



VALE NC

SUIVI DE LA QUALITE ECOTOXICOLOGIQUE (METAUX) DES
EAUX DE LA ZONE SUD DU LAGON DE NOUVELLE-CALEDONIE
PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIOINDICATRICES
(BIOACCUMULATION), CAMPAGNE 2011

TRANSPLANTATION 2011



AEL - LEA

7 décembre 2011

CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL - LEA

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
(BIOACCUMULATION), CAMPAGNE 2011***

Transplantation 2011

Auteur (s) :

Ludovic BREAU

Adeline GOYAUD

François ROUPSARD

Hélène LE GRAND

Jean-Michel FERNANDEZ

Nombre de pages : 44

	N/Ref	V/Ref	
Identification	100217-VI-05	C2466	
Titre complet	SUIVI DE LA QUALITE ECOTOXICOLOGIQUE (METAUX) DES EAUX DE LA ZONE SUD DU LAGON DE NOUVELLE-CALÉDONIE PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIOINDICATRICES (BIOACCUMULATION), CAMPAGNE 2011		
Auteurs	Ludovic BREAU, Adeline GOYAUD, François ROUPSARD, Hélène LE GRAND ET Jean-Michel FERNANDEZ		
Résumé	La troisième campagne de transplantation d'organismes marins s'est déroulée de début juin à fin août 2011. Elle a été marquée par des conditions climatiques comparables aux années précédentes, seule la température de l'eau mer était sensiblement plus chaude. Ces conditions environnementales ont permis un comportement physiologique normal des organismes transplantés. Selon les métaux considérés, les concentrations mesurées soulignent l'existence d'apports significatifs mais modérés, typiques des milieux côtiers naturels néo-calédoniens. Toutefois, des clarifications doivent être encore apportées, notamment quant à l'évolution des concentrations pour certaines stations (ex. : St16) voire des espèces transplantées. Les résultats obtenus indiquent dans tous les cas que le début du rejet industriel dans le Canal de la Havannah n'a pas induit d'augmentation des concentrations en métaux dans les organismes transplantés par rapport à l'état initial précédemment établi en 2009.		
APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Ludovic BREAU		08/11/2011
Vérificateur 1	Jean Michel FERNANDEZ		12/11/2011
Vérificateur 2			
Approbateur(s)	Jean Michel FERNANDEZ		02/12/2011
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR		DATE
2.0	Rapport final		07/12/2011
COPIE - DIFFUSION			
NOM	ORGANISME		
Céline CASALIS	VALE NC, Département Environnement		

Ce rapport doit être cité comme suit :

BREAU L., A. GOYAUD, F. ROUPSARD, H. LE GRAND ET FERNANDEZ J.M, 2011. Suivi de la qualité écotoxicologique (métaux) des eaux de la zone sud du lagon de Nouvelle-Calédonie par Transplantation d'espèces bioindicatrices (Bioaccumulation), Campagne 2011. Rapport AEL 100217-VI-05, 44 p.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	7
OBJECTIFS	8
METHODOLOGIE	9
RECOLTE ET SELECTION DES SPECIMENS A TRANSPLANTER	9
IMMERSION, CONTROLE ET RECUPERATION DES CAGES	10
CONDITIONS METEOROLOGIQUES	13
TRAITEMENT ET ANALYSE DES ECHANTILLONS	15
RESULTATS - DISCUSSION	18
CROISSANCE DES BIVALVES TRANSPLANTES	18
CONDITION PHYSIOLOGIQUE DES BIVALVES TRANSPLANTES	21
CONCENTRATIONS EN METAUX DANS LES BIVALVES	23
Niveaux de concentration	23
Variabilité temporelle des concentrations	27
CONCENTRATIONS EN METAUX DANS LES MACROALGUES	31
Niveaux de concentration	31
Variabilité temporelle des concentrations	35
SYNTHESE	39
REFERENCES	42
LISTE DES FIGURES	43
LISTE DES TABLEAUX	44

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 (contrat AEL/Vale-NC N°C2466).

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 troisième campagne de transplantation, qui s'est déroulée de début juin à fin août 2011.

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. Pendant cette durée d'immersion des spécimens dans le milieu récepteur à surveiller, les concentrations en métaux dans les tissus de ces spécimens s'équilibrent progressivement et de façon proportionnelle avec celles des métaux présents sous formes disponibles pour ces espèces dans le milieu ambiant. Cette bioaccumulation des métaux fournit donc une indication quantitative des apports biodisponibles.

A l'issue de cette période, 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.

METHODOLOGIE

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](#).

RECOLTE ET SELECTION DES SPECIMENS A TRANSPLANTER

Les bivalves *Isognomon isognomon* Linnaeus et les macroalgues brunes *Lobophora variegata* (Lamouroux) Womersley ont été récoltés le 30 mai 2011 dans la Baie Maa, précédemment identifiée comme un site de référence pour l'étude de la plupart des métaux étudiés, à l'exception du cuivre ([Breau, 2003](#) ; [Breau et al., 2009b](#)).

Après tri et brossage des coquilles, les bivalves (n = 335) 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 pour obtenir le poids frais total de l'animal vivant, puis mesurés au dixième de millimètre à l'aide d'un pied à coulisse pour déterminer la 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 lors de la première campagne de transplantation réalisée en 2009 (Caractérisation de l'état initial, [Breau et al., 2009c](#)), une sélection des spécimens ayant un poids frais total compris entre 12 et 20 g a été réalisée. Comme lors de la précédente campagne de 2010¹, neuf lots (huit lots à transplanter ainsi qu'un lot témoin avant transplantation) de quinze bivalves chacun ont ensuite été constitués par

¹ La constitution d'un neuvième lot témoin après la récolte initiale n'a en revanche pas pu être réalisée lors de la première campagne de 2009, le nombre de spécimens répondant aux critères biométriques sélectionnés étant insuffisant.

tirage aléatoire au sein des individus sélectionnés précédemment. Les poids frais moyens des lots varient de $15,81 \pm 2,24$ g à $15,91 \pm 2,21$ g, soit une moyenne globale de $15,84 \pm 2,29$ g. Ces neuf lots ne présentent aucune différence significative de poids frais total (Test de Kruskal-Wallis (KW); $p=1,0$) (Figure 1). Les longueurs moyennes des lots de coquilles varient de $76,1 \pm 7,4$ mm à $81,2 \pm 9,3$ mm, soit une moyenne globale de $78,4 \pm 8,1$ mm, et ne diffèrent pas significativement (KW ; $p=0,68$) (Figure 1).

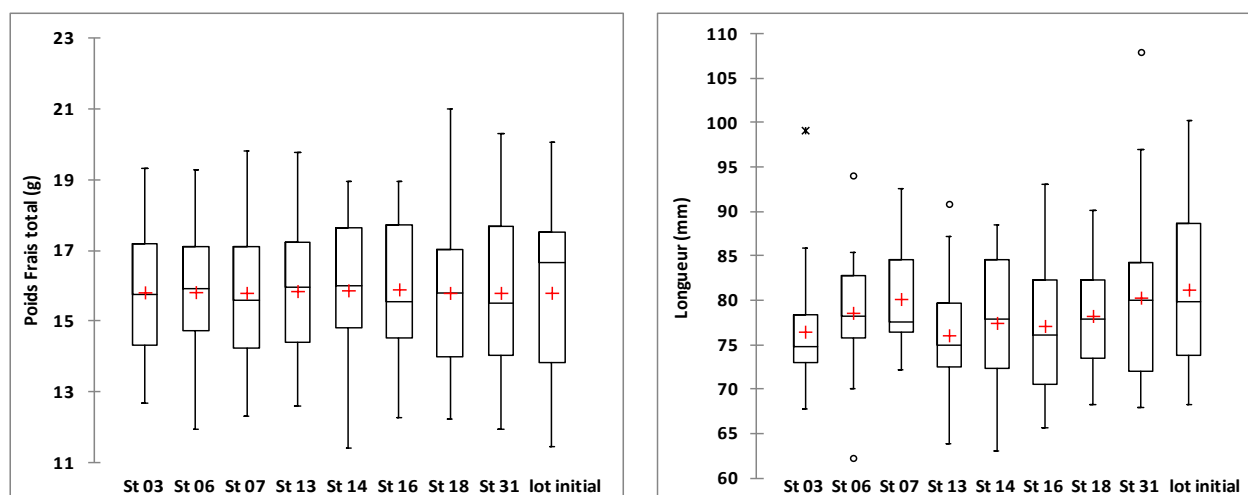


Figure 1 : Variabilité des poids frais (à gauche) et des longueurs des coquilles (à droite) des spécimens des neuf lots de bivalves *Isognomon isognomon* sélectionnés pour l'étude. Les rectangles représentent la distribution de 50 % des spécimens ; à l'intérieur, la croix représente la moyenne des valeurs et le trait horizontal représente la médiane (valeur centrale du lot) ; les traits verticaux de part et d'autre des rectangles représentent la distribution des 50 % de spécimens restants.

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'est 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 en chambre froide (-25°C) dans l'attente de son traitement pour la détermination des concentrations initiales en métaux avant transplantation.

IMMERSION, CONTROLE ET RECUPERATION DES CAGES

Sept des huit stations de transplantation ont été sélectionnées parmi les quatorze stations du plan de suivi physico-chimique du milieu marin mentionnées dans la Convention Province Sud/Vale NC. La huitième station, St31-Nouaré (sous influence purement océanique), ne figure pas dans le plan de suivi fixé par cette Convention et a été créée en remplacement de la station St05-Kié, à laquelle les interventions en plongée sous-marine et l'immersion de matériel scientifique ne sont pas envisageables en raison des trop forts courants régnant à cet

endroit. La localisation de la station St31-Nouaré a cependant été modifiée en 2011 (déplacement de quelques centaines de mètres vers la pointe nord-est de l'îlot Nouaré) par rapport à la campagne de 2010 (station située au sud-ouest de l'îlot), dont les résultats ont curieusement montré de trop fortes concentrations en certains métaux pour pouvoir l'utiliser comme une station de référence en raison de la présence supposée d'eau résultant d'un upwelling (Fichez et al, 2005).

De même, suite au problème rencontré lors de la précédente campagne avec la cage de la station St16-Port Vale (retrouvée posée sur le fond suite à la destruction de son flotteur probablement consécutive au passage d'un navire à l'aplomb du dispositif), la position de la cage a été légèrement déplacée vers la bordure nord de la zone portuaire.

La localisation des huit stations est indiquée dans le Tableau 1 et représentée à la Figure 2.

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

Station	Localisation	Position GPS cage		Date immersion
St 03	Chenal de la Baie de Port Boisé	22°21,187	166°58,01	02/06/2011
St 06	Chenal de la Baie Kwé	22°20,83	166°59,11	02/06/2011
St 07	Récif Ioro (pointe nord)	22°22,83	166°57,90	02/06/2011
St 13	Récif Ma (pointe nord), Ile Ouen	22°24,91	166°51,36	03/06/2011
St 14	Baie de Goro	22°19,35	167°01,15	02/06/2011
St 16	Port commercial de l'usine Vale NC	22°21,42	166°53,30	03/06/2011
St 18	Îlot Casy (pointe du platier sud-est)	22°21,67	166°51,06	03/06/2011
St 31	Îlot Nouaré (bord ouest)	22°25,46	167°00,45	03/06/2011

La campagne d'immersion des cages a été réalisée les 2 et 3 juin 2011. A chaque station, un lot de bivalves et un lot d'algues 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 9 et 10 m de profondeur.

Après environ un mois et demi d'immersion (soit les 12 et 13 juillet 2011), les dispositifs de transplantation immergés à sept des huit stations (St03-Port Boisé, St06-Kwé, St07-Ioro, St13-Ouen, St14-Goro, St18-Casy et St31-Nouaré) 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 St16-Port n'a pas été retrouvée.

Les 29 et 30 août 2011, soit après environ trois mois d'immersion, six des huit dispositifs de transplantation ont été récupérés en plongée sous-marine (soit St03, St06, St07, St13, St14 et St18). Les cages des stations St16-Port et

St31-Nouaré n'ont cependant pas pu être récupérées lors de cette mission. 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.

A la station St16-Port, seule la gueuse a été retrouvée et le bout la reliant à la cage était sectionné, très probablement suite au passage d'un navire. Afin d'éviter de nouvelles pertes de cage à cette station clé lors des prochaines campagnes, celle-ci devra être immergée à une profondeur supérieure (soit entre 13 à 15 m). L'augmentation de la profondeur d'immersion de la cage ne posera *a priori* aucun problème pour les bivalves ; en revanche, un effet pourrait s'observer sur les algues en raison d'une diminution sensible de l'intensité lumineuse par rapport à la profondeur initiale et des autres cages, qui sera conservée à 10 m afin de faciliter les interventions en plongée.

Une nouvelle mission de récupération de la cage de la station St31-Nouaré a été conduite le 15 septembre, au cours de laquelle la cage a finalement pu être retrouvée. Une perte très importante des algues introduites initialement a été observée, rendant impossible la constitution d'un pool et la conduite d'analyse. Cette perte est attribuable à la présence de nombreux petits poissons à l'intérieur de la cage constatée lors de sa récupération. Par ailleurs, une diminution du nombre d'algues a également été observée aux stations St07-Ioro et St13-Ouen.

