent de $49,5 \pm 5,9 \mu\text{g/g}$ (St 03-Port Boisé) à $67,2 \pm 7,6 \mu\text{g/g}$ (St 31-Nouaré) ; cette dernière valeur est assez nettement supérieure à celles des autres stations. Les concentrations après transplantation sont toutes sensiblement supérieures à celle mesurée sur le lot initial avant immersion (Ti), mais la différence n'est statistiquement significative que pour St 16-Port usine et St 31-Nouaré ($p < 0,05$).
- **Cobalt (Co)** : la concentration moyenne minimale est mesurée à la station St 16-Port usine, soit $0,21 \pm 0,04 \mu\text{g/g}$; les concentrations maximales sont observées à la station St 31-Nouaré, soit $0,33 \pm 0,04 \mu\text{g/g}$, puis à la station St 06-Kwé, soit $0,31 \pm 0,03 \mu\text{g/g}$. Les concentrations aux stations St 03-Port boisé, St 06-Kwé, St 18-Casy et St 31-Nouaré après transplantation sont supérieures à celle mesurée avant transplantation mais cette différence n'est significative que pour St 06 et St 31. Les concentrations aux autres stations sont en revanche similaires à celle à Ti.
- **Chrome (Cr)** : la concentration moyenne minimale est mesurée à la station St 16-Port, soit $1,1 \pm 0,2 \mu\text{g/g}$, et la concentration moyenne maximale à la station St 31-Nouaré, soit $3,1 \pm 0,8 \mu\text{g/g}$. A l'exception de cette dernière station, les concentrations moyennes après transplantation sont toutes inférieures à celle initialement mesurée avant la mise en cage.
- **Cuivre (Cu)** : à l'exception de la station St 16-Port usine, les concentrations moyennes varient relativement peu entre les différentes stations et par rapport à la concentration initiale à Ti, avec des valeurs comprises entre $5,3 \pm 0,6 \mu\text{g/g}$ (St 06-Kwé et St 03-Port Boisé) et $6,8 \pm 0,8 \mu\text{g/g}$ (St 13-Ouen). La station St 16 montre en revanche une concentration moyenne environ deux fois supérieure à celles de toutes les autres stations et à celle à Ti (soit $13,0 \pm 0,5 \mu\text{g/g}$), indiquant la présence d'apports significatifs.
- **Fer (Fe)** : les concentrations moyennes mesurées après trois mois d'immersion sont généralement inférieures à celle du lot initial avant transplantation, et s'échelonnent de $110 \pm 16 \mu\text{g/g}$ (St 16-Port) à $183 \pm 29 \mu\text{g/g}$ (St 31-Nouaré).
- **Manganèse (Mn)** : les concentrations moyennes varient relativement peu entre les stations, avec des valeurs allant de $18,1 \pm 4,3 \mu\text{g/g}$ (St 13-Ouen) à $23,4 \pm 5,1 \mu\text{g/g}$ (St 03-Port Boisé et St 06-Kwé). Ces concentrations sont similaires ou légèrement supérieures à celle mesurée avant transplantation (Ti).
- **Nickel (Ni)** : la concentration moyenne la plus basse s'observe à la station St 16-Port, soit $1,3 \pm 0,2 \mu\text{g/g}$; la concentration moyenne la plus haute est mesurée à la station St 31-Nouaré, soit $2,7 \pm 0,5 \mu\text{g/g}$. Ces concentrations sont similaires ou même inférieures à celle obtenue à Ti.
- **Zinc (Zn)** : les concentrations moyennes varient de $551 \pm 89 \mu\text{g/g}$ (St 03-Port Boisé) à $693 \pm 22 \mu\text{g/g}$ (St 31-Nouaré) et ne diffèrent pas significativement de celle du lot initial avant transplantation.

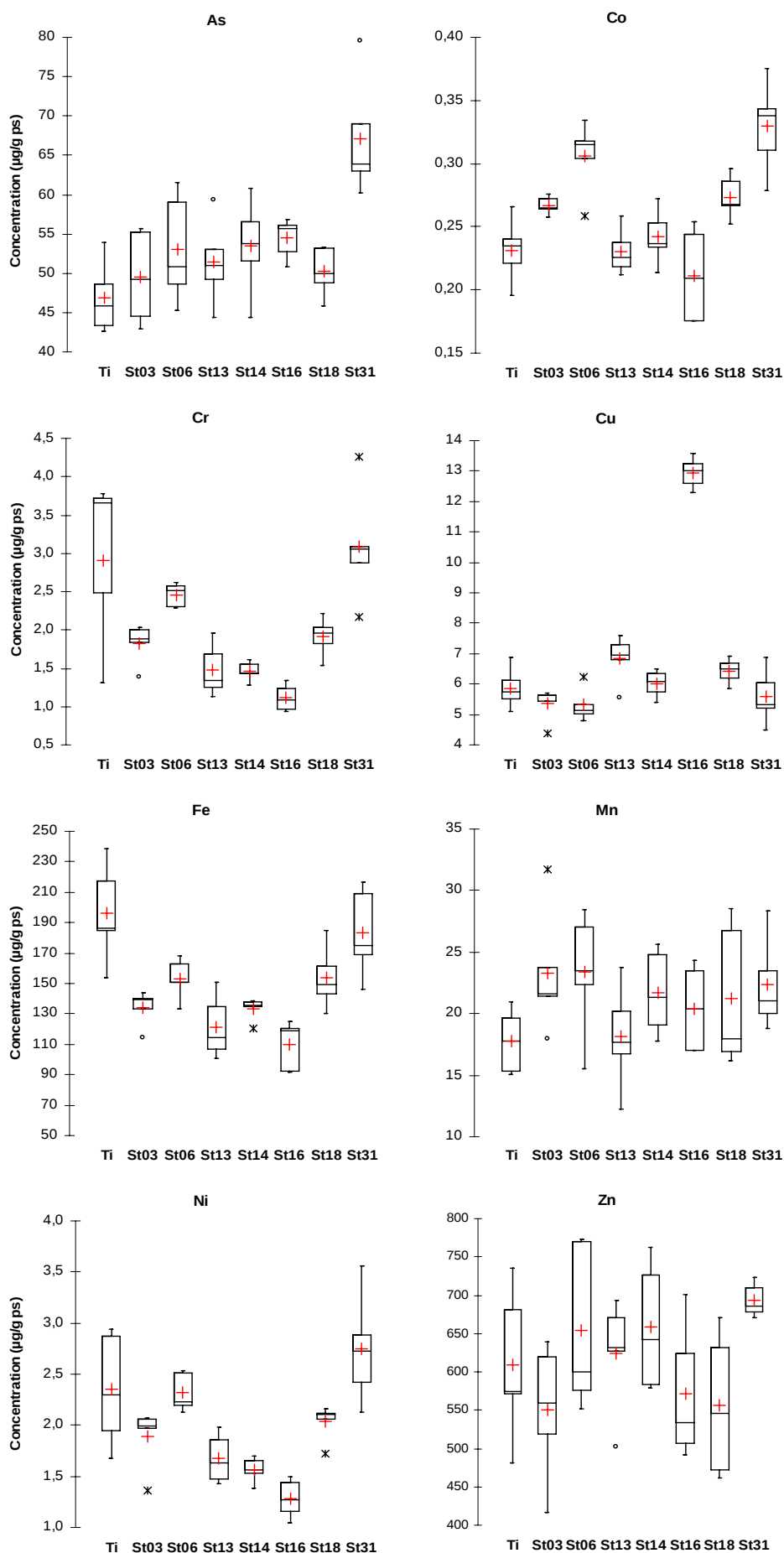


Figure 10 : Variabilité des concentrations en métaux (en $\mu\text{g/g}$ poids sec) chez le bivalve *Isognomon isognomon* lors de la campagne de transplantation de 2010 (n=5 pools/station).