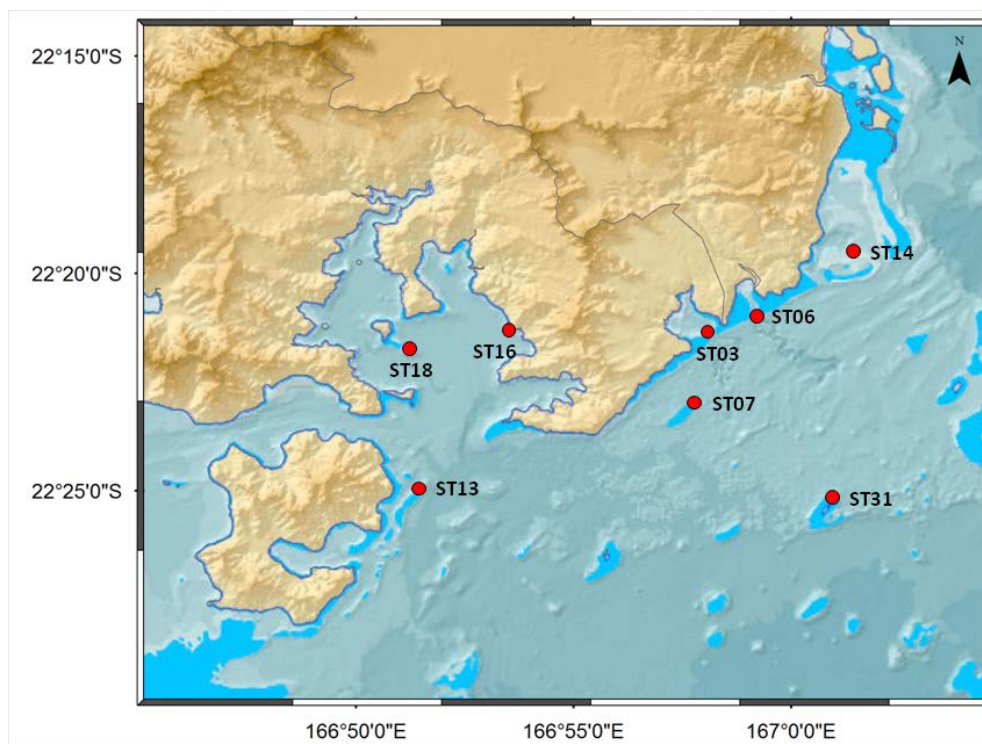


Figure 2 : Localisation géographique des huit stations de suivi écotoxicologique du milieu marin par transplantation d'espèces bioaccumulatrices.

CONDITIONS METEROLOGIQUES

Les conditions météorologiques régnant dans la zone pendant les trois mois d'immersion des cages, notamment les précipitations ainsi que la force et la direction des vents, sont susceptibles d'influer respectivement sur la nature et la quantité des apports en métaux dans le milieu marin côtier (lixiviation plus ou moins marquée des sols selon l'intensité des précipitations), puis sur la dispersion de ces apports en mer (selon l'orientation 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 météorologique de Vale NC, située sur l'ancienne usine pilote en bordure de la baie de Prony. Les données de vents (vitesse et direction) et de température (de l'air et de l'eau) sont obtenues par la station météorologique de l'IRD installée sur la balise du récif loro, dans le Canal de la Havannah. Les données de direction sont cependant susceptibles d'être légèrement biaisées suite à l'endommagement du mât supportant le dispositif de mesures après un fort coup de vent avant le début de la campagne.

Du 2 juin au 30 août 2011 (soit 90 jours de transplantation), la pluviométrie totale était de 344 mm. L'année précédente, la pluviométrie était de 315 mm sur 85 jours de mesures, et était en 2009 de 245 mm sur 83 jours de mesure disponibles. Les plus fortes valeurs de pluviométrie en 2011 ont été mesurées le 28 juillet (24,8 mm) ainsi que du 21 au 24 août, quelques jours seulement avant la récupération des cages (de 13,2 mm le 24 août à 58,3 mm le 21 août) (Figure 3).

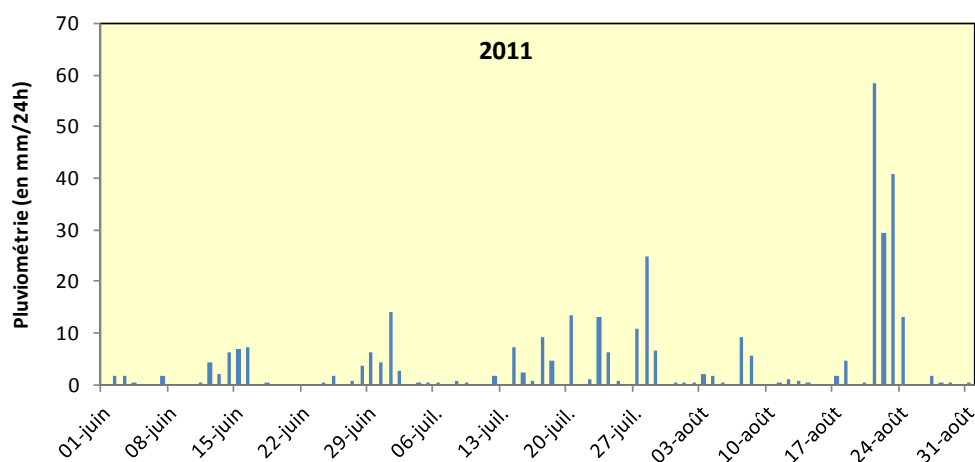


Figure 3 : Pluviométrie journalière mesurée au niveau de l'ancienne usine pilote de Goro Nickel pendant toute la durée de la campagne de transplantation 2011.

La vitesse journalière moyenne des vents a été de $5,6 \pm 2,2$ m/s sur l'ensemble de la campagne de 2011, avec des valeurs minimales d'environ 2 m/s et une valeur maximale de 11,7 m/s. L'amplitude des vitesses pendant les

trois mois d'immersion est similaire à celle précédemment enregistrée lors des campagnes de 2009 et de 2010 à la même période (Figure 4). Comme les deux années précédentes entre début juin et début septembre, les vents ont majoritairement été de secteur Sud. Cependant, un décalage vers le secteur ouest au détriment du secteur Est est observé en 2011 par rapport à 2009 et 2010 (Figure 4) ; ce décalage pourrait être dû à une légère rotation du mât supportant l'anémomètre lors du fort coup de vent enregistré plusieurs mois auparavant.

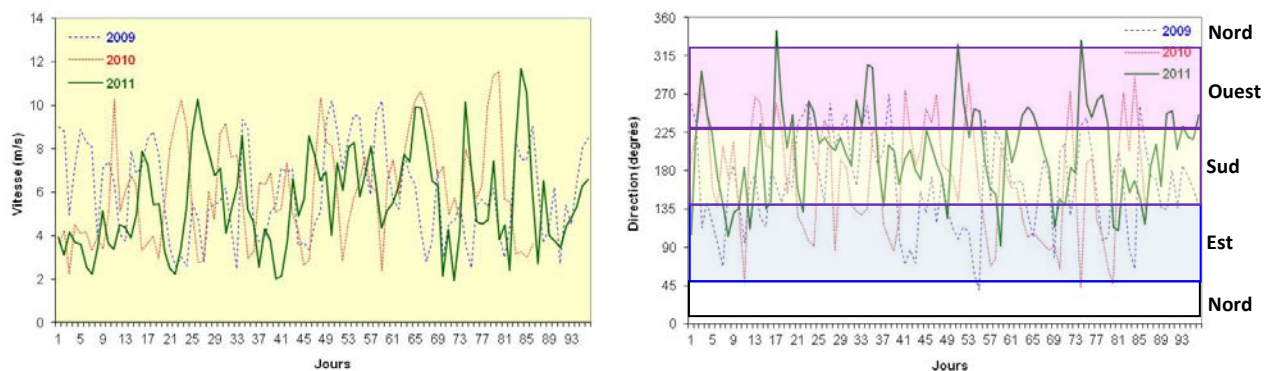


Figure 4 : Evolution de la vitesse (à gauche) et de la direction (à droite) des vents (moyennes journalières) mesurées en continu à la station de loro pendant toute la durée de transplantation. Les données des deux précédentes campagnes de 2009 et 2010 sont également représentées pour permettre les comparaisons interannuelles.

La température moyenne de l'eau au niveau du récif de loro sur l'ensemble de la campagne de 2011 est de $21,6 \pm 0,8$ °C et a oscillé entre 23,1°C et 20,5°C, avec une tendance régulière à la baisse (saison fraîche). Les températures moyennes journalières de l'eau enregistrées lors de cette campagne sont très légèrement inférieures à celles de 2010 pendant la première moitié de la période d'immersion des cages, mais nettement supérieures à celles de 2009. Lors de la seconde moitié de la campagne, l'écart entre les valeurs de 2011 et de 2010 se creuse légèrement et les températures de 2011 deviennent inférieures à celles de 2009 (lesquelles étaient remontées par rapport au début de la campagne) (Figure 5).

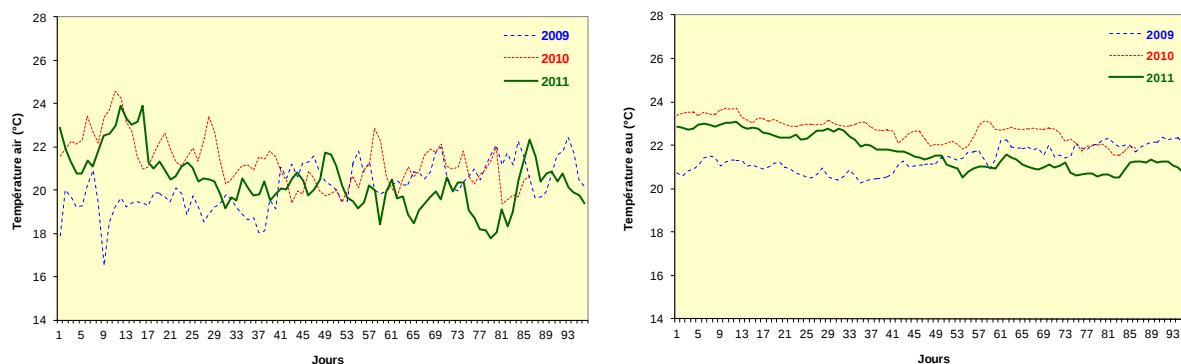


Figure 5 : Evolution des températures de l'air (à gauche) et de l'eau (à droite) pendant la campagne de transplantation 2011. Les données des deux précédentes campagnes ont été représentées afin de permettre les comparaisons interannuelles.

TRAITEMENT ET ANALYSE DES ECHANTILLONS

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 de la gonade et des chairs entières, 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 :**

$$\text{TCJ (\%)} = ((\text{Ln Vf} - \text{Ln Vi}) \times 100) / (\text{Tf} - \text{Ti})$$

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, du stade du cycle de reproduction 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 :

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

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

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

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'indice gonado-somatique (IGS) : (PF gonade / PF chairs entières) x 100**

Cet indice traduit l'importance relative de la masse de la glande sexuelle par rapport à celle de l'ensemble des chairs de l'animal frais, et reflète donc son état vis-à-vis du cycle de reproduction.

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.

- **La bioaccumulation des métaux :**

Les chairs 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 tout en conservant une possibilité d'analyse statistique selon des méthodes non paramétriques notamment. De même, les algues ont été broyées 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 concentré 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, NRCC) 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. Les résultats du contrôle qualité réalisé pour ces séries d'échantillons sont présentés dans le Tableau 1. La précision de la méthode est excellente pour As, Cu, Fe, Mn et Zn (variation inférieure à 5 % entre les sept échantillons certifiés), bonne pour Ni (7,7 %) et acceptable pour Co et Cr (< 15 %). Une excellente justesse relative (évaluée en comparant les résultats d'analyse du matériel biologique de référence régulièrement inséré dans les séries avec les valeurs certifiées) a été obtenue pour As, Co, Cr, Ni et Zn (de 96 % à 107 %). En revanche, comme l'année précédente, une légère sous-estimation (d'environ 11 %) des concentrations en Cu, Fe et Mn est constatée, avec des justesses relatives de 88-89 %. Malgré cette sous-estimation, les concentrations en fer correspondent à la limite inférieure de la valeur certifiée et sont donc acceptables ; par contre, les concentrations en Cu et Mn sont légèrement au-dessous de la limite inférieure fournie par le fournisseur du matériel certifié utilisé (NRCC). Les données relatives à ces deux métaux doivent donc être interprétées avec prudence. Une étude méthodologique sera initiée très prochainement afin d'identifier les causes de ce problème puis le résoudre.

Les limites de détection moyennes suivantes ont été obtenues (en µg/g de poids sec) : As : 0,9 µg/g ; Co : 0,11 µg/g ; Cr : 0,05 µg/g ; Cu : 0,13 µg/g ; Fe : 0,65 µg/g ; Mn : 0,03 µg/g ; Ni : 0,23 µg/g ; Zn : 2,3 µg/g.

Tableau 2 : Résultats du contrôle qualité des méthodes de minéralisation et d'analyse chimique des métaux dans les tissus biologiques réalisé dans le cadre de la campagne 2011.

	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Valeurs mesurées ¹	21,8 ± 0,9	0,52 ± 0,07	0,83 ± 0,12	93,7 ± 2,3	92,0 ± 2,2	12,1 ± 0,4	2,39 ± 0,18	180 ± 4
Précision relative (%) ²	4,2	13,8	14,9	2,5	2,4	3,2	7,7	2,3
Valeurs certifiées ³	21,6 ± 1,8	0,51 ± 0,09	0,77 ± 0,15	106 ± 10	105 ± 13	13,6 ± 1,2	2,50 ± 0,19	180 ± 6
Justesse relative (%)	101	102	107	88	88	89	96	100
LD moyen (µg/g ps) ⁴	0,9	0,11	0,05	0,13	0,65	0,03	0,23	2,3

¹ moyenne ± écart-type (en µg/g de poids sec); n=7 échantillons certifiés TORT-2 (Conseil National de Recherches Canada)

² La précision relative est exprimée par le coefficient de variation des valeurs obtenues (CV = écart-type x 100/ moyenne)

³ moyenne ± intervalle de confiance (en µg/g de poids sec)

⁴ LD : Limite de détection moyenne. Cette LD correspond à la moyenne des LD calculées avec la masse la plus faible d'échantillon minéralisé (soit 0,368 g) et la masse la plus forte (0,570 g) (en µg/g de poids sec).

RESULTATS - DISCUSSION

CROISSANCE DES BIVALVES TRANSPLANTES

En fin d'expérience, les poids frais totaux moyens par lot s'échelonnent entre $17,42 \pm 2,34$ g (station St14-Goro) et $20,81 \pm 2,75$ g (station St31-Nouaré), soit une moyenne globale de $18,47 \pm 2,35$ g toutes stations confondues. A chacune des sept stations, le poids frais total moyen après transplantation est supérieur à celui mesuré en début d'expérience (Figure 6A), soit une croissance moyenne relative allant de 9,7 % (St14-Goro) à 31,7 % du poids initial (St31-Nouaré) ; cette différence observée est statistiquement significative (test de Wilcoxon pour échantillons appariés, $p < 0,05$) pour toutes les stations à l'exception de St14-Goro ($p = 0,064$). Après trois mois de transplantation, les poids frais totaux présentent une différence significative (Test de Kruskal-Wallis (KW), $p = 0,011$) entre les stations. Les comparaisons multiples (procédure de Dunn) indiquent que ces différences sont significatives entre le lot de la station St31-Nouaré et toutes les autres stations, à l'exception toutefois de la St03-Port Boisé. Ces différences de croissance (nettement plus forte chez les bivalves de la station St31-Nouaré) sont probablement principalement liées à l'augmentation de la durée totale d'immersion de ce lot par rapport aux autres stations (soit seize jours de plus) et à la qualité trophique des eaux à cette station.