Variabilité temporelle des concentrations

Les concentrations de chaque métal mesurées sur l'ensemble des stations ont été comparées à celles précédemment obtenues suite à la première campagne de 2009 (Figure 11). Globalement, les concentrations mesurées en 2010 sont inférieures à celles de la première campagne, à quelques exceptions près ; cette diminution est plus ou moins marquée selon le métal considéré :

- **Pour As**, cette diminution est négligeable et les concentrations de 2010 sont donc considérées comme similaires à celles de 2009.
- **Pour Co**, une diminution de 25 % (St 06-Kwé) à 42-43 % (St 03-Port Boisé et St 14-Baie de Goro) apparaît entre les deux campagnes, sauf à la station St 18-Casy, où les concentrations de 2009 et 2010 sont relativement similaires.
- **Pour Cr**, une diminution de 34 % de la concentration moyenne s'observe aux stations St 03-Port Boisé, St 13-Ouen et St 14-Baie de Goro ; la station St 16-Port usine montre une diminution encore plus marquée, soit 61 %. En revanche, les concentrations moyennes mesurées lors des deux campagnes sont quasiment similaires pour les stations St 06-Kwé et St 18-Casy.
- **Pour Cu**, la diminution est marquée à toutes les stations (de 28 % à la station St 16-Port à 61 % aux stations St 03-Port Boisé et St 18-Casy). Le pic de concentration mesuré en 2009 à la station St 16-Port se retrouve également en 2010.
- **Pour Fe**, la diminution des teneurs varie de 14 et 19 % aux stations St 06-Kwé et St 18-Casy, de 26-31 % aux stations St 13-Ouen, St 14-Goro et St 03-Port Boisé, et de 42 % au niveau du port de l'usine (St 16).
- **Pour Mn**, les concentrations moyennes de 2009 et de 2010 sont similaires aux stations St 03, St 06, St 13 et St 14. En revanche, une diminution de 35 % des teneurs en Mn est observée à la station St 18-Casy ; la station St 16-Port usine montre une diminution plus marquée (59 %), le pic observé en 2009 n'ayant pas été retrouvé en 2010.
- **Pour Ni**, les concentrations mesurées à la station St 06-Kwé sont relativement proches entre les deux campagnes, avec une légère diminution de 17 % en 2010. Pour les autres stations, une diminution marquée (de 42 % à la station St 03-Port Boisé à 68 % à la station St 16-Port usine) s'observe lors de la seconde campagne.
- **Pour Zn**, la campagne de 2010 révèle une diminution de 14 % (St 06-Kwé) à 38-40 % (St 03-Port Boisé et St 18-Casy) des concentrations moyennes en zinc aux différentes stations.

La diminution de concentration observée pour certains métaux pourrait être liée aux différences d'état physiologique (taux de croissance et indice de condition) évoquées précédemment chez les bivalves transplantés en 2010 par rapport à ceux de 2009.

L'étude comparative des concentrations en métaux chez les algues entre 2009 et 2010 permettra de préciser si ces facteurs biologiques sont en jeu ou si cette diminution est due à une réelle décroissance des concentrations dans le milieu ambiant.

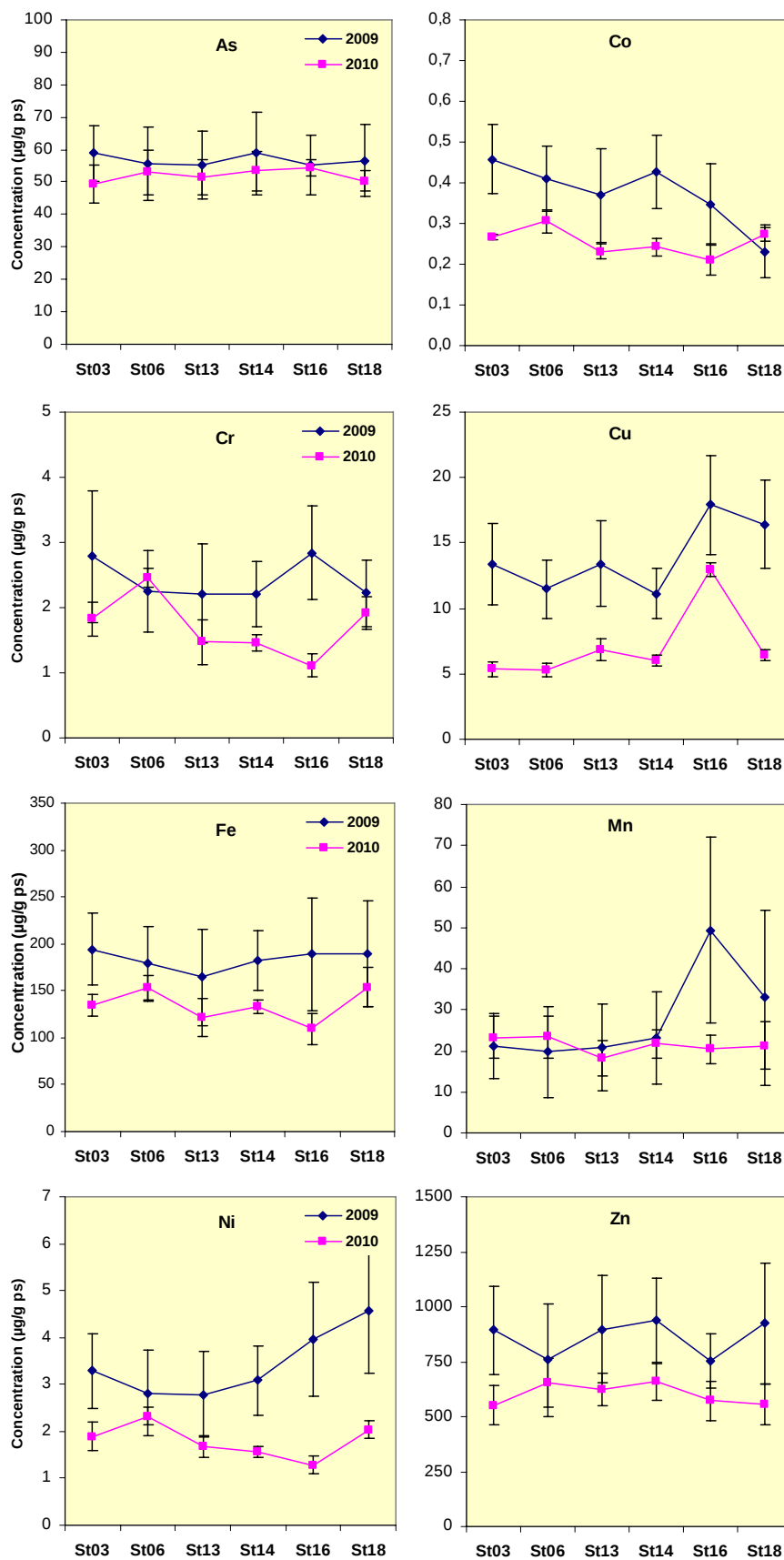


Figure 11 : Evolution temporelle (interannuelle) des concentrations moyennes (± écart-type) des métaux chez les bivalves transplantés aux différentes stations en 2009 (n=20/station) et en 2010 (n=5 pools/station).

Concentrations en métaux dans les algues

Niveaux de concentration

La variabilité des concentrations en métaux mesurées dans les frondes des macroalgues brunes lors de la campagne de transplantation de 2010 est représentée à la [Figure 12](#). Les données n'ont pas pu être obtenues pour les stations St 06-Kwé et St 18-Casy (mortalité et disparition quasi totale des algues dans les cages) ni pour la station St 07-Ioro (cage non retrouvée).

- **As** : les concentrations moyennes en métaux mesurées dans les frondes des macroalgues transplantées varient de $34,6 \pm 5,9 \mu\text{g/g}$ (St 13-Ouen) à $42,7 \pm 2,2 \mu\text{g/g}$ (St 03-Port Boisé) et sont significativement supérieures à celle du lot initial avant transplantation.
- **Co** : les concentrations moyennes sont comprises entre $1,9 \pm 0,4 \mu\text{g/g}$ (St 13-Ouen et St 14-Baie de Goro) et $3,0 \pm 0,3 \mu\text{g/g}$ (St 03-Port Boisé). Ces valeurs sont toutes supérieures à celle mesurée à Ti.
- **Cr** : les concentrations moyennes des algues transplantées s'échelonnent de $3,6 \pm 0,7 \mu\text{g/g}$ (St 14-Baie de Goro) à $8,9 \pm 2,2 \mu\text{g/g}$ (St 03-Port Boisé) et $11,1 \pm 3,8 \mu\text{g/g}$ (St 31-Nouaré) et sont supérieures à celle mesurée avant l'immersion des cages.
- **Cu** : les concentrations moyennes varient de $2,7 \pm 0,6 \mu\text{g/g}$ (St 03-Port Boisé) à $5,2 \pm 0,8 \mu\text{g/g}$ (St 31-Nouaré), puis à $14,9 \pm 2,5 \mu\text{g/g}$ à la station St 16-Port usine. A l'exception de cette dernière valeur, les concentrations après transplantation sont proches de celle avant immersion.
- **Fe** : les concentrations moyennes vont de $202 \pm 50 \mu\text{g/g}$ (St 13-Ouen) à $508 \pm 145 \mu\text{g/g}$ (St 31-Nouaré). Seule cette dernière valeur est supérieure à la concentration initiale avant transplantation ; la concentration moyenne en St 03-Port Boisé est similaire à celle à Ti, tandis que les valeurs moyennes aux stations St 13-Ouen et St 14-Baie de Goro sont significativement inférieures à la concentration moyenne avant immersion.
- **Mn** : les concentrations moyennes s'échelonnent de $15,7 \pm 3,3 \mu\text{g/g}$ (St 16-Port usine et St 14-Baie de Goro) à $27,5 \pm 5,0 \mu\text{g/g}$ (St 03-Port Boisé). Les concentrations moyennes mesurées dans les algues transplantées sont toutes inférieures à celle du lot initial avant immersion.
- **Ni** : les concentrations moyennes varient de $3,5 \pm 0,8 \mu\text{g/g}$ (St 13-Ouen) à $8,4 \pm 2,4 \mu\text{g/g}$ (St 31-Nouaré) et sont similaires (St 13 et St 14) ou supérieures (St 03, St 16 et St 31) à la concentration à Ti.
- **Zn** : les concentrations moyennes s'échelonnent entre $8,2 \pm 1,1 \mu\text{g/g}$ (St 31-Nouaré) et $21,3 \pm 7,0 \mu\text{g/g}$ (St 14-Baie de Goro). Toutes les concentrations mesurées après transplantation sont supérieures à celle avant immersion.