De même, les longueurs des coquilles ont légèrement augmenté pendant la période de transplantation, pour atteindre de $82,2 \pm 7,9$ mm (St07-Ioro) à $85,3 \pm 8,4$ mm (St03-Port Boisé), soit une moyenne globale de $83,6 \pm 7,6$ mm (Figure 6B) et des croissances relatives moyennes allant de 2,5 % (St07-Ioro) à 11,5 % (St03-Port Boisé) de la longueur moyenne initiale. Cette augmentation en longueur n'est cependant statistiquement significative (test de Wilcoxon pour échantillons appariés) que pour St03-Port Boisé ($p = 0,015$) et St13-Ouen ($p = 0,048$). Contrairement au poids frais total, les longueurs de coquille ne présentent aucune différence significative entre les stations après les trois mois d'immersion (KW, $p = 0,895$).

Les taux moyens de croissance pondérale journalière correspondants (Figure 7) s'échelonnent entre 0,105 - 0,112 % (St14-Goro et St06-Kwé, respectivement), 0,126 % (St07-Ioro), 0,166 % (St13-Ouen et St18-Casy), 0,220 % (St03-Port Boisé) et 0,264 % (St31-Nouaré). Les taux moyens de croissance en longueur journalière sont de 0,028 % (St07-Ioro), 0,053-0,060 % (St31-Nouaré et St06-Kwé, respectivement), 0,077-0,084 % (St18-Casy et St14-Goro, respectivement), 0,100 % (St13-Ouen) et 0,123 % (St03-Port Boisé). La comparaison de ces taux à chaque station et entre les stations révèle que la croissance ne s'effectue pas proportionnellement entre le poids et la taille, et que le type préférentiel de croissance (surtout en poids ou surtout en taille) diffère selon la station.

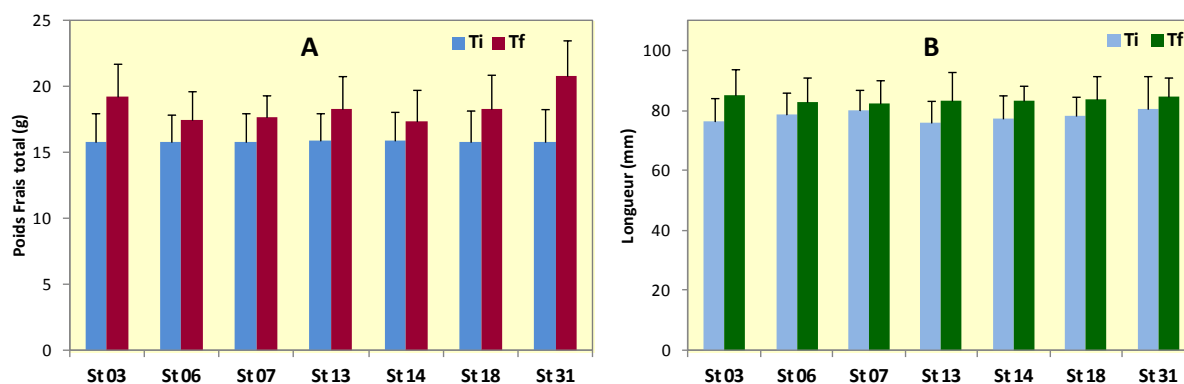


Figure 6 : Comparaison des poids frais totaux moyens (A) et des longueurs des coquilles (B) avant (Ti) et après (Tf) transplantation chez le bivalve *Isognomon isognomon* (n=15/station, moyenne $\pm$ écart-type).

Ainsi, les spécimens transplantés sur les stations St07-Ioro et St31-Nouaré (les plus éloignées de la côte et situées dans le Canal de la Havannah) montrent en particulier une croissance très préférentiellement pondérale tandis que ceux de la station St14-Goro équilibrent davantage leur croissance en poids et en longueur que ceux des autres stations (Figure 7).

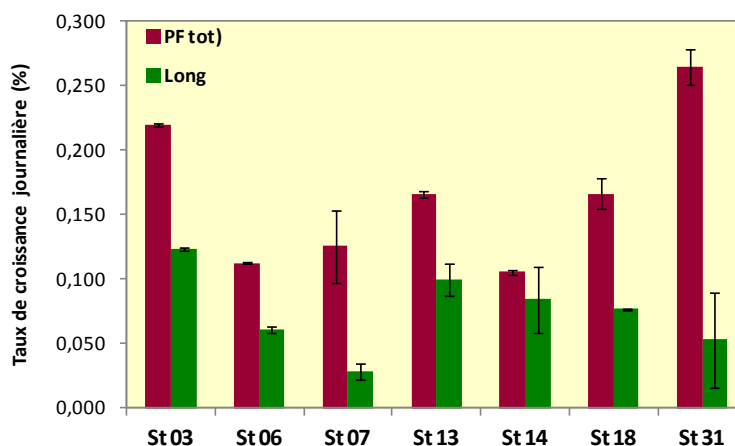


Figure 7 : Taux moyens de croissance journalière en poids frais total et en longueur de coquille (en %, $\pm$ intervalle de confiance à 95 %) chez les bivalves transplantés (n=15/station).

La comparaison interannuelle des taux de croissance obtenus lors des trois campagnes réalisées jusqu'à maintenant (Figure 8) indique que les taux enregistrés en 2011 sont dans la même gamme de valeurs que ceux précédemment obtenus en 2009 et 2010 à l'exception du taux de croissance pondérale à la station St31-Nouaré, environ deux fois supérieur en 2011 par rapport à l'année précédente. Ce dernier résultat, indépendant de la différence de durée totale d'immersion des cages à cette station entre 2010 et 2011 (les taux étant calculés en pondérant la croissance par le nombre de jour d'immersion), est donc uniquement lié au déplacement de cette station vers la pointe nord de l'îlot en 2011, où les conditions ambiantes semblent plus favorables à la croissance.

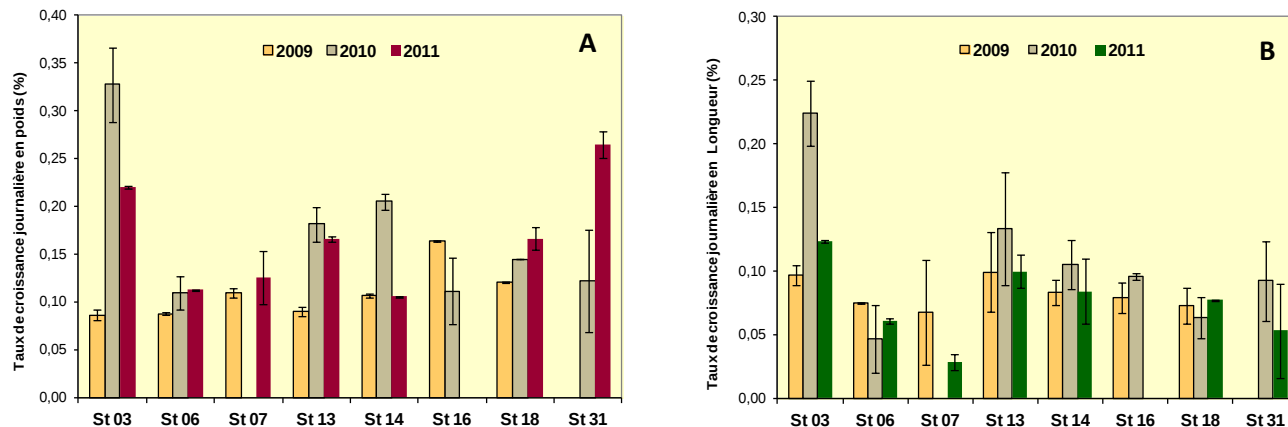


Figure 8 : Comparaison interannuelle des taux moyens de croissance journalière (en %, $\pm$ intervalle de confiance à 95 %) chez les bivalves transplantés (A : poids frais total ; B : longueur coquille) (n=15/station).

Ce qu'il faut retenir :

Une croissance (principalement pondérale) des spécimens immergés à chaque station a été mesurée entre le début et la fin de la période de transplantation ; celle-ci indique que les conditions environnementales régnant à proximité des cages sont propices au bon fonctionnement de leur métabolisme global. L'importance de cette croissance varie cependant selon la station ; les bivalves des stations St31-Nouaré puis St03-Port Boisé montrent la croissance pondérale la plus forte.

Les taux de croissance mesurés en 2011 sont du même ordre de grandeur que ceux précédemment obtenus lors des campagnes de 2009 et de 2010, à l'exception de la station St31-Nouaré (dont la position a été changée en 2011). Une variabilité interannuelle particulièrement forte est observée chez le lot de bivalves transplantés en St03-Port Boisé par rapport aux autres stations.

CONDITION PHYSIOLOGIQUE DES BIVALVES TRANSPLANTES

Les différents indices de condition physiologique moyens (Figure 9) varient de $11,7 \pm 1,7$ (St14-Goro) à $15,1 \pm 1,8$ (St31-Nouaré) pour IC1, de $43,5 \pm 4,6$ (St31-Nouaré) à $52,5 \pm 5,4$ (St06-Kwé) pour IC2, et de $10,6 \pm 1,6$ (St14-Goro) à $12,5 \pm 1,4$ (St31-Nouaré) pour IC3. Les bivalves transplantés en St31-Nouaré sont les seuls à présenter une différence significative de leurs IC1 et IC3 avec les valeurs du lot témoin avant transplantation ($p < 0,001$ et $p = 0,021$, respectivement). Pour l'indice IC2, des différences significatives avec le lot initial s'observent en revanche aux stations St03-Port Boisé, St07-Ioro, St14-Goro ($p < 0,05$) et St31-Nouaré ($p < 0,0001$). Pour l'indice gonado-somatique, des différences significatives avec le lot témoin ne s'observent que pour les stations St14-Goro ($p = 0,001$) et St18-Casy ($p = 0,043$), mais pas pour la St31-Nouaré.

Comme lors des deux précédentes campagnes, les divers indices montrent une variabilité spatiale peu marquée. Seules deux stations se distinguent des autres : les bivalves de la station St31-Nouaré se caractérisent par leurs plus fortes valeurs d'indices IC1 et IC3, et par leur plus faible valeur d'IC2 par rapport aux autres stations. Le lot de la station St14-Goro possède les valeurs moyennes d'IC1 et d'IC3 les plus faibles.

L'indice gonado-somatique (IGS) varie de 22,7 (St14-Goro) à 38,6 (St18-Casy). Hormis à ces deux stations, les IGS moyens sont quasiment similaires entre les stations et avec celui du lot initial avant transplantation (Figure 9).

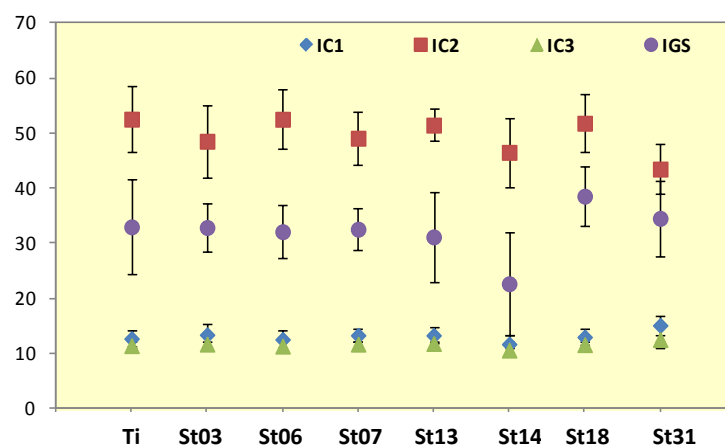


Figure 9 : Comparaison des indices de condition physiologique (IC1, IC2, IC3) et de l'indice Gonado-Somatique (IGS) (moyenne $\pm$ écart-type) calculés chez les spécimens transplantés sur les diverses stations.

La comparaison de ces indices moyens avec ceux précédemment obtenus lors des deux campagnes de 2009 et 2010 révèle que les indices IC1 et IC2 de 2011 sont très proches (voire similaires) de ceux calculés l'année précédente et sont nettement inférieurs à ceux de 2009. Les indices IC3 sont en revanche du même ordre de grandeur et sont généralement légèrement supérieurs à ceux des deux années précédentes (Figure 10).

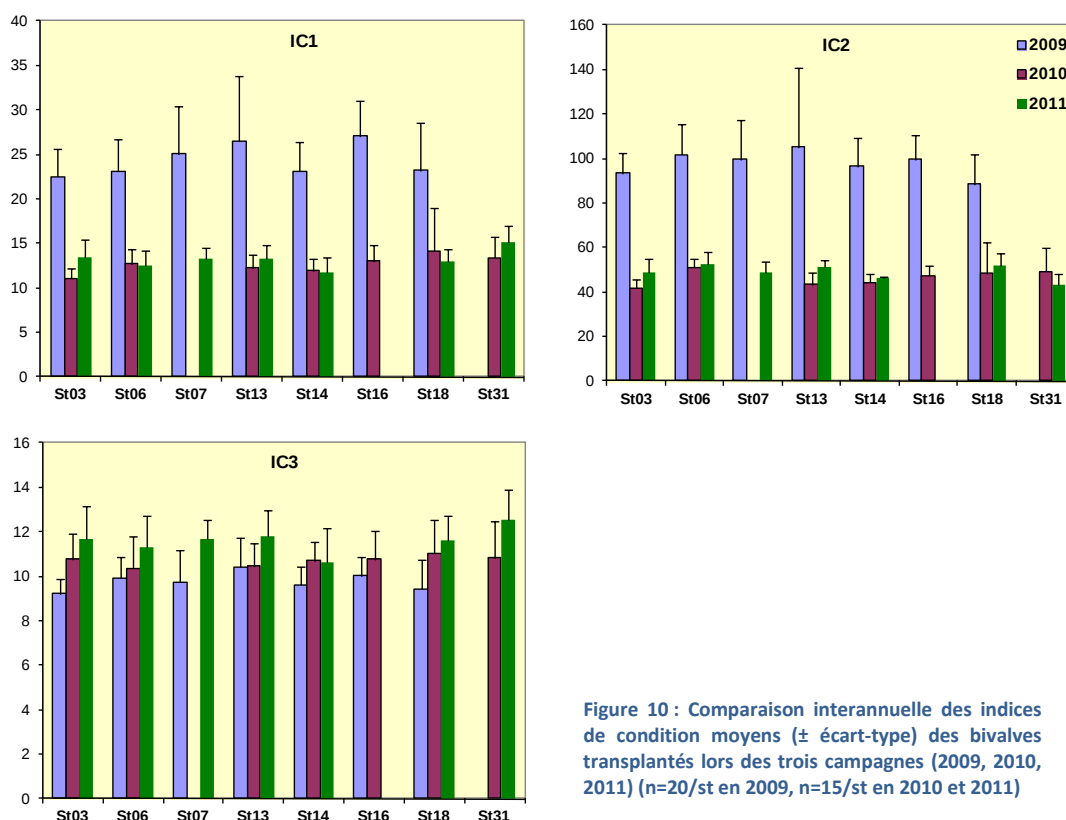


Figure 10 : Comparaison interannuelle des indices de condition moyens ($\pm$ écart-type) des bivalves transplantés lors des trois campagnes (2009, 2010, 2011) (n=20/st en 2009, n=15/st en 2010 et 2011)

Ce qu'il faut retenir :

Après trois mois de transplantation, les bivalves montrent une condition physiologique globale relativement proche de celle observée avant l'immersion et assez homogène entre les différentes stations, à l'exception des stations St31-Nouaré et St14-Goro. Cette dernière station se caractérise par des valeurs d'IC et d'IGS légèrement plus faibles. Les indices obtenus en 2011 sont très proches de ceux calculés en 2010 et nettement inférieurs à ceux trouvés en 2009. Ces résultats traduisent une relative homogénéité des conditions environnementales lors des deux dernières campagnes ; ces conditions apparaissent en revanche significativement différentes de celles régnant lors de la première campagne de 2009.

CONCENTRATIONS EN METAUX 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 2011 est représentée à la Figure 11. Afin d'éliminer d'éventuels biais liés à la présence ponctuelle de valeurs anormales dans certains lots, les comparaisons sont réalisées sur la base des valeurs médianes plutôt que des moyennes.

- Arsenic** : Après trois mois d'immersion, les concentrations médianes les plus basses ont été mesurées dans les lots des stations St03-Port Boisé (39,8 µg/g), St18-Casy (43,1 µg/g), St13-Ouen (43,6 µg/g) St31-Nouaré (44,1 µg/g), puis St06-Kwé (46,0 µg/g). Ces concentrations sont similaires voire légèrement inférieures à celle du lot initial témoin (avant transplantation), soit 45,5 µg/g. En revanche, les concentrations mesurées aux stations St14-Goro (48,2 µg/g) puis St07-Ioro (48,6 µg/g) sont très légèrement supérieures à celle du lot étudié avant transplantation. Après transplantation, une différence significative (KW, $p=0,026$) des concentrations en As s'observe entre les stations. Ces concentrations sont comprises dans la gamme des valeurs précédemment mesurées chez des spécimens transplantés ou résidents dans différentes zones côtières proches de Nouméa ([Hédouin, 2006](#) ; [Breau et al., 2009b](#)).
- Cobalt** : les concentrations médianes mesurées en fin de transplantation sont de 0,33 µg/g en St31-Nouaré, 0,39 µg/g en St06-Kwé, St07-Ioro et St13-Ouen, et 0,44 à 0,46 µg/g en St03-Port Boisé, St14-Goro et St18-Casy, respectivement. Ces concentrations sont similaires (St06-Kwé, St07-Ioro, St13-Ouen) ou supérieures (St03-Port Boisé, St14-Goro et St18-Casy) à celle du lot initial avant transplantation (0,40 µg/g). Les différences de concentrations observées entre les lots des sept stations en fin de transplantation ne sont cependant pas statistiquement significatives (KW, $p=0,127$). Ces concentrations sont caractéristiques de zones soumises à de faibles apports en Co ([Breau, 2003](#) ; [Hédouin, 2006](#) ; [Breau et al., 2009b](#)).
- Chrome** : Les valeurs médianes s'échelonnent entre 1,3 µg/g en St31-Nouaré et St07-Ioro, 1,7 µg/g en St13-Ouen, 1,9-2,0 µg/g en St06-Kwé et St03-Port Boisé (respectivement), et 2,1 µg/g en St14-Goro et St18-Casy. Ces valeurs moyennes sont toutes supérieures à celle du lot initial, soit 1,0 µg/g. Des différences de concentrations significatives (KW, $p=0,010$) apparaissent entre les stations après immersion, entre le lot de la station St31-Nouaré et ceux transplantés en St03, St06, St14 et St18 ainsi qu'entre le lot St07-Ioro et ceux des stations St03 et St14. Comme pour le cobalt, ces concentrations reflètent l'existence d'apports en Cr relativement faibles ([Breau, 2003](#) ; [Hédouin, 2006](#) ; [Breau et al., 2009b](#)).
- Cuivre²** : les concentrations médianes après transplantation sont comprises entre 6,5 et 6,9 µg/g aux stations St31-Nouaré, St14-Goro, St07-Ioro et St03-Port Boisé, respectivement, et de 7,6 à 8,1 µg/g en St06-Kwé, St13-Ouen et St18-Casy, respectivement. Les concentrations du premier groupe de stations sont quasi similaires à celle du lot initial, soit 6,4 µg/g ; celles des lots St06, St13 et St18 sont en revanche supérieures aux valeurs initiales. Après les trois mois d'immersion, des différences

significatives de concentrations (KW, $p=0,005$) apparaissent entre les stations, notamment entre les lots St13-Ouen ainsi que St18-Casy et ceux de St03-Port Boisé, St07-Ioro, St14-Goro et St31-Nouaré. Ces valeurs sont typiques d'apports relativement faibles (Breau, 2003 ; Hédouin, 2006 ; Breau *et al.*, 2009b).

- **Fer**: Les valeurs médianes sont de 128 µg/g en St31-Nouaré, de 138-139 µg/g en St18-Casy et St07-Ioro, de 142 µg/g en St13-Ouen, de 145 µg/g en St03-Port Boisé, et de 152-154 µg/g en St06-Kwé et St14-Goro, respectivement. Contrairement aux autres métaux, ces valeurs obtenues après transplantation sont toutes inférieures à celle mesurée avant l'immersion des lots, soit 170 µg/g. Les concentrations mesurées en fin de transplantation ne présentent aucune différence significative entre les stations à l'exception du lot St31-Nouaré, dont les valeurs sont inférieures à celles des lots St03-Port Boisé ($p=0,09$), St06-Kwé et St14-Goro ($p=0,03$). Ces concentrations indiquent que les apports en fer sont très faibles (Breau, 2003 ; Breau *et al.*, 2009b).
- **Manganèse**² : les concentrations médianes obtenues après transplantation montrent une variabilité spatiale assez marquée (du simple au double), avec des valeurs comprises entre 15,4 µg/g (St31-Nouaré), 20,5-21,5 µg/g (St03-Port Boisé et St07-Ioro, respectivement), 24,3 µg/g (St06-Kwé), 29,6-30,9 µg/g (St18-Casy et St13-Ouen, respectivement), et 36,9 µg/g (St14-Goro). La différence entre les concentrations des spécimens transplantés en St31 et ceux des stations St13-Ouen, St14-Goro et St18-Casy est statistiquement significative ($p=0,004$ à $p=0,016$) mais ne l'est pas avec les autres stations ($p>0,05$). Les concentrations mesurées sont similaires (St03 et St07) ou supérieures (notamment St14 puis St13 et St18) à celle mesurée avant transplantation ; seul le lot St31-Nouaré montre une valeur inférieure à la valeur initiale. Les concentrations mesurées dans les lots des stations St03, St06, St07 et St31 sont caractéristiques d'apport relativement faibles ; celles obtenues en St13, St14 et St18 significatifs mais modérés (Breau, 2003 ; Hédouin, 2006 ; Breau *et al.*, 2009b).
- **Nickel** : les concentrations médianes en fin de transplantation montrent une faible variabilité spatiale, avec des valeurs comprises entre 1,8-1,9 µg/g (St31-Nouaré et St13-Ouen, respectivement), 2,0 µg/g (St06-Kwé et St07-Ioro) et 2,2-2,3 µg/g (St14-Goro, St18-Casy et St03-Port Boisé). Seul le lot immergé en St31-Nouaré montre des concentrations significativement inférieures à celles des lots St03 ($p=0,022$), St14 ($p=0,014$) et St18 ($p=0,048$). Ces valeurs sont similaires ou inférieures à celle du lot initial avant transplantation, soit 2,3 µg/g. Ces valeurs sont indicatrices d'apports très faibles (Breau, 2003 ; Hédouin, 2006 ; Breau *et al.*, 2009b).
- **Zinc** : les valeurs médianes sont comprises entre 631-679 µg/g (St31-Nouaré, St03-Port Boisé et St13-Ouen) et 712 à 771 µg/g (St18-Casy, St06-Kwé, St07-Ioro et St14-Goro, respectivement). Ces valeurs sont similaires ou inférieures à celle du lot initial, soit 735 µg/g. La variabilité géographique des concentrations mesurées en fin de transplantation n'est statistiquement significative qu'entre le lot St31-Nouaré et celui de la station St06-Kwé ($p=0,039$). Ces concentrations reflètent une quasi absence d'apport en Zn (Breau, 2003 ; Hédouin, 2006 ; Breau *et al.*, 2009b).

² Comme indiqué précédemment, les concentrations en Cu et Mn sont supposées être légèrement sous-estimées (12 %) par rapport aux valeurs réelles ; la comparaison relative des concentrations de chaque lot entre stations reste cependant pertinente, les échantillons ayant été préparés puis analysés lors de séries successives.

Ce qu'il faut retenir :

Après trois mois de transplantation, les concentrations mesurées dans le lot de bivalves immergé à la station St31-Nouaré sont presque systématiquement inférieures à celles obtenues aux autres stations ; la nouvelle position de cette station par rapport à 2010 apparaît donc plus pertinente en tant que station de référence.

Les stations montrant le plus souvent les concentrations parmi les plus élevées sont la St14-Goro (sauf pour le cuivre) puis la St18-Casy (sauf pour l'arsenic, le fer et le zinc). La station St13-Ouen se distingue par ses concentrations en Cu et en Mn les plus élevées après celles mesurées en St14 (Mn) ou St18 (Cu).

Les comparaisons des concentrations mesurées en fin de transplantation avec d'une part celles du lot initial non transplanté et d'autre part avec les valeurs précédemment obtenues chez des spécimens transplantés et/ou résidents dans différents sites côtiers du lagon sud-ouest permettent d'évaluer l'importance des apports des différents métaux sous forme biodisponible pour cette espèce. La similitude, voire la diminution des concentrations en métaux entre le début et la fin de la période de transplantation indique que les apports en métaux à la plupart des stations étudiées sont relativement faibles et similaires à ceux du site de récolte initial, ce que confirme l'étude comparative avec les données des études antérieures. L'augmentation plus ou moins marquée des concentrations en Co, Cr, Cu et Mn dans les bivalves des stations St03-Port Boisé (Co, Cr), St13-Ouen (Cr, Cu, Mn), St14-Goro (Co, Cr, Mn) et St18-Casy ((Co), Cr, Cu, Mn) après transplantation révèle l'existence d'apports significatifs mais relativement modérés, ce que confirme également la comparaison de ces valeurs avec les données des précédents travaux de recherche.

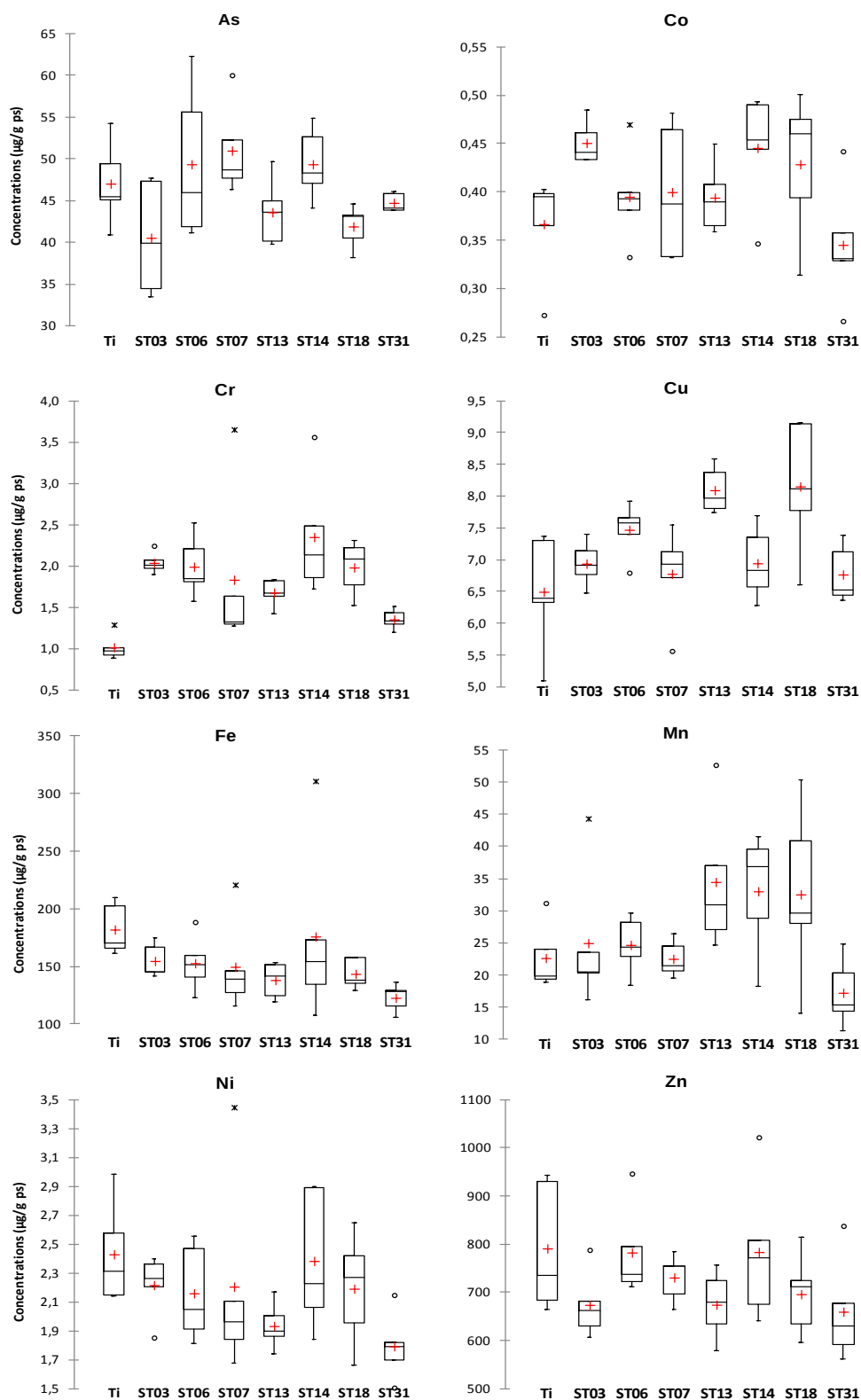


Figure 11 : Variabilité des concentrations en métaux chez le bivalve *Isognomon isognomon* lors de la campagne de transplantation 2011 (n=5 lots de 3 spécimens/station). (Les rectangles représentent la distribution de 50 % des données ; à l'intérieur, la croix rouge représente la moyenne et le trait horizontal la valeur médiane des données. Ti : lot initial).