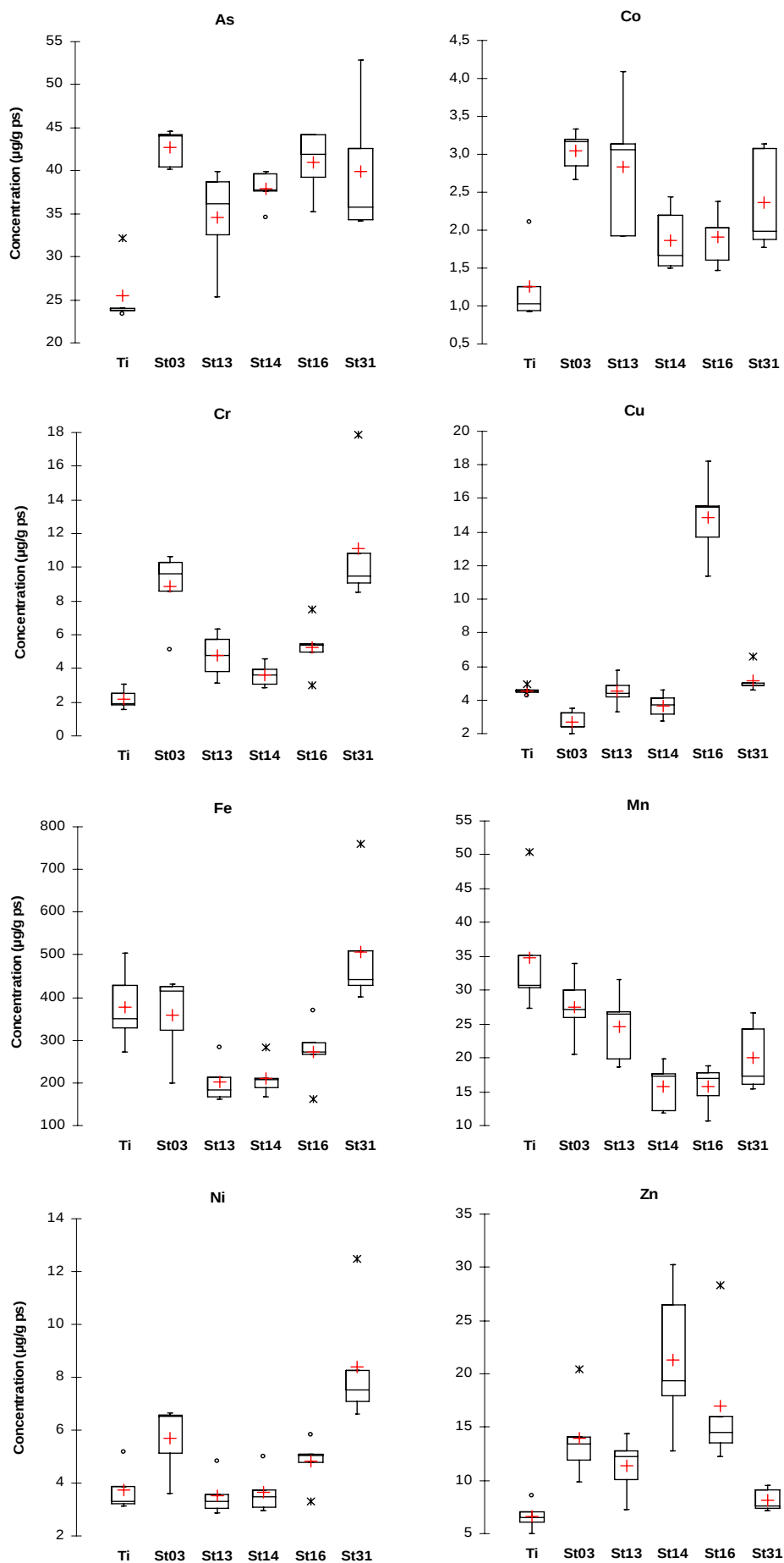


Figure 12 : Variabilité des concentrations en métaux (en $\mu\text{g/g}$ poids sec) chez la macroalgue brune *Lobophora variegata* lors de la campagne de transplantation de 2010 (n=5 pools/station).

Variabilité temporelle des concentrations

Les concentrations mesurées dans les frondes macroalgales ont été comparées entre les deux campagnes à chaque station pour lesquelles des données sont disponibles pour ces deux périodes (Figure 13). Comme chez les bivalves, les concentrations mesurées lors de la campagne de 2010 sont dans la plupart des cas inférieures à celles obtenues en 2009, à l'exception notable du zinc. Ces variations interannuelles sont étudiées pour chaque métal :

- **Pour As**, aucune diminution significative n'est observable. A l'exception de la station St 16-Port usine, à laquelle la concentration moyenne en 2010 est supérieure à celle de 2009, les concentrations obtenues lors des deux campagnes sont quasi similaires.
- **Pour Co**, une légère diminution des concentrations apparaît aux stations St 13-Ouen et St 16-Port usine ; cette diminution est un peu plus marquée à la station St 14-Baie de Goro, et l'est davantage encore à la station St 03-Port Boisé.
- **Pour Cr**, les concentrations mesurées aux stations St 13-Ouen, St 14-Baie de Goro et dans une moindre mesure St 03-Port Boisé sont identiques entre les deux campagnes ; en 2010, on note cependant une diminution de la concentration moyenne à la station St 16-Port usine.
- **Pour Cu**, les concentrations moyennes en 2010 sont nettement inférieures à celles de 2009 aux stations St 03-Port boisé, St 13-Ouen et St 14-Goro ; les concentrations moyennes des deux campagnes sont en revanche très proches à la station St 16-Port usine.
- **Pour Fe**, la tendance observée est similaire à celle du chrome, avec des concentrations moyennes similaires ou proches aux stations St 13, St 14 et St 03, et une diminution à la station St 16.
- **Pour Mn**, aucune différence de concentration moyenne n'apparaît à la station St 16-Port usine ; une diminution de plus en plus marquée s'observe en revanche en 2010 aux stations St 14-Goro, St 13-Ouen et St 03-Port Boisé, respectivement.
- **Pour Ni**, l'évolution des concentrations moyennes suit une tendance similaire à celles du chrome et du fer.
- **Pour Zn**, une tendance opposée à celle de tous les autres métaux s'observe à chacune des stations ; celle-ci se caractérise par une augmentation significative des concentrations moyennes aux quatre stations pour lesquelles des données communes sont disponibles.

Cette étude comparative chez les algues transplantées révèle des tendances relativement proches de celles précédemment observées chez les bivalves (à l'exception toutefois du manganèse et du zinc), et permet donc d'établir que la diminution globale de la plupart des concentrations chez *Isognomon* correspond bien à une décroissance temporelle des concentrations dans le milieu ambiant plutôt qu'à un effet lié à la variabilité des paramètres physiologiques.

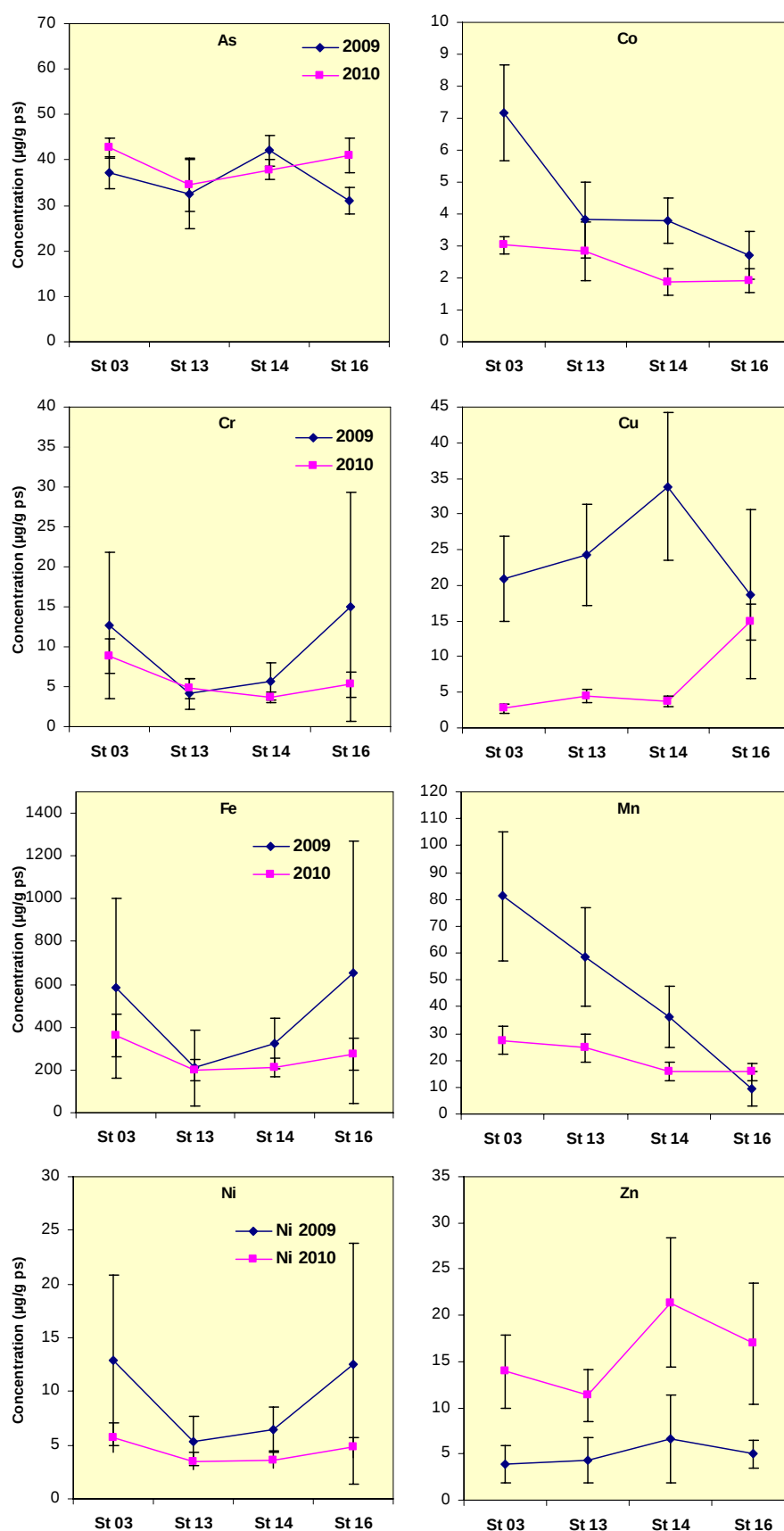


Figure 13 : Evolution temporelle (interannuelle) des concentrations moyennes ($\pm$ écart-type) en métaux chez les algues transplantées aux différentes stations en 2009 (n=20) et en 2010 (n=5 pools/station).