VARIABILITE TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS

Les concentrations moyennes obtenues lors de cette campagne 2011 ont été comparées à celles des campagnes précédentes de 2009 ([Breau et al., 2009c](#)) et 2010 ([Breau et al., 2010b](#)) afin d'étudier l'évolution temporelle interannuelle des concentrations de chaque métal étudié à chacune des stations de suivi (Figure 12).

- Arsenic** : les concentrations moyennes obtenues lors de la dernière campagne sont systématiquement inférieures à celles des deux précédentes campagnes. Les diminutions les moins marquées s'observent aux stations St06-Kwé et St14-Goro, avec des valeurs respectivement 7 et 8 % plus faibles qu'en 2010, et 11 et 16 % par rapport à 2009. En St07-Ioro, une légère diminution de 10 % est constatée par rapport en 2009 (cage perdue en 2010). Les concentrations aux stations St13-Ouen, St18-Casy et St03-Port Boisé ont diminué respectivement de 15 à 18 % par rapport à 2010, et de 21 à 31 % par rapport à 2009. La plus forte diminution (33 % par rapport à 2010) est observée à la station St31-Nouaré. Sur l'ensemble des résultats obtenus lors des différentes campagnes (n=3 pour St03-Port Boisé, St06-Kwé, St13-Ouen, St14-Goro et St18-Casy ; n=2 pour St07-Ioro, St16-Port Vale et St31-Nouaré), la variabilité des concentrations moyennes en As (exprimée par le coefficient de variation) est comprise entre 1 à 9 % (St16, St06, St07, St14), 12 à 18 % (St13, St18 et St03) et 28 % (St31).
- Cobalt** : contrairement à l'arsenic, les concentrations moyennes en cobalt ont augmenté de 29 % en St06-Kwé, de 57 % en St18-Casy, de 69-71 % en St03-Port Boisé et St13-Ouen (respectivement), et de 84 % en St14-Goro par rapport à 2010 (pas de comparaison possible pour les stations St07-Ioro et St16-Port Vale suite à la perte des cages). Seul le lot de la station St31-Nouaré (dont la position a pourtant été déplacée en 2011) montre une concentration moyenne similaire à celle de 2010. Contrairement aux autres métaux, les concentrations moyennes obtenues en 2011 sont en revanche quasiment identiques à celles de 2009 aux stations St03, St06, St07, St13 et St14 ; seule la station St18-Casy se distingue par sa concentration moyenne 86 % plus élevée en 2011 par rapport à 2009. Cette faiblesse des concentrations en cobalt en 2010 par rapport à 2009 et 2011 pourrait en partie être liée (mais pas uniquement, d'après l'ampleur des différences observées) à la sous-estimation analytique des teneurs en Co constatée en 2010 (justesse de 76 %, [Breau et al., 2010b](#)). La variabilité interannuelle globale des concentrations moyennes en Co (généralement très faible entre 2009 et 2011) est donc significativement augmentée sous l'effet des valeurs de 2010 ; les coefficients de variation sont de 3 % en St07-Ioro et St31-Nouaré, de 15 % en St06-Kwé et de 27 à 34 % pour les autres stations.
- Chrome** : l'évolution interannuelle des concentrations moyennes en chrome est plus variable. Aux stations St03-Port Boisé, St13-Ouen et St18-Casy, les concentrations moyennes de 2011 sont quasi similaires à celles de 2010 (augmentations inférieures à 15 %) ; en St06-Kwé et St31-Nouaré, les concentrations de 2011 sont inférieures (de 19 % et 56 %, respectivement) à celles de 2010, tandis qu'à la station St14-Goro, une augmentation de 61 % est constatée en 2011. A l'exception de cette dernière station (ainsi que pour St16-Port : cage non retrouvée en 2011, et St31-Nouaré : pas de donnée en 2009), les concentrations moyennes obtenues lors de la campagne de 2011 sont inférieures de 11-12 % (St06-Kwé et St18-Casy) à 27-30 % (St03-Port Boisé et St07-Ioro, respectivement) à celles de 2009 sur ces mêmes stations. La variabilité interannuelle des

concentrations moyennes en Cr est de 8-10 % en St06-Kwé et St18-Casy, de 21 à 25 % en St03-Port Boisé, St07-Ioro, St13-Ouen et St14-Goro et de 55 et 62 % en St31-Nouaré et St16-Port Vale, respectivement (2 campagnes uniquement). La valeur élevée calculée pour St31 s'explique cependant par le déplacement de la position de la station entre les deux campagnes.

- **Cuivre** : les tendances interannuelles observées pour ce métal sont identiques à toutes les stations. Les concentrations moyennes obtenues en 2011 sont légèrement supérieures (de 15 % en St14-Goro à 41 % en St06-Kwé) à celles de 2010, mais sont significativement inférieures (de 35-40 % en St06-Kwé, St14-Goro et St13-Ouen, respectivement, à 48-50 % en St03-Port Boisé, St07-Ioro et St18-Casy) à celles de 2009. Cette différence marquée entre la première campagne de 2009 et les deux suivantes induit une variabilité globale plus forte que les autres métaux, soit des coefficients de variation de 13 % (St31-Nouaré) à 50-52 % (St03-Port Boisé et St18-Casy). La cage de la station St16-Port n'ayant pas été retrouvée, cette troisième campagne ne permet en outre pas d'établir si la contamination en cuivre détectée à cette station lors de la précédente campagne est toujours présente en 2011 ou non.
- **Fer** : les tendances interannuelles des concentrations moyennes en fer suivent étroitement celles observées pour le chrome. Seule une petite différence apparaît à la station St06-Kwé, où la concentration moyenne en Fe en 2011 est identique à celle de 2010, alors que celle du chrome était légèrement inférieure. La variabilité globale des concentrations moyennes en Fe est comprise entre 9 et 19 % pour toutes les stations sauf St31-Nouaré (28 %) et St16-Port Vale (38 %).
- **Manganèse** : malgré une légère augmentation de 2009 à 2011, les concentrations moyennes en Mn ne diffèrent pas significativement entre ces trois années aux stations St03-Port Boisé et St06-Kwé. Une augmentation plus marquée de la concentration moyenne s'observe en revanche aux stations St13-Ouen (de 90 % entre 2010 et 2011, et de 65 % entre 2009 et 2011) et St14-Goro (de 43 % entre 2009 et 2011, et de 52 % de 2010 à 2011). A la station St18-Casy, la concentration moyenne de 2011 est identique à celle de 2009, ces deux valeurs étant supérieures d'environ 50 % par rapport à celle de 2010. Aux stations St07-Ioro et St31-Nouaré, les concentrations moyennes de 2011 sont respectivement inférieures de 14 % et de 23 % par rapports aux valeurs de 2009 (Ioro) et 2010 (Nouaré). Les coefficients de variation des concentrations moyennes sur les différentes campagnes sont de 8 et 11 % en St03, St06 et St07, de 18 à 24 % en St31, St18 et St14, et de 36 et 59 % pour St13 et St16, respectivement.
- **Nickel** : les concentrations moyennes en Ni montrent globalement les mêmes tendances interannuelles que le fer et le chrome sur l'ensemble des stations, avec des valeurs en légère hausse par rapport à celles de 2010 en St18-Casy (8 %), en St13-Ouen et en St03-Port Boisé (16 et 17 % respectivement) et une augmentation plus nette en St14-Goro (52 %). Une très légère diminution (7 %) non significative s'observe en St06-Kwé, tandis que celle en St31-Nouaré est plus marquée (35 %) entre 2010 et 2011. Les concentrations moyennes en Ni obtenues lors des deux dernières campagnes sont toutes inférieures à celles de 2009 (de 23 % en St06 et St14 à 52 % en St18). Cette différence induit une variabilité globale interannuelle assez marquée, le plus souvent comprise entre 14 % (St06-Kwé) et 30 % (St03, St14 et St31).

- **Zinc** : à l'exception de la station St31-Nouaré, les concentrations moyennes obtenues en 2011 sont pour la plupart légèrement supérieures (de 8 % en St13-Ouen à 20-25 % aux autres stations) à celles de la campagne de 2010, mais sont toutes inférieures (de 17 % en St14-Goro à 25 % en St13-Ouen) à celles de 2009, sauf en St06-Kwé où elles sont identiques. La variabilité globale des concentrations en Zn s'échelonne de 4-9 % (St31-Nouaré et St06-Kwé) à 25 % (St03-Port Boisé et St18-Casy).

Ce qu'il faut retenir :

L'évolution temporelle interannuelle des concentrations en métaux chez les bivalves transplantés varie selon le métal et la station considérés. A l'exception de l'arsenic, les concentrations moyennes en métaux mesurées lors de la dernière campagne de 2011 sont globalement en augmentation par rapport à celles de la précédente campagne de 2010. Cette augmentation est le plus souvent relativement peu marquée, sauf pour le cobalt. En revanche, les concentrations moyennes en métaux obtenues en 2011 sont dans la plupart des cas (sauf pour le cobalt et le manganèse) inférieures à celles mesurées en 2009. Bien que la variation relative (exprimée en pourcentage) de ces concentrations moyennes soient parfois élevée, ces différences interannuelles sont le plus souvent peu marquées voire probablement non significatives pour la plupart des métaux au regard de la variabilité interne à chaque lot (parfois non négligeable) (ces résultats n'ont cependant pas été comparés statistiquement en raison de la forte différence d'effectifs entre la campagne de 2009 (n=20/station) et les deux campagnes suivantes (n=5 pools/station)) ; l'amplitude est en revanche plus importante pour le cuivre et dans une moindre mesure le nickel. De même, les valeurs moyennes de la campagne 2010 sont quasi systématiquement inférieures à celles de 2009 (sauf pour le manganèse).

De telles différences de résultats entre les campagnes de 2010 et 2011 et celle de 2009 sont également observées pour les indices de condition physiologique IC1 et IC2, pour lesquels des valeurs significativement plus élevées avaient été trouvées en 2009 alors qu'elles sont quasi identiques entre 2010 et 2011. Des relations entre l'indice de condition et la bioaccumulation de certains métaux ont précédemment été identifiées chez la moule *Mytilus galloprovincialis* transplantée en Méditerranée (Andral *et al.*, 2004), chez laquelle les concentrations en métaux sont d'autant plus fortes que l'indice de condition est bas ; le constat est cependant opposé dans notre cas, les concentrations les plus élevées (2009) correspondant aux indices les plus élevés.

L'ensemble de ces résultats suggère l'existence de conditions environnementales particulières, soit lors de la campagne de 2009, soit lors des deux dernières campagnes, ayant induit les différences de condition physiologique et de bioaccumulation observées chez certains métaux (cuivre et nickel notamment). La différence de température de l'eau d'environ 2°C observée lors de la première partie de campagne de 2009 par rapport aux deux suivantes (Figure 5) pourrait constituer un début d'explication. D'autres causes doivent cependant probablement être recherchées ; les résultats de la future campagne de 2012 permettront de préciser si les valeurs obtenues sur les trois premières années du suivi correspondent à une réelle et parfois forte variabilité interannuelle (limitant ainsi la sensibilité de la méthode en présence d'apports de faible importance), ou si l'une des situations observées apparaît comme inhabituelle (ce que seule l'étude d'une série temporelle sur plusieurs années permettra de déterminer).

Les résultats obtenus indiquent dans tous les cas que le début du rejet industriel dans le Canal de la Havannah n'a pas induit d'augmentation des concentrations en métaux dans les bivalves transplantés par rapport à l'état initial précédemment établi en 2009.

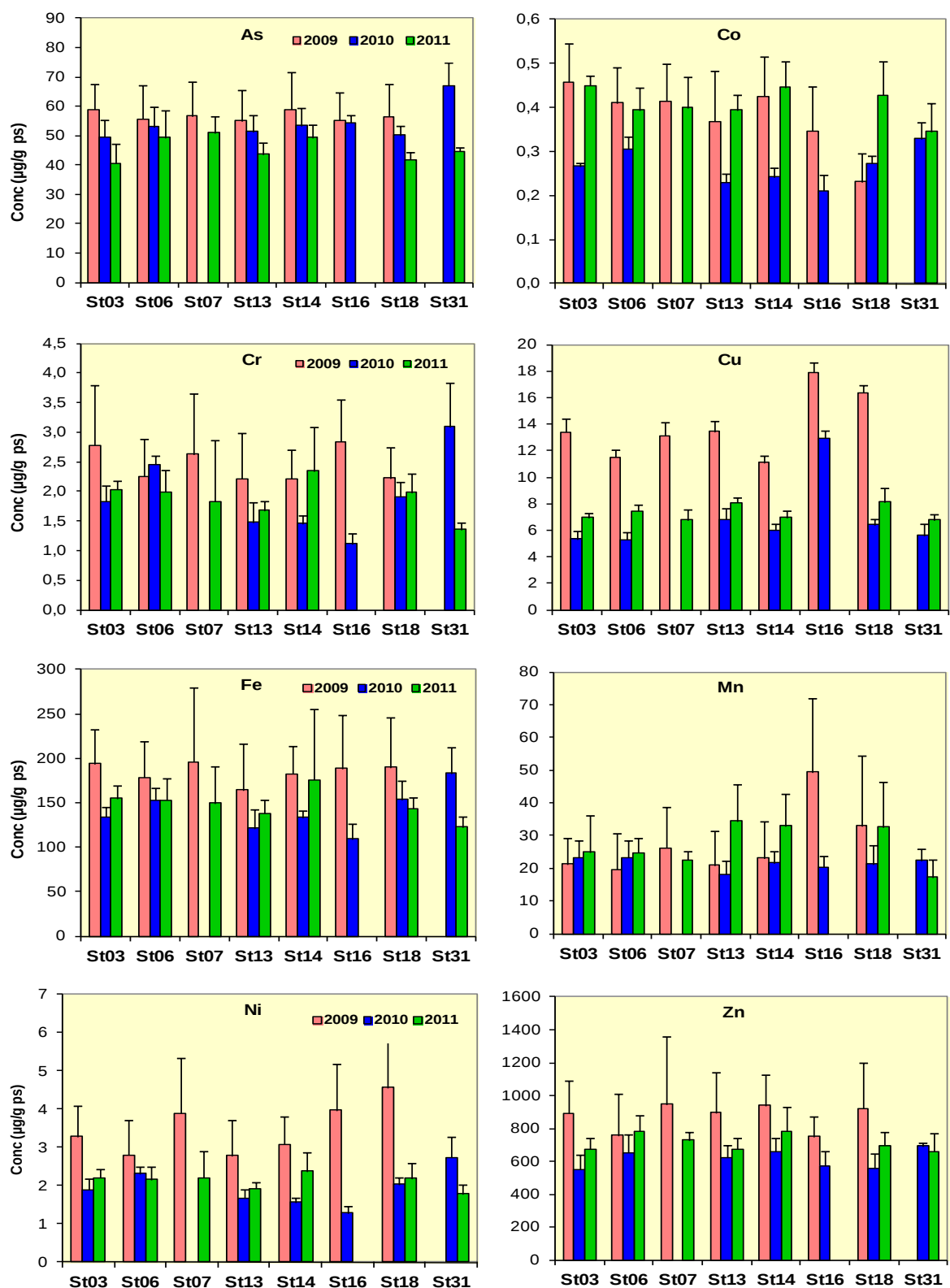


Figure 12 : Evolution temporelle (interannuelle) des concentrations moyennes ($\pm$ écart-type) des métaux analysés dans les chairs entières du bivalve *Isognomon isognomon* transplantés sur les diverses stations de suivi lors des campagnes de 2009 (n=20 spécimens), 2010 et 2011 (n=5 pools/station).

CONCENTRATIONS EN METAUX DANS LES MACROALGUES

NIVEAUX DE CONCENTRATION

La variabilité des concentrations en métaux mesurées dans les pools de frondes algales lors de la campagne de transplantation de 2011 est représentée à la Figure 13. Comme précédemment avec les bivalves, les comparaisons sont réalisées sur la base des valeurs médianes plutôt que des moyennes afin d'éliminer d'éventuels biais liés à la présence ponctuelle de valeurs trop éloignées des autres.

- Arsenic** : les concentrations médianes obtenues après trois mois de transplantation varient de 33-34 µg/g en St18-Casy, St13-Ouen et St14-Goro, 36-37 µg/g en St03-Port Boisé et St06-Kwé, jusqu'à 38,7 µg/g en St07-loro. Ces concentrations sont toutes assez nettement supérieures (et statistiquement significatives pour St03, St06 et St07 ; $p \leq 0,01$) à celle du lot initial avant transplantation (soit 25,9 µg/g), ce qui révèle la présence d'apports significatifs en As dissous dans la zone d'étude. Ceci est en outre confirmé par l'étude comparative de ces résultats avec les données antérieurement acquises chez cette espèce ([Hédouin, 2006](#) ; [Breau et al., 2009b](#)) montrant que de telles concentrations reflètent l'existence d'apports significatifs mais relativement modérés en As dissous. Seules les lots des stations St07-loro et St18-Casy présentent des différences significatives de concentrations après transplantation (KW, $p=0,02$).
- Cobalt** : les concentrations médianes en Co sont de 4,0 µg/g en St07-loro, de 5,3 µg/g en St13-Ouen, de 6,2 µg/g en St03-Port Boisé, St14-Goro et St18-Casy, et de 6,8 µg/g en St06-Kwé. Une nette augmentation des concentrations après transplantation est constatée à toutes les stations (sauf en St07-loro, à laquelle l'augmentation est plus faible) par rapport au lot initial (2,5 µg/g), indiquant l'existence d'apports en Co dissous biodisponibles pour les algues dans la zone d'étude (notamment près des côtes). Toutes ces valeurs sont en outre du même ordre de grandeur que celles précédemment mesurées dans des algues résidentes ou transplantées dans des zones soumises à des apports en Co significatifs mais modérés ([Breau, 2003](#) ; [Hédouin, 2006](#) ; [Breau et al., 2009b](#)).
- Chrome** : Les concentrations en chrome montrent une importante variabilité spatiale en fin de transplantation, avec des valeurs médianes de 10,5 µg/g en St07-loro et St13-Ouen, de 12,8 µg/g en St03-Port Boisé, de 19,1 µg/g en St06-Kwé, de 21,4 µg/g en St14-Goro et de 24,0 µg/g en St18-Casy. Ces valeurs sont 3 à 7 fois supérieures à celle du lot étudié avant transplantation, confirmant l'importance des apports naturels en chrome dissous d'origine terrestre. Comme pour le cobalt, les valeurs obtenues sont en outre représentatives de zones soumises à des apports en Cr significatifs mais modérés ([Breau, 2003](#) ; [Hédouin, 2006](#) ; [Breau et al., 2009b](#)).

- **Cuivre:** après trois mois d'immersion, les concentrations médianes en cuivre varient de 2,2 µg/g en St03-Port Boisé et St06-Kwé, 2,4 µg/g en St07-Ioro, 3,0 µg/g en St13-Ouen et St14-Goro, et 3,6 µg/g en St18-Casy. Ces valeurs, bien que très légèrement sous-estimées³, sont caractéristiques d'algues vivant dans des zones ne recevant pas d'apports significatifs en cuivre dissous (Breau, 2003 ; Hédouin, 2006 ; Breau *et al.*, 2009b). Le lot de la station St18-Casy montre cependant des concentrations significativement supérieures (KW, $p < 0,01$ à $p = 0,26$) à celles des lots St03, St06 et St07, indiquant tout de même la présence de faibles apports en cuivre à cette station. Contrairement aux autres métaux, toutes ces valeurs sont très inférieures à celle du lot avant transplantation, dont la concentration médiane est de 6,8 µg/g et est typique de zones soumises à des apports en Cu significatifs mais relativement modérés d'après les études citées précédemment. Ces observations sont opposées à celles faites chez les bivalves pour ce même métal, pour lesquels les concentrations mesurées après transplantation étaient dans la plupart des cas similaires ou légèrement supérieures à celles obtenues pour le lot initial. Ces résultats confirment une nouvelle fois l'existence d'une légère contamination du site de récolte initiale (la Baie Maa) par du cuivre sous forme dissoute spécifiquement biodisponible pour les algues mais pas pour les bivalves. Une telle contamination exclusivement dissoute a en effet pu être détectée à plusieurs reprises grâce à l'analyse des algues de cette baie lors des précédents travaux de recherche ayant conduit à la mise au point de la méthode avec des espèces locales (e.g. Breau, 2003 ; Hédouin, 2006 ; Breau *et al.*, 2009b). La réimmersion des algues dans un milieu (la zone sud) contenant moins de cuivre que le site de récolte initial a donc entraîné une élimination progressive du cuivre précédemment accumulé dans les tissus algaux. Par ailleurs, la perte de la cage de la station St16-Port Vale ne permet malheureusement pas de confirmer l'importance de la contamination en cuivre de la zone portuaire précédemment détectée lors de la précédente campagne.
- **Fer :** les concentrations médianes varient de 579 µg/g en St07-Ioro, 629 µg/g en St06-Kwé et 662 µg/g en St03-Port Boisé, à 811 µg/g en St18-Casy, 987 µg/g en St14-Goro et 1013 µg/g en St13-Ouen. Ces résultats se caractérisent par une assez forte variabilité des concentrations au sein de chaque lot et ne diffèrent pas significativement de ceux du lot initial (652 µg/g) (KW, $p = 0,892$). Les valeurs obtenues sont en outre typiques de zones soumises à des apports en Fe modérés (Breau, 2003 ; Breau *et al.*, 2009b).
- **Manganèse³ :** après transplantation, les concentrations médianes s'échelonnent de 27,2 µg/g en St07-Ioro à 37,1 µg/g en St18-Casy (30,8 µg/g en St03-Port Boisé ; 31,3 µg/g en St13-Ouen ; 33,9 µg/g en St14-Goro ; 35,0 µg/g en St06-Kwé). Toutes ces valeurs sont inférieures à celle du lot d'algues analysé avant la transplantation, révélant comme l'année précédente que les apports en Mn dissous sont supérieurs dans le site de référence par rapport aux stations de suivi de la zone sud et qu'une élimination progressive du manganèse accumulé dans les tissus s'opère pendant les trois mois d'immersion. Les concentrations mesurées reflètent des apports en Mn dissous relativement faibles (Breau, 2003 ; Hédouin, 2006 ; Breau *et al.*, 2009b).

³ Comme indiqué précédemment, les concentrations en Cu et Mn sont supposées être très légèrement sous-estimées (12 %) par rapport aux valeurs réelles ; la comparaison relative des concentrations de chaque lot entre stations reste cependant pertinente, les échantillons ayant été préparés puis analysés lors de séries successives.

- **Nickel** : les concentrations montrent une variabilité spatiale assez marquée, avec des valeurs de 9,7 µg/g en St13-Ouen, 10,2 µg/g en St07-Ioro et 10,9 en St03-Port Boisé à 15,6 µg/g en St06-Kwé, 17,8 µg/g en St14-Goro et 20,9 µg/g en St18-Casy. Ces valeurs sont supérieures à celle des algues témoins analysées avant immersion (soit 5,2 µg/g) et reflètent l'existence d'apports en nickel dissous d'origine terrestre, en particulier dans la Baie de Prony (St18), la Baie de Goro (St14) et la Baie Kwé (St06). La comparaison de ces données avec les résultats acquis précédemment chez des lots d'algues résidentes ou transplantées dans d'autres zones indiquent que ces apports sont toutefois modérés (Breau, 2003 ; Hédouin, 2006 ; Breau *et al.*, 2009b).
- **Zinc** : après trois mois d'immersion, le lot d'algues de la station St14-Goro se distingue des autres par sa plus forte concentration médiane, soit 14,2 µg/g. Les valeurs médianes des autres stations s'échelonnent de 7,5-7,9 µg/g respectivement en St03-Port Boisé et St13-Ouen, et 8,3 µg/g (St07-Ioro) à 9,1-10,5 µg/g en St18-Casy et St06-Kwé, respectivement. A l'exception du lot transplanté en St14-Goro, ces concentrations médianes sont toutes nettement inférieures à celle du lot initial, soit 16,3 µg/g. Les concentrations mesurées en St03, St06, St07, St13 et St18 sont caractéristiques de zones ne recevant pas d'apports significatifs en Zn ; celles obtenues en St14 et dans le lot initial de la Baie Maa reflètent l'existence d'apports relativement faibles (Breau, 2003 ; Hédouin, 2006 ; Breau *et al.*, 2009b).

Ce qu'il faut retenir

Après les trois mois d'immersion, les algues des stations St18-Casy montrent les concentrations en Co, Cr, Cu, Mn et Ni parmi les plus élevées, alors que les valeurs pour As sont les plus basses par rapport aux autres stations. Les algues de la station St14-Goro présentent également des concentrations en Co, Cr, Cu, Ni et Zn parmi les plus fortes.

La comparaison des concentrations en fin de transplantation avec celles du lot initial indique que les concentrations en arsenic, cobalt, chrome et nickel ont assez nettement augmenté pendant la période d'immersion, traduisant l'existence d'apports dissous significatifs aux stations du suivi par rapport au site de récolte initial. Au contraire, les concentrations en cuivre, manganèse et zinc ont diminué pendant la transplantation, indiquant que les concentrations de ces trois métaux dissous dans l'eau à proximité des cages sont inférieures à celles du site de récolte initiale, et qu'une élimination progressive des métaux bioconcentrés dans les algues s'est progressivement opérée pendant la durée de transplantation. La comparaison de ces résultats avec les données précédemment acquises chez des *Lobophora variegata* transplantées ou résidentes confirment également que les concentrations en As, Co, Cr, Fe et Ni obtenues sont caractéristiques de zones soumises à des apports significatifs mais relativement modérés en ces métaux. Les concentrations en Cu, Mn et Zn mesurées sont au contraire typiques de zones ne recevant que très peu (Mn) ou quasiment pas d'apports (Cu et Zn).