Conclusion

Cette seconde campagne de transplantation de bioindicateurs quantitatifs dans la zone d'influence potentielle du complexe minier confirme que les conditions environnementales naturelles rencontrées au niveau des stations du suivi écotoxicologique sont favorables à la vie et à la croissance des bivalves *Isognomon isognomon* transplantés. En revanche, une perte du nombre de macroalgues introduites dans les cages a été une nouvelle fois constatée après les trois mois de transplantation, vraisemblablement consécutive à une mortalité ou un broutage par de petits poissons pouvant passer à travers les mailles des cages.

L'importance de la croissance des bivalves transplantés varie cependant entre les stations, avec une augmentation relative du poids frais total allant de 10 à 32 % et une croissance en longueur comprise entre 4,0 et 21 % sur l'ensemble des stations. Les croissances maximales lors de cette campagne 2010 ont été mesurées aux stations St 03-Port Boisé, puis St 13-Ouen et St 14-Baie de Goro ; la comparaison des taux de croissance journalière correspondants avec ceux précédemment obtenus en 2009 indique que les vitesses de croissance pondérale à ces trois stations sont généralement supérieures à celles obtenues lors de la première campagne ; une nette augmentation de la température de l'eau en 2010 pendant la période d'immersion par rapport à la première campagne de 2009 pourrait expliquer en partie cette hausse de croissance.

L'étude des indices de condition physiologique des bivalves transplantés confirme que la variabilité des trois indices est globalement peu marquée entre les stations, comme en 2009, ce qui suggère une relative homogénéité des conditions trophiques entre les diverses stations de suivi. Les indices IC1 et IC2 calculés lors de cette seconde campagne sont cependant environ deux fois inférieurs à ceux de 2009 aux mêmes stations ; en revanche, les IC3 (indice AFNOR) sont similaires voire légèrement supérieurs à ceux de la première campagne. Bien que ces résultats ne soient pas directement exploitables actuellement, leur suivi interannuel s'avère nécessaire pour mieux comprendre les éventuelles relations entre l'état physiologique, les concentrations tissulaires en métaux et une possible toxicité chez cette espèce.

Les concentrations en métaux dans les tissus des bioindicateurs utilisés varient selon l'élément et l'espèce considérés. Dans les chairs entières des bivalves *Isognomon isognomon* après transplantation, les métaux les plus bioaccumulés (quelle que soit la station) sont le zinc (concentrations des pools allant de 417 à 773 µg/g de poids sec) et le fer (de 91 à 217 µg/g). Viennent ensuite l'arsenic (43 à 80 µg/g), le manganèse (12 à 32 µg/g), le cuivre (4 à 14 µg/g), le nickel et le chrome (1 à 4 µg/g), et enfin le cobalt (0,2 à 0,4 µg/g). Chez les algues *Lobophora variegata*, le fer est le métal le plus accumulé (162 à 758 µg/g), puis l'arsenic (25 à 53 µg/g), le manganèse (11 à 34 µg/g) et le zinc (7 à 30 µg/g), puis le cuivre et le chrome (2 à 18 µg/g), le nickel (3 à 13 µg/g) et le cobalt (1,5 à 4,1 µg/g).

Les concentrations en métaux bioaccumulés varient également selon la station. Chez les bivalves, la station St 31-Nouaré (pourtant initialement choisie comme une station de référence alternative à la station St 05-Kié) montre les concentrations en As, Co, Cr, Fe, Ni et Zn les plus fortes. Cette tendance se retrouve également chez les algues pour Cr, Fe et Ni uniquement. Sur la base de ces résultats, cette station ne peut donc pas être utilisée comme une station de référence océanique.

Les concentrations de la plupart de ces métaux mesurées chez les bivalves à la station St 06 (située dans l'estuaire de la Kwé, donc soumise à des apports terrigène fluviaux) sont également parmi les plus élevées pour cette campagne. Aucune donnée n'est cependant disponible pour les algues à cette station suite à la forte mortalité observée. Les concentrations

en As, Co, Cr, Fe, Mn et Ni mesurées chez les *Lobophora* à la station St 03 (située dans la baie estuarienne de Port Boisé) sont également parmi les plus élevées chez les algues. Comparativement aux autres stations, les concentrations en zinc mesurées dans les deux espèces à la station St 14-Baie de Goro sont assez élevées.

La station St 16-Port se caractérise par ses concentrations en cuivre nettement plus fortes chez les deux espèces par rapport aux autres stations. Ces fortes concentrations sont très probablement dues à une contamination provenant des anti-fouling recouvrant les coques de certains navires (en remplacement du TBT) et/ou de certaines activités portuaires. Les premiers éléments de modélisation obtenus dans le cadre d'un récent programme de recherche conduit par l'équipe à l'IRD (Convention IRD/Vale Inco NC n°1124) ont révélé que le renouvellement des masses d'eau est relativement faible dans cette zone littorale enclavée : les apports en cuivre au niveau du port sont donc faiblement dispersés et enrichissent progressivement la masse d'eau. L'amélioration du modèle (par réduction de la taille de la maille dans la Rade du Nord) envisagée par notre équipe permettrait d'évaluer avec plus de précision le temps de résidence des masses d'eau dans la zone portuaire.

L'étude comparative des concentrations en métaux mesurées lors des deux campagnes de 2009 et de 2010 chez les deux espèces révèle une diminution globale des concentrations moyennes de la plupart des métaux en 2010. Selon les métaux, cette diminution ne s'observe cependant pas à toutes les stations et est plus ou moins marquée selon la station et l'espèce considérée. Cette tendance étant observée chez les deux espèces, ces résultats semblent refléter une réelle diminution des concentrations dans le milieu ambiant plutôt qu'un éventuel effet lié à la variabilité physiologique observée chez les bivalves entre 2009 et 2010. Pour l'arsenic en revanche, aucune différence significative de concentration n'est observée chez les deux espèces quelle que soit la station, sauf chez les algues à la station St 16-Port. En outre, une tendance inverse s'observe pour le zinc, dont les concentrations chez les algues transplantées en 2010 sont supérieures à celles de la campagne de 2009.

Cette seconde campagne de transplantation a été réalisée avant le début des rejets liquides du complexe industriel dans le milieu marin. Celle-ci peut donc être considérée comme une deuxième caractérisation de l'état initial écotoxicologique du milieu marin consécutive à la campagne de 2009. La variabilité des résultats relatifs à la croissance, à la condition physiologique et aux concentrations des divers métaux dans les tissus des deux espèces obtenus entre ces deux campagnes reflète donc en partie la variabilité naturelle de ces variables ou paramètres en fonction des conditions environnementales ambiantes. Cette meilleure connaissance de la variabilité naturelle permettra de mieux comprendre et interpréter les résultats du futur suivi environnemental réalisé selon cette méthodologie.

Les fortes concentrations mesurées à la station St 31-Nouaré, la destruction du flotteur de la cage St 16-Port ainsi que la perte de la cage de la station St 07-Ioro lors de cette seconde campagne confortent nos propositions de relocalisation de ces stations mentionnées dans le rapport relatif à la première campagne (Breau *et al.*, 2009c).

Remerciements

Cette étude n'aurait pas été possible sans l'aide d'intervenants extérieurs pour la réalisation des opérations de terrain. Un grand merci, donc, à Jérémy Simonnot et Claude Mathieu pour leurs interventions en plongée sous-marine dans des conditions parfois difficiles, ainsi qu'à Sandy Morano pour la précision de son pilotage permettant de se positionner sur les stations de transplantation malgré les conditions de houle et de vent.

Références bibliographiques

- Andral B, Stanisière JY, Sauzade D, Damier E, Thébault H, Galgani F, Boissery P, 2004.** Monitoring chemical contamination levels in the Mediterranean based on the use of mussel caging. *Marine Pollution Bulletin*, 49:704-712.
- ASTM, 2002.** E2122-02 : Standard Guide for conducting *in-situ* field bioassays with caged bivalves. *American Society for Testing and Material – International*, West Conshohocken, PA, United States, 30 p.
- Boyden C.R., 1977.** Effect of size upon metal content of shellfish. *Journal of Marine Biology Assessment* UK, 57 : 675-714.
- Breau L., 2003.** Etude de la bioaccumulation des métaux dans quelques espèces marines tropicales : Recherche de bioindicateurs de contamination et application à la surveillance de l'environnement côtier dans le lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie. *Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle*, Spécialité « Océanologie Biologique et Environnement Marin », La Rochelle, France, 318 p. + Annexes.
- Breau L., Miramand P., Fichez R., 2003.** Identification of two tropical bivalves (*Isognomon isognomon* and *Gafrarium tumidum*) as potential biomonitors of metal contamination in the SW lagoon of New Caledonia. In: G. Richard (Editeur), *III^{ème} Congrès des Sociétés Européennes de Malacologie*, Les Mollusques dans la Recherche actuelle, La Rochelle, 24-27 juin 2003, p. 46.
- Breau L., Moreton B., Gérard P., 2009b.** Evaluation des apports en métaux dans l'environnement marin tropical par transplantation d'organismes bioaccumulateurs. *Rapport Final du Volet 2 « Ecotoxicologie », 2^{ème} Partie, Programme « Etude sur le comportement, la dispersion et les effets biologiques des effluents industriels dans le lagon sud de la Nouvelle Calédonie, Convention de Recherche IRD/Goro Nickel n°1124, 17/08/09, IRD-Nouméa*, 60 p.
- Breau L., Goyaud A., Legrand H., Moreton B., 2009c.** Etat de Référence de la Zone Sud du Lagon de Nouvelle-Calédonie : Détermination de la qualité écotoxicologique initiale des eaux par transplantation d'espèces bioindicatrices (Bioaccumulation). *Rapport de la Convention de Recherche IRD/Vale Inco NC n°2535, 01/12/2009, IRD-Nouméa*, 30 p.
- Lawrence D.R., Scott G.I., 1982.** The determination and use of condition index of oysters. *Estuaries*, 5: 23-27.
- Lucas A., Beninger P.G., 1985.** The use of physiological condition indices in marine bivalve aquaculture. *Aquaculture*, 44: 187-200.

Liste des figures

Figure 1 : Variabilité des poids frais moyens et des longueurs moyennes des neufs lots de bivalves <i>Isognomon isognomon</i> vivants sélectionnés pour l'étude. Les rectangles représentent la distribution de 50 % des spécimens ; à l'intérieur de ces « boîtes de Tuckey », la croix représente la moyenne des valeurs et le trait horizontal la médiane (valeur centrale du lot). Les traits verticaux entourant les boîtes représentent la distribution des autres spécimens.	10 -
Figure 2 : Localisation géographique des huit stations de suivi écotoxicologique du milieu marin par transplantation d'espèces bioaccumulatrices.....	11 -
Figure 3 : Pluviométrie journalière mesurée au niveau de l'ancienne usine pilote de Goro Nickel pendant toute la durée des campagnes de transplantation 2009 et 2010.	13 -
Figure 4 : Force (à gauche) et direction (à droite) des vents (moyennes journalières) mesurées en continu à la station de Ioro pendant toute la durée de transplantation.	13 -
Figure 5 : Température de l'air (à gauche) et de l'eau (à droite) (moyennes journalières) mesurées en continu à la station de Ioro pendant toute la durée de transplantation.....	14 -
Figure 6 : Comparaison des poids frais totaux moyens (A) et des longueurs des coquilles (B) avant (Ti) et après (Tf) transplantation chez le bivalve <i>Isognomon isognomon</i> (n=15/station).....	16 -
Figure 7 : Taux moyens de croissance journalière (en %, $\pm$ intervalle de confiance à 95 %) chez les bivalves transplantés (A : poids frais total ; B : longueur coquille) (n=15/station).....	17 -
Figure 8 : Variabilité intra et interstations des trois indices de condition physiologique chez les bivalves sélectionnés (n=15/station) (IC1 : indice de Lucas & Beninger (1985) ; IC2 : indice de Lawrence & Scott (1982) ; IC3 : indice AFNOR (norme AFNOR NF V45056)).....	18 -
Figure 9 : Comparaison des indices de condition moyens ($\pm$ écart-type) chez les bivalves transplantés en 2009 (n=20/station) et en 2010 (n=15/station).	18 -
Figure 10 : Variabilité des concentrations en métaux (en $\mu\text{g/g}$ poids sec) chez le bivalve <i>Isognomon isognomon</i> lors de la campagne de transplantation de 2010 (n=5 pools/station).	20 -
Figure 11 : Evolution temporelle (interannuelle) des concentrations moyennes ($\pm$ écart-type) des métaux chez les bivalves transplantés aux différentes stations en 2009 (n=20/station) et en 2010 (n=5 pools/station).	22 -
Figure 12 : Variabilité des concentrations en métaux (en $\mu\text{g/g}$ poids sec) chez la macroalgue brune <i>Lobophora variegata</i> lors de la campagne de transplantation de 2010 (n=5 pools/station).....	24 -
Figure 13 : Evolution temporelle (interannuelle) des concentrations moyennes ($\pm$ écart-type) en métaux chez les algues transplantées aux différentes stations en 2009 (n=20) et en 2010 (n=5 pools/station).....	26 -

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description et localisation des stations de suivi écotoxicologique par transplantation d'espèces bioaccumulatrices.	12 -
---	------