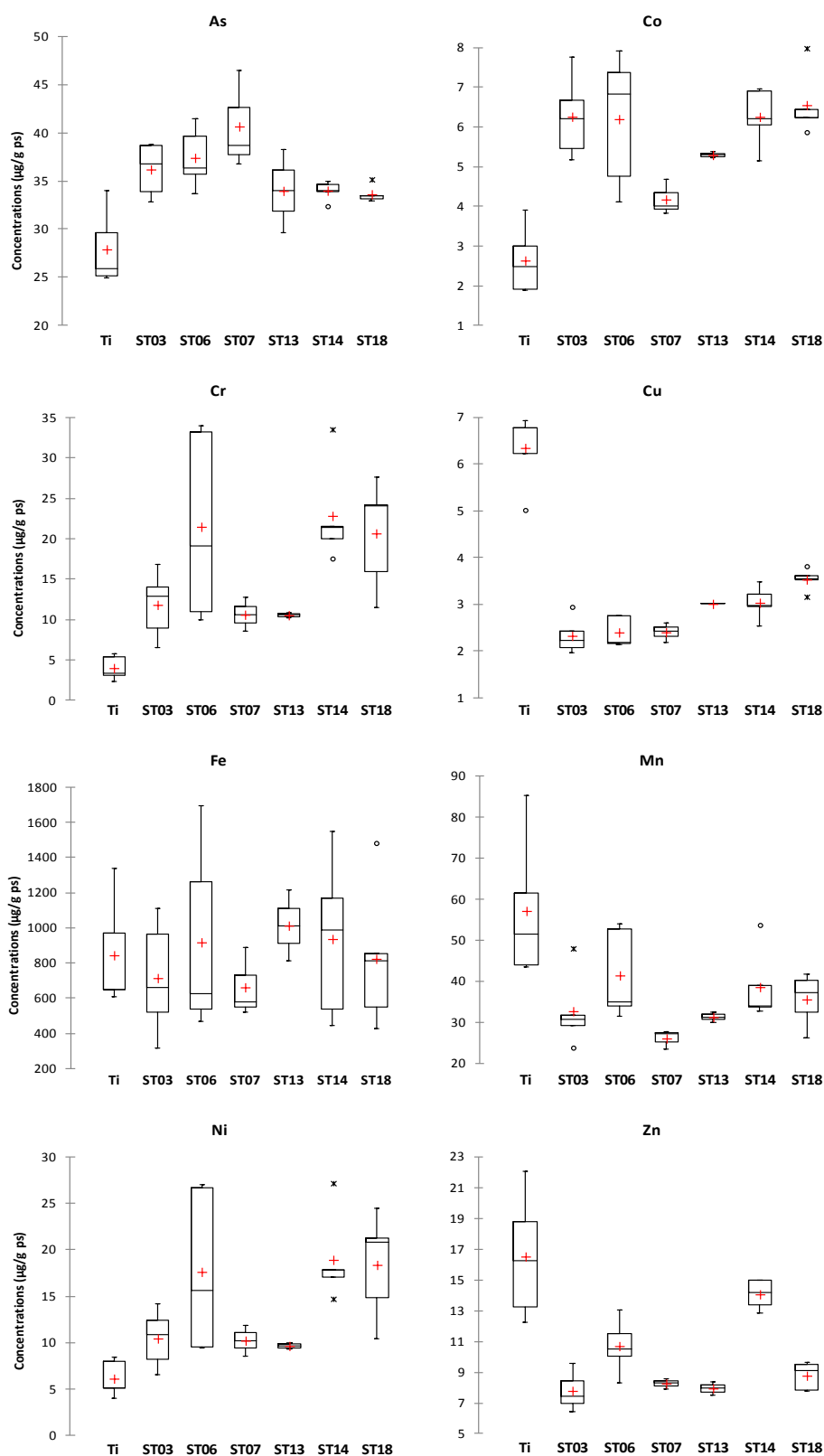


Figure 13 : Variabilité des concentrations en métaux chez la macroalgue brune *Lobophora variegata* lors de la campagne de transplantation 2011 (n=5 lots/station, sauf St13 (2 lots) et St07 (3 lots)).

VARIABILITE TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS

Comme chez les bivalves, les concentrations moyennes obtenues chez les algues lors de cette campagne 2011 ont été comparées à celles des campagnes précédentes de 2009 et 2010 afin d'étudier l'évolution temporelle interannuelle des concentrations de chaque métal étudié à chacune des stations de suivi (Figure 14).

- **Arsenic** : sur les trois campagnes réalisées, la variabilité interannuelle est très faible, avec des coefficients de variation inférieurs ou égaux à 10 % à l'exception de la station St16-Port Vale (variation de 20 % entre 2009 et 2010). En 2011, les concentrations moyennes en As sont similaires ou très légèrement inférieures (jusqu'à 7 %) à celles de 2009 en St03-Port Boisé, St06-Kwé, St07-Ioro, St13-Ouen et St18-Casy ; une diminution un peu plus marquée (19 %) s'observe en St14-Goro. Entre 2010 et 2011, les valeurs moyennes diminuent sensiblement en St03-Port Boisé (15 %) et St14-Goro (10 %) mais sont identiques en St13-Ouen (aucune autre comparaison n'est possible entre ces deux années suite à la perte des cages ou à la disparition des algues transplantées).
- **Cobalt** : L'évolution interannuelle des concentrations moyennes en cobalt observée chez les algues est relativement similaire à celle trouvée chez les bivalves ; elle se caractérise par des écarts généralement faibles entre les valeurs moyennes de 2009 et celles de 2011, et des concentrations plus faibles en 2010. La sous-estimation d'environ 24 % des concentrations en Co en 2010 évoquée précédemment participe aux écarts observés mais ne les explique pas entièrement. Les différences de valeurs entre 2011 et 2009 varient en outre selon la station : aux stations St06-Kwé, St13-Ouen, St18-Casy et St14-Goro, les concentrations moyennes obtenues en 2011 sont supérieures à celles de 2009, mais sont légèrement inférieures pour les stations St03-Port Boisé et St07-Ioro. Seuls les lots des stations St13 et St14 montrent une augmentation des concentrations moyennes en 2011 par rapport à 2009 et 2010.
- **Chrome** : les concentrations moyennes des lots des stations St03-Port Boisé et St07-Ioro sont quasiment similaires entre la campagne de 2011 et celle de 2009 ; les valeurs obtenues en 2010 en St03 ne sont que très légèrement inférieures aux deux autres. Les valeurs moyennes diminuent en revanche de façon plus marquée en St06-Kwé et St18-Casy entre 2009 et 2011, avec toutefois une forte imprécision sur l'ampleur de cette décroissance liée à l'importante variabilité des concentrations au sein des lots de 2009. Pour les stations St13-Ouen et St14-Goro, les concentrations moyennes sont quasiment similaires en 2009 et en 2010 mais augmentent significativement en 2011 (d'un facteur 2 en St13 et d'un facteur 5 en St14).
- **Cuivre** : sur les trois stations comparables entre les campagnes de 2011 et de 2010 (St03-Port Boisé, St13-Ouen et St14-Goro), les concentrations moyennes en cuivre sont quasi similaires en St03 et en St14 et sont en légère diminution (de 33 %) en St13-Ouen. Ces valeurs de 2010 et 2011 sont très significativement inférieures (entre 5 et 11 fois) à celles mesurées en 2009, lesquelles n'ont été précédemment observées que dans des algues transplantées dans des zones significativement contaminées (Breau, 2003 ; Hédouin, 2006). Ces résultats vont dans le même sens que ceux obtenus chez les bivalves, ce qui suggère que le problème rencontré n'est pas spécifique aux algues.
- **Fer** : l'évolution interannuelle des concentrations moyennes à chaque station suit globalement celle du chrome, avec en 2011 des concentrations 2, 4,5 et 5 fois supérieures à celles de 2010 en St03-Port Boisé,

en St14-Goro et en St13-Ouen, et 3 à 5 fois supérieures à celles de 2009 en St14-Goro et St13-Ouen, respectivement. Comme pour le chrome, ces résultats suggèrent une augmentation des apports en Fe dissous biodisponible au niveau des stations St13 et St14. Les concentrations moyennes en Fe en 2009 et 2011 sont très proches en St06-Kwé et St07-Ioro, alors qu'une diminution de moitié apparaît au contraire en St06-Kwé et St18-Casy entre ces deux campagnes, avec cependant une imprécision liée aux forts écart-types calculés pour ces lots.

- **Manganèse** : l'évolution interannuelle des concentrations moyennes en Mn varie selon la station considérée. Les concentrations moyennes en 2011 sont en légère augmentation par rapport à celles de 2010 en St03-Port Boisé et St13-Ouen, et montrent une augmentation plus marquée (2,4 fois) en St14-Goro. Des valeurs moyennes plus élevées (plus de deux fois supérieures) s'observent également dans les lots de St06-Kwé et de St18-Casy en 2011 par rapport à 2009, tandis que les valeurs diminuent au contraire fortement en St03-Port Boisé et St13-Ouen entre ces deux années. Les valeurs de 2009 et 2011 sont relativement similaires en St14-Goro et diminuent très légèrement (16 %) en St07-Ioro.
- **Nickel** : l'évolution interannuelle des concentrations moyennes en Ni est similaire à celle du chrome et du fer.
- **Zinc** : Contrairement à tous les autres métaux, les concentrations moyennes en zinc mesurées en 2011 sont intermédiaires entre les valeurs de 2009 (par rapport auxquelles elles sont supérieures) et celles de 2010 (par rapport auxquelles elles sont inférieures) en St03-Port Boisé, St13-Ouen et St14-Goro. La concentration moyenne observée lors de la campagne de 2011 à la station St06-Kwé est en outre supérieure à celle de 2009, tandis que les valeurs sont quasi similaires en St07-Ioro et St18-Casy.

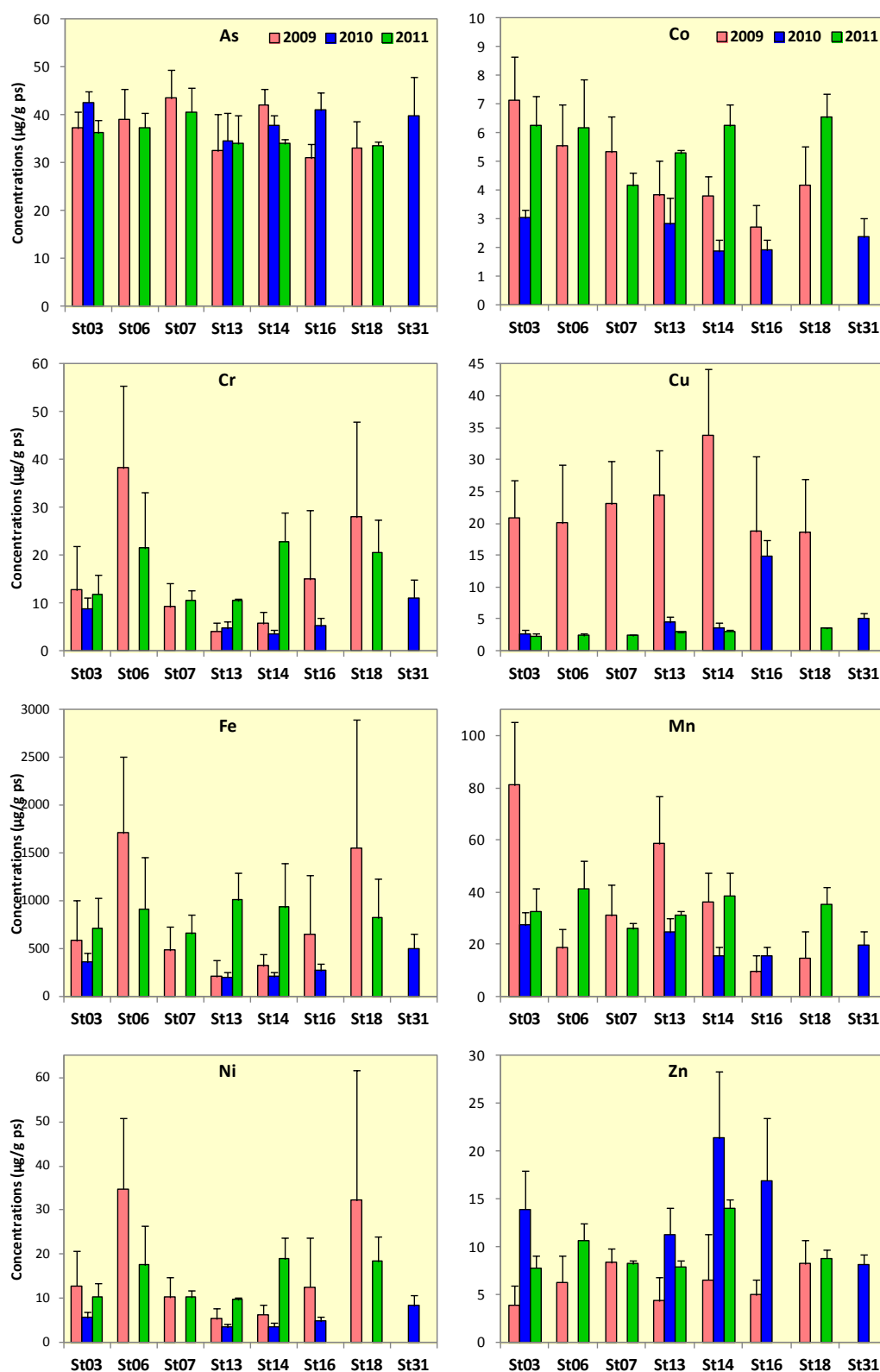


Figure 14 : Evolution temporelle (interannuelle) des concentrations moyennes ($\pm$ écart-type) des métaux analysés dans les frondes des macroalgues *Lobophora variegata* transplantées sur les diverses stations de suivi lors des campagnes de 2009 (n=20 spécimens), 2010 et 2011 (n=5 pools/station).

Ce qu'il faut retenir

L'évolution interannuelle des concentrations en métaux dans les algues transplantées varie selon le métal et la station considérée ; aucune tendance temporelle unique ne se dégage donc de ces résultats.

- L'arsenic est le seul métal pour lequel la variabilité temporelle est très faible, avec des coefficients de variation presque toujours inférieurs ou égaux à 10 %.

- Les concentrations en cobalt montrent une évolution très proche de celle observée chez les bivalves, avec des valeurs en 2009 et 2011 systématiquement supérieures à celles de 2010. Les différences de concentrations entre 2009 et 2011 varient cependant selon les stations. Une augmentation des concentrations moyennes est en particulier observée dans les lots des stations St13-Ouen et St14-Goro en 2011.

- L'évolution temporelle des concentrations en Cr, Fe et Ni est globalement relativement similaire et varie selon les stations. En St03-Port Boisé et St07-Ioro, les valeurs obtenues en 2011 sont similaires à celles de 2009 et sont supérieures à celles de 2010 ; en St06-Kwé et St18-Casy, les concentrations de 2009 sont supérieures à celles de 2011 mais une forte variabilité intra-lot est observée. En St13-Ouen et St14-Goro, les concentrations de 2011 sont supérieures à celles des années précédentes, suggérant une augmentation des apports à ces deux stations.

- Les concentrations en cuivre obtenues en 2010 et 2011 sont similaires ou très proches et sont caractéristiques de milieux ne recevant pas d'apports significatifs. Les concentrations mesurées en 2009 sont au contraire très nettement supérieures et sont typiques de zones significativement contaminées (Breau *et al.*, 2009b), ce qui n'est pas le cas de la zone étudiée ; une tendance similaire ayant été également observée chez les bivalves, l'hypothèse d'un problème analytique non détecté en 2009 est à explorer. Cependant, les indices de condition physiologique calculés chez les bivalves (dont l'obtention est totalement indépendante de celle des concentrations) montrent la même tendance et suggèrent donc que l'année 2009 semble particulière en termes de conditions environnementales par rapport aux deux autres années du suivi.

- L'évolution temporelle des concentrations en manganèse varie selon les stations, avec des valeurs de 2011 similaires à celles de 2010 et nettement inférieures à celles de 2009 en St03-Port Boisé et St13-Ouen, alors qu'elles sont similaires (St07-Ioro et St14-Goro) ou supérieures (St06-Kwé et St18-Casy) à celles de 2009.