Annexes

ANNEXE 1 : Biométrie des bivalves *Isognomon isognomon* avant transplantation

ANNEXE 2 : Biométrie des bivalves *Isognomon isognomon* après transplantation

ANNEXE 3 : Concentrations en métaux chez les bivalves *I. isognomon* après transplantation

ANNEXE 4 : Concentrations en métaux chez les algues brunes *Lobophora variegata* après transplantation

ANNEXE 1 : Biométrie des bivalves *Isognomon isognomon* avant transplantation

Poids frais total (en g) :

St 03	St 06	St 07	St 13	St 14	St 16	St 18	St 31	lot initial
16,94	17,62	19,13	11,99	15,92	18,20	15,43	16,10	17,84
17,29	11,99	12,82	18,10	14,26	18,04	18,02	17,12	18,11
14,83	13,07	13,43	18,01	13,30	14,55	11,36	13,84	15,43
12,00	17,56	15,27	11,60	15,48	15,07	13,46	12,40	13,95
17,08	17,14	11,97	17,37	15,67	18,10	13,33	17,00	18,39
17,89	17,50	12,98	17,73	18,00	17,52	15,67	16,02	18,10
18,00	16,87	14,98	16,31	18,00	13,73	18,00	15,05	12,00
16,76	18,50	11,97	13,72	17,03	16,77	13,96	15,82	16,05
17,82	17,70	18,00	17,16	16,80	12,80	17,20	13,21	14,91
17,41	18,00	18,01	18,00	17,79	12,70	14,52	14,36	12,99
16,20	17,76	13,81	18,01	18,00	18,10	17,99	15,41	18,10
12,11	16,25	17,68	18,10	13,49	11,99	17,48	17,64	15,72
13,95	15,23	17,06	14,20	14,08	13,74	17,70	13,30	15,42
16,34	12,00	15,42	16,67	15,72	16,95	17,98	18,01	15,36
11,90	12,01	18,20	12,26	12,01	18,00	11,99	18,20	18,11

Longueur de la coquille (en mm)

St 03	St 06	St 07	St 13	St 14	St 16	St 18	St 31	lot initial
80,57	87,23	76,38	63,99	83,67	75,53	73,51	78,79	71,90
88,98	75,41	69,06	78,84	66,60	80,09	90,33	91,67	70,20
68,95	68,38	67,70	79,62	75,74	78,56	79,28	89,37	75,14
65,31	80,50	77,90	70,05	74,12	88,17	58,27	63,68	74,61
71,10	83,18	61,99	78,37	63,98	86,46	60,85	81,15	84,32
66,11	93,12	80,96	77,42	83,28	65,38	69,70	68,07	73,87
77,71	72,53	67,45	94,08	84,80	69,86	81,22	73,62	66,89
92,90	75,59	72,80	62,83	78,18	75,69	88,80	72,04	68,64
85,82	74,92	68,35	68,97	82,41	75,36	67,16	63,46	80,90
55,51	95,95	74,34	73,40	90,04	72,96	69,94	64,21	62,20
68,02	76,72	69,75	72,83	72,28	72,14	80,22	72,12	69,83
67,50	72,20	66,36	80,99	77,25	63,87	74,36	84,62	71,52
69,84	59,79	74,22	58,18	62,93	62,48	75,10	64,13	83,50
63,71	76,14	63,71	75,13	76,91	82,30	63,20	94,86	63,50
61,41	67,89	69,18	61,33	67,80	67,80	66,38	65,57	61,23

ANNEXE 2 : BIOMETRIE DES BIVALVES *ISOGNOMON ISOGNOMON* APRES TRANSPLANTATION

Station	PF tot (g)	Long (mm)	PF chairs (g)	PS chairs (g)	PS valves
St03	24,61	95,4	2,319	0,219	20,184
	19,62	99,6	2,195	0,179	15,391
	18,13	69,1	1,997	0,160	14,237
	20,36	78,2	1,896	0,136	16,62
	17,97	80,7	2,191	0,180	13,858
	21,02	88,5	2,155	0,203	16,981
	22,96	91,7	2,706	0,194	18,076
	20,45	93,4	2,456	0,200	15,96
	20,02	74,0	2,253	0,180	15,862
	19,82	85,1	1,908	0,157	15,731
	21,49	103,4	2,437	0,200	16,662
	20,68	86,9	1,781	0,168	16,321
	20,53	95,7	2,555	0,183	16,064
	22,24	82,1	2,335	0,190	17,68
	21,56	83,9	2,273	0,182	16,543
St06	17,94	83,8	2,470	0,217	13,77
	17,00	74,1	1,679	0,162	13,695
	20,47	83,2	1,767	0,188	17,059
	15,16	84,7	1,462	0,134	12,29
	18,53	93,2	1,899	0,208	15,079
	19,51	80,4	2,147	0,189	15,816
	15,61	75,2	1,554	0,137	12,428
	18,33	83,9	2,182	0,200	14,175
	15,59	72,8	1,807	0,175	12,205
	20,35	78,6	1,961	0,190	16,395
	13,54	83,3	1,126	0,123	10,995
	18,01	80,9	1,905	0,203	14,21
	14,17	65,6	1,575	0,167	11,11
	18,26	78,5	1,912	0,176	14,802
	19,72	87,9	1,738	0,190	16,13
St13	21,61	86,0	2,559	0,189	17,076
	20,02	79,2	2,038	0,184	15,308
	19,59	75,9	1,786	0,185	15,265
	16,09	78,1	1,687	0,170	12,655
	19,45	77,3	1,931	0,175	15,305
	19,60	81,5	2,265	0,204	15,176
	18,92	93,5	1,808	0,183	15,027
	20,47	87,9	2,340	0,173	15,485
	20,18	83,2	2,328	0,242	15,559
	15,81	79,1	1,814	0,165	12,269
	20,48	82,5	2,103	0,156	15,722
	19,00	76,5	1,922	0,174	14,557
	15,02	81,6	1,715	0,155	11,401
	13,32	76,9	1,231	0,128	10,348
	18,52	85,3	1,581	0,160	15,355
St14	19,50	82,9	1,965	0,157	15,255
	21,78	82,6	2,570	0,238	17,03
	22,81	82,4	2,251	0,184	18,509
	15,65	78,4	1,746	0,150	12,061
	17,24	76,9	1,670	0,166	13,842
	18,33	75,4	1,835	0,150	14,901
	19,12	95,3	2,163	0,177	14,958
	17,97	87,7	2,080	0,166	14,017
	20,04	88,7	2,177	0,187	15,43
	23,21	91,3	2,373	0,204	18,355
	17,71	88,9	1,692	0,168	14,564
	16,89	75,1	1,762	0,163	13,225
	18,92	84,5	2,304	0,184	14,592
	16,33	73,7	1,896	0,188	12,311
	14,34	81,2	1,448	0,134	11,326