- Le zinc est le seul métal dont les concentrations mesurées en 2010 sont supérieures à celles des deux autres campagnes. Les valeurs obtenues en 2009 sont en outre inférieures (St03, St06, St13, St14) ou égales (St07, St18) à celles de 2011.

Bien que plusieurs études de recherche aient précédemment montré sans ambiguïté la pertinence de l'algue *Lobophora variegata* en tant que bioindicateurs de contamination, l'étude des résultats des trois campagnes de transplantation de cette espèce dans la zone sud révèle l'existence d'une variabilité interannuelle parfois forte des concentrations moyennes de la plupart des métaux (à l'exception de l'arsenic). Cette variabilité ne suit aucune tendance similaire entre les métaux et les stations étudiés, et est donc susceptible de rendre difficile la détection d'une éventuelle augmentation des apports en métaux dans le milieu suite aux rejets industriels, à moins que celle-ci soit relativement marquée (problème de sensibilité). Il est donc impératif d'identifier les sources de ces variations (d'origine réellement naturelle ou liée aux méthodes de préparation et d'analyses des échantillons ?) afin de les réduire au maximum. Une étude visant à repreciser la méthodologie est donc envisagée par AEL avant la nouvelle campagne de 2012.

SYNTHESE

Cette troisième campagne de transplantation de bioindicateurs en stations artificielles dans la région sud a permis de préciser un certain nombre d'aspects techniques et scientifiques.

Suite à la perte de la cage installée devant le port commercial de Vale NC (station St16, dont la position avait été déplacée légèrement par rapport aux années précédentes), il apparaît obligatoire de modifier une nouvelle fois sa localisation soit en augmentant la profondeur d'immersion (à environ 15 m de la surface), soit sa position géographique (en l'installant directement à l'extrémité du wharf ?). Le déplacement de la station de référence St31 à la pointe nord de l'îlot Nouaré s'est en revanche révélé judicieux tant sur le plan opérationnel que scientifique, les concentrations mesurées dans les lots de bivalves et d'algues y étant bien moins élevées en 2011 par rapport à 2010.

L'étude biométrique des bivalves entre le début et la fin de la période de transplantation a confirmé que les conditions environnementales régnant à proximité des cages sont propices à la croissance (principalement pondérale) des spécimens. L'importance de cette croissance varie cependant entre les stations, les bivalves des stations St31-Nouaré et St03-Port boisé montrant la croissance pondérale la plus importante. Les taux de croissance sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus lors des deux précédentes campagnes, avec toutefois des différences aux stations St03-Port Boisé et St31-Nouaré.

Une relative homogénéité de la condition physiologique globale des bivalves est observée d'une part entre les lots des diverses stations en fin de transplantation, et d'autre part avec celle du lot témoin non transplanté. Les bivalves de la station St14-Goro se distinguent cependant par des valeurs d'indice gonado-somatique (IGS) et d'indices de condition (IC) légèrement plus faibles que ceux des autres stations. Les indices de condition calculés en 2011 sont relativement similaires à ceux de 2010 mais nettement inférieurs aux indices obtenus en 2009, ce qui suggère une différence de conditions environnementales entre la campagne de 2009 et les deux campagnes suivantes.

Un croisement de ces données avec les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer devra être envisager pour mieux comprendre les phénomènes mentionnés.

Les stations dont les lots de bivalves et d'algues transplantés montrent le plus souvent les plus fortes concentrations en la plupart des métaux analysés sont St06-Kwé, St14-Goro et St18-Casy. Les stations St06 et St18 sont sous influence terrigène ; la station St14 est située à proximité de plusieurs estuaires de rivières (la Trou et la

Kuebini notamment) et reçoit donc des apports terrigènes, mais est également proche de la tribu de Goro et d'éventuels rejets anthropiques. La comparaison des concentrations mesurées dans les bivalves et les algues transplantés d'une part avec celles des lots témoin après récolte (non transplantés) et d'autre part avec les valeurs obtenues lors des précédentes études indique toutefois que les apports en la plupart des métaux sous formes biodisponibles sont parfois significatifs mais demeurent relativement faibles à modérés. Chez les bivalves, l'augmentation plus ou moins marquée des concentrations en Co, Cr, Cu et Mn dans les lots des stations St03-Port Boisé (Co, Cr), St13-Ouen (Cr, Cu, Mn), St14-Goro (Co, Cr, Mn) et St18-Casy ((Co), Cr, Cu, Mn) après transplantation révèle l'existence d'apports significatifs mais relativement modérés, ce que confirme également la comparaison de ces valeurs avec les données des précédents travaux de recherche. Chez les algues, les concentrations en As, Co, Cr et Ni mesurées en fin de transplantation reflètent la présence d'apports dissous significatifs mais de faible importance ; les concentrations en Cu, Mn et Zn sont au contraire caractéristiques de zones ne recevant que très peu (voire pas) d'apports.

L'évolution temporelle interannuelle des concentrations en métaux varie selon l'espèce, le métal et la station considérés, ce qui rend complexe son interprétation. L'arsenic est le seul métal pour lequel la variabilité entre les trois campagnes est relativement faible pour les deux espèces. Chez les bivalves, les concentrations moyennes en métaux mesurées cette année sont globalement en légère augmentation par rapport à celles de la campagne de 2010 mais sont inférieures aux valeurs obtenues en 2009, sauf pour Co et Mn. De même, les concentrations moyennes mesurées en 2010 sont quasi systématiquement inférieures à celles de 2009, sauf pour Mn. Bien que la variation relative (exprimée en pourcentage) de ces concentrations moyennes soit parfois assez marquée, ces différences interannuelles sont le plus souvent peu marquées, voire non significatives au regard de la variabilité interne à chaque lot. L'amplitude est en revanche plus importante pour le cuivre et dans une moindre mesure le nickel.

Chez les algues, l'évolution des concentrations moyennes en Cr, Fe et Ni est relativement similaire et varie entre les stations, tandis que les concentrations en cobalt montrent une évolution interannuelle relativement proche de celle observée chez les bivalves. Pour ces quatre métaux, une augmentation des teneurs est observée aux stations St13-Ouen et St14-Goro par rapport aux deux précédentes campagnes, suggérant une augmentation des apports. L'évolution temporelle des concentrations moyennes en manganèse chez les algues varie également selon la station considérée ; le zinc est le seul métal dont les concentrations mesurées en 2010 sont supérieures à celles des deux autres campagnes et avec des valeurs en 2009 inférieures ou égales à celles de 2011.

L'évolution interannuelle du cuivre constitue un cas particulier commun aux deux espèces, avec des concentrations moyennes en 2009 très significativement supérieures à celles de 2010 et 2011. Ces teneurs moyennes de 2009 sont caractéristiques de zones soumises à des apports significatifs (ce qui ne peut pas être le cas de l'ensemble des stations) alors que les concentrations des deux autres campagnes reflètent de très faibles apports. Une telle tendance ayant également été observée avec deux des trois indices de condition physiologique étudiés, l'hypothèse d'une cause commune liée à un possible changement de certaines conditions environnementales (induisant des changements physiologiques incluant le processus de bioaccumulation) est avancée. La différence de température de l'eau d'environ 2°C observée lors de la première partie de campagne de 2009 par rapport aux deux suivantes (Figure 5) pourrait constituer un début d'explication, mais d'autres causes doivent cependant être recherchées.

L'ensemble de ces résultats indique donc l'existence d'une variabilité interannuelle parfois assez marquée (notamment chez les algues) des concentrations moyennes en la plupart des métaux, sauf l'arsenic. Le nombre de données temporelles disponibles étant à ce jour encore trop faible (trois campagnes seulement), il est encore trop

tôt pour pouvoir déterminer si les différences observées sont liées à une réelle et forte variabilité interannuelle naturelle (réduisant alors la sensibilité de cette méthode pour la détection de faibles changements de concentrations en métaux dans le milieu) ou si certaines des trois campagnes réalisées (2009 ou 2010 et 2011) correspondent à une période de conditions environnementales particulières, comme le suggèrent certains de nos résultats. Les futures campagnes de suivi permettront de préciser ce point particulièrement important pour l'interprétation des données.

REFERENCES

- Andral B., Stanisière J.Y., 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.
- 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., 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 Recherches IRD/Goro Nickel n°1124, 17/08/09, IRD-Nouméa*, 60 p.
- Breau L., Goyaud A., Le Grand 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 Recherches IRD/Vale Inco NC n°2535, 01/12/2009, IRD-Nouméa, Nouvelle-Calédonie*, 30 p.
- Breau L., Goyaud A., Legrand H., Dolbecq M., 2010b. Suivi de la qualité écotoxicologique (métaux) des eaux de la zone sud du lagon de Nouvelle Calédonie par transplantation d'espèces bioindicatrices (bioaccumulateurs). *Contrat de Consultance AEL-LEA/Vale NC, Convention n°C2466*, 37 p.
- Fichez R., Adjerooud M., Bozec Y.M., Breau L., Chancerelle Y., Chevillon C., Douillet P., Fernandez J.M., Frouin P., Kulbicki M., Moreton B., Ouillon S., Payri C., Perez T., Sasal P., Thébault J., 2005. A review of selected indicators of particle, nutrient and metals inputs in coral reef lagoon systems. *Aquatic Living Resources*, 18: 125-147.
- Hédouin L., 2006. Caractérisation d'espèces bioindicatrices pour la surveillance des activités minières et la gestion de l'environnement en milieu récifal et lagunaire : application au lagon de Nouvelle-Calédonie. *Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle, spécialité « Océanologie biologique et Environnement marin »*, La Rochelle, France, 322 p. + Annexes.
- 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 2 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES HUIT STATIONS DE SUIVI ECOTOXICOLOGIQUE DU MILIEU MARIN PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIOACCUMULATRICES.	12
FIGURE 3 : PLUVIOMETRIE JOURNALIERE MESUREE AU NIVEAU DE L'ANCIENNE USINE PILOTE DE GORO NICKEL PENDANT TOUTE LA DUREE DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2011.	13
FIGURE 4 : EVOLUTION DE LA VITESSE (A GAUCHE) ET DE LA DIRECTION (A DROITE) DES VENTS (MOYENNES JOURNALIERES) MESUREES EN CONTINU A LA STATION DE IORO PENDANT TOUTE LA DUREE DE TRANSPLANTATION. LES DONNEES DES DEUX PRECEDENTES CAMPAGNES DE 2009 ET 2010 SONT EGALEMENT REPRESENTEES POUR PERMETTRE LES COMPARAISONS INTERANNUELLES.	14
FIGURE 5 : EVOLUTION DES TEMPERATURES DE L'AIR (A GAUCHE) ET DE L'EAU (A DROITE) PENDANT LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2011. LES DONNEES DES DEUX PRECEDENTES CAMPAGNES ONT ETE REPRESENTEES AFIN DE PERMETTRE LES COMPARAISONS INTERANNUELLES.	14
FIGURE 6 : COMPARAISON DES POIDS FRAIS TOTAUX MOYENS (A) ET DES LONGUEURS DES COQUILLES (B) AVANT (Ti) ET APRES (Tf) TRANSPLANTATION CHEZ LE BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> (N=15/STATION, MOYENNE $\pm$ ECART-TYPE).	19
FIGURE 7 : TAUX MOYENS DE CROISSANCE JOURNALIERE EN POIDS FRAIS TOTAL ET EN LONGUEUR DE COQUILLE (EN %, $\pm$ INTERVALLE DE CONFIANCE A 95 %) CHEZ LES BIVALVES TRANSPLANTES (N=15/STATION).	19
FIGURE 8 : COMPARAISON INTERANNUELLE DES TAUX MOYENS DE CROISSANCE JOURNALIERE (EN %, $\pm$ INTERVALLE DE CONFIANCE A 95 %) CHEZ LES BIVALVES TRANSPLANTES (A : POIDS FRAIS TOTAL ; B : LONGUEUR COQUILLE) (N=15/STATION).	20
FIGURE 9 : COMPARAISON DES INDICES DE CONDITION PHYSIOLOGIQUE (IC1, IC2, IC3) ET DE L'INDICE GONADO-SOMATIQUE (IGS) (MOYENNE $\pm$ ECART-TYPE) CALCULES CHEZ LES SPECIMENS TRANSPLANTES SUR LES DIVERSES STATIONS.	21
FIGURE 10 : COMPARAISON INTERANNUELLE DES INDICES DE CONDITION MOYENS ($\pm$ ECART-TYPE) DES BIVALVES TRANSPLANTES LORS DES TROIS CAMPAGNES (2009, 2010, 2011) (N=20/ST EN 2009, N=15/ST EN 2010 ET 2011)	22
FIGURE 11 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN METAUX CHEZ LE BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> LORS DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2011 (N=5 LOTS DE 3 SPECIMENS/STATION). (LES RECTANGLES REPRESENTENT LA DISTRIBUTION DE 50 % DES DONNEES ; A L'INTERIEUR, LA CROIX ROUGE REPRESENTE LA MOYENNE ET LE TRAIT HORIZONTAL LA VALEUR MEDIANE DES DONNEES. Ti : LOT INITIAL).	26
FIGURE 13 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN METAUX CHEZ LA MACROALGUE BRUNE <i>LOBOPHORA VARIEGATA</i> LORS DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2011 (N=5 LOTS/STATION, SAUF ST13 (2 LOTS) ET ST07 (3 LOTS)).	34
FIGURE 14 : EVOLUTION TEMPORELLE (INTERANNUELLE) DES CONCENTRATIONS MOYENNES ($\pm$ ECART-TYPE) DES METAUX ANALYSES DANS LES FRONDES DES MACROALGUES <i>LOBOPHORA VARIEGATA</i> TRANSPLANTEES SUR LES DIVERSES STATIONS DE SUIVI LORS DES CAMPAGNES DE 2009 (N=20 SPECIMENS), 2010 ET 2011 (N=5 POOLS/STATION).	37

LISTE DES TABLEAUX

TABEAU 1 : DESCRIPTION ET LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI ECOTOXICOLOGIQUE PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIOACCUMULATRICES.	11
TABEAU 2 : RESULTATS DU CONTROLE QUALITE DES METHODES DE MINERALISATION ET D'ANALYSE CHIMIQUE DES METAUX DANS LES TISSUS BIOLOGIQUES REALISE DANS LE CADRE DE LA CAMPAGNE 2011.	17