Station	PF tot (g)	Long (mm)	PF chairs (g)	PS chairs (g)	PS valves
St16	18,36	70,4	1,806	0,178	14,321
	17,59	85,2	2,166	0,201	13,85
	19,93	84,3	2,315	0,225	15,619
	21,13	98,4	2,150	0,212	16,566
	14,39	78,2	1,375	0,118	11,609
	9,94	68,0	1,177	0,116	7,74
	18,89	75,8	1,739	0,169	14,773
	16,66	94,7	1,716	0,169	13,39
	15,99	77,9	1,797	0,167	12,262
	24,19	84,5	2,328	0,200	19,265
	18,69	83,1	2,000	0,197	14,711
	13,29	70,9	1,315	0,128	10,535
	14,61	71,1	1,862	0,183	11,272
	19,13	85,4	1,785	0,166	15,407
	16,56	82,0	2,178	0,187	12,509
St18	21,72	88,7	2,161	0,178	17,713
	21,23	80,4	2,686	0,213	16,115
	14,15	62,0	1,280	0,124	11,356
	15,83	71,9	1,624	0,145	12,382
	16,07	78,0	1,602	0,284	12,187
	18,67	78,2	2,620	0,234	13,958
	18,28	79,1	2,095	0,172	13,557
	18,31	77,6	1,712	0,153	14,592
	20,00	82,5	2,382	0,230	15,165
	18,06	79,2	1,816	0,144	14,072
	16,40	90,5	2,155	0,177	12,536
	19,34	75,5	1,939	0,154	15,368
	13,37	72,2	1,468	0,261	10,296
	14,95	64,7	1,768	0,171	11,654
St31	14,71	75,9	1,290	0,128	11,68
	10,69	65,2	0,884	0,120	8,682
	19,55	88,5	1,780	0,179	15,688
	12,75	75,0	1,450	0,125	10,033
	17,45	81,2	2,106	0,151	13,42
	19,79	83,7	2,625	0,189	15,291
	18,64	72,4	1,819	0,248	14,92
	20,69	80,6	2,444	0,211	15,937
	16,50	96,2	1,738	0,174	12,583
	19,17	79,2	1,861	0,187	14,989
	20,08	85,9	2,536	0,182	15,447
	22,29	91,1	2,258	0,195	17,804
	18,08	80,9	1,901	0,188	14,056
	11,65	74,7	1,262	0,172	9,369
	16,62	87,5	2,295	0,227	12,7

(**PF tot** : Poids Frais total de l'animal vivant ; **Long** : Longueur de la coquille ; **PF chairs** : Poids frais des tissus mous ; **PS chairs** : Poids sec des tissus mous après lyophilisation ; **PS valves** : Poids sec des deux valves de la coquille).

ANNEXE 3 : Concentrations en métaux (en µg/g de poids sec) chez les bivalves *I. isognomon* après transplantation

Station	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
St 03	49,2	0,26	2,0	5,7	140	23,8	2,0	559
	42,9	0,26	1,4	5,5	114	21,6	1,4	640
	44,6	0,27	1,9	5,6	133	21,5	2,0	619
	55,7	0,27	2,0	4,4	139	18,0	2,1	518
	55,2	0,28	1,8	5,6	144	31,7	2,1	417
St 06	50,9	0,30	2,6	5,1	151	27,0	2,2	576
	59,0	0,32	2,5	6,2	163	22,3	2,5	770
	45,3	0,26	2,3	5,0	150	15,5	2,2	600
	48,6	0,31	2,3	4,8	133	23,4	2,1	552
	61,6	0,33	2,6	5,3	168	28,5	2,5	773
St 13	51,0	0,26	2,0	7,0	135	23,8	2,0	693
	53,0	0,23	1,3	7,6	114	12,2	1,6	627
	44,4	0,21	1,2	6,8	106	20,2	1,5	502
	49,3	0,24	1,7	7,3	150	16,8	1,9	671
	59,3	0,22	1,1	5,5	101	17,6	1,4	631
St 14	44,5	0,27	1,6	6,4	138	21,3	1,5	727
	51,6	0,24	1,4	5,4	138	17,8	1,7	579
	56,6	0,23	1,5	6,1	135	24,8	1,7	583
	53,7	0,25	1,3	5,7	120	19,1	1,4	643
	60,8	0,21	1,4	6,5	135	25,6	1,6	763
St 16	56,9	0,18	0,9	12,3	91	24,4	1,2	507
	55,6	0,25	1,2	13,0	119	17,0	1,4	624
	56,1	0,18	1,0	12,6	92	23,5	1,0	491
	52,8	0,21	1,3	13,6	125	20,3	1,5	701
	50,9	0,24	1,1	13,3	120	17,0	1,3	534
St 18	49,9	0,27	2,0	6,5	149	16,2	2,1	462
	53,3	0,29	2,0	6,2	162	28,5	2,1	671
	53,2	0,30	2,2	6,7	185	26,8	2,2	631
	48,9	0,25	1,5	6,9	130	16,9	1,7	546
	45,8	0,27	1,8	5,9	143	18,0	2,1	472
St 31	69,0	0,38	4,3	5,2	209	23,5	3,6	709
	79,6	0,31	3,1	4,5	175	28,4	2,7	686
	63,1	0,34	3,1	5,3	217	18,8	2,9	678
	60,2	0,34	2,9	6,1	169	20,0	2,4	723
	63,9	0,28	2,2	6,9	147	21,0	2,1	671

ANNEXE 4 : Concentrations en métaux (en µg/g de poids sec) chez les algues brunes *Lobophora variegata* après transplantation

Station	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
St 03	44,6	3,2	10,6	2,4	432	30,0	6,6	20,4
	40,2	2,7	5,1	3,5	198	20,5	3,6	11,9
	44,1	3,2	10,3	2,4	416	34,0	6,7	13,5
	40,4	2,9	9,6	3,2	425	26,0	6,5	9,8
	44,0	3,3	8,6	2,0	324	27,1	5,1	14,0
St 13	38,8	3,1	4,8	4,4	167	26,8	3,1	10,1
	36,2	3,1	6,4	4,8	284	26,4	4,8	14,4
	39,9	4,1	5,7	4,2	212	31,5	3,6	12,7
	25,3	1,9	3,2	3,3	162	18,7	2,9	7,2
	32,6	1,9	3,8	5,8	184	19,9	3,3	12,2
St 14	37,7	1,5	2,9	4,6	168	12,3	2,9	12,7
	37,7	2,4	3,6	2,8	207	17,6	3,5	26,5
	34,6	1,5	3,1	4,1	188	11,9	3,1	19,3
	39,9	2,2	4,6	3,2	284	17,3	5,0	30,2
	39,6	1,7	3,9	3,7	210	19,9	3,8	18,0
St 16	42,0	1,6	3,0	18,2	163	10,6	3,3	12,2
	35,2	2,0	7,5	11,4	370	17,0	5,8	14,5
	39,3	1,5	4,9	15,5	274	17,8	5,1	16,0
	44,1	2,4	5,4	13,7	294	14,5	4,8	28,4
	44,2	2,0	5,4	15,5	267	18,8	5,0	13,5
St 31	42,6	3,1	10,9	5,0	509	24,2	8,3	9,6
	35,7	2,0	8,5	4,6	402	17,3	6,6	7,4
	34,1	1,9	9,5	4,9	441	16,1	7,5	7,6
	34,3	1,8	9,0	4,8	429	15,4	7,1	7,2
	52,8	3,1	17,8	6,6	758	26,6	12,5	9,1