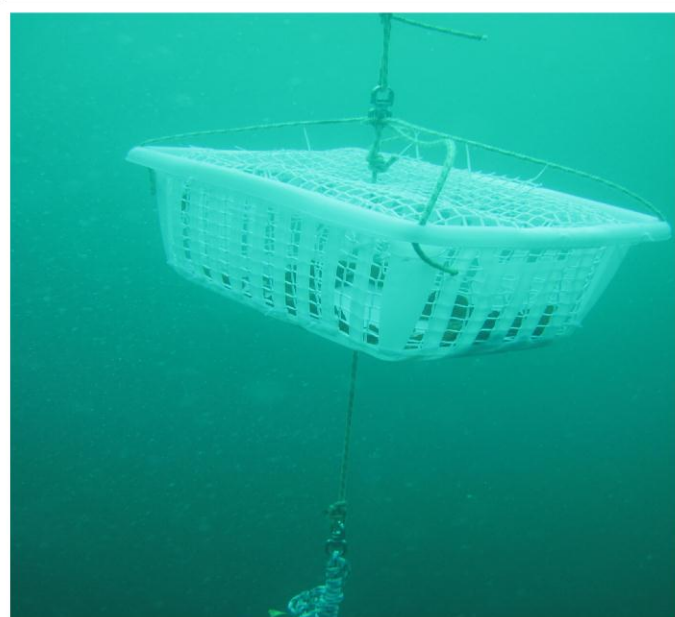




**SUIVI DE LA QUALITE ECOTOXICOLOGIQUE DES EAUX DE LA ZONE
SUD DU LAGON DE NOUVELLE-CALEDONIE PAR
TRANSPLANTATION D'ESPECES BIO-INDICATRICES**

MISSION DE JUIN-SEPTEMBRE 2013



RAPPORT

27 janvier 2014

CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL - LEA

PO E54191/0001

Suivi de la qualité écotoxicologique des eaux de la zone sud du lagon de
Nouvelle-Calédonie par transplantation d'espèces bio-indicatrices

Mission de juin-septembre 2013

Auteur (s) :

Shilpa KUMAR-ROINE

Aubanie RAYNAL

Jocelyn SENIA

Jean-Michel FERNANDEZ

Nombre de pages : 60

	N/Ref	V/Ref	
Identification	121115-VI-17	E54191/0001	
Titre complet	Suivi de la qualité écotoxicologique des eaux de la zone sud du lagon de Nouvelle-Calédonie par transplantation d'espèces bio-indicatrices : Mission de juin-septembre 2013		
Auteurs	Shilpa KUMAR-ROINE, Aubanie RAYNAL, Jocelyn SENIA et Jean-Michel FERNANDEZ		
Résumé	La cinquième campagne de transplantation d'organismes marins s'est déroulée de mi-juin à début septembre 2013 (soit 83 jours d'immersion). A la différence de la campagne précédente, celle-ci a été marquée par des conditions climatiques exceptionnelles (taux de précipitations 2,6 fois plus élevée qu'en 2012). En effet, trois dépressions accompagnées de fortes pluies sont survenues pendant la période d'immersion. Celui du 02-03 juillet 2013 a été très remarquable : 470 mm de précipitation en 2 jours. Par ailleurs, cette étude ou une partie de celle-ci, s'est déroulée après la rupture du tuyau de transfert des effluents de l'usine Vale-NC. Le contexte hydro-climatique exceptionnel de 2013 a permis de rassembler les 8 éléments étudiés en deux groupes : Le groupe 1 qui est constitué de métaux appelés « latéritiques » (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) et le groupe 2 d'éléments appelés « terrigènes » (As, Cu et Zn). Tandis qu'aucune tendance n'est constatée pour les éléments du groupe 2, ceux du groupe 1 montrent une dispersion nette liée à la typologie entre les stations dites « côtières » (St03, St06, St16 et St18) et les stations dites « lagunaires » (St07, St13 et St14). Les études statistiques ont montré l'existence d'une corrélation entre des métaux latéritiques bioaccumulés et leurs fractions dissoutes dosées dans la colonne d'eau. Il en résulte un classement des stations (St13 = St07 < St14 < St18 = St16 < St03 = St06) en fonction des niveaux des concentrations en Cr et Ni (voire Co et Fe). Cette observation indique que les rejets industriels suite à la rupture du tuyau dans le Canal de la Havannah n'ont pas induit d'augmentation des concentrations en métaux dans les organismes transplantés. Toutefois, les teneurs en Co, Cr, Fe, Mn et Ni sont significativement plus élevées aux stations St06 et St18 (stations côtières). Le suivi de la bio-accumulation chez les macroalgues <i>Lobophora variegata</i>, un problème de perte de frondes au cours de l'immersion des cages n'a pas permis d'émettre d'interprétations.		
APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Shilpa-KUMAR-ROINE		18/12/2013
Vérificateur 1	Jean Michel FERNANDEZ		21/01/2014
Vérificateur 2	Céline Pousse		24/01/2012
Approbateur(s)	Jean Michel FERNANDEZ		04/02/2014
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR		DATE
1.1	Rapport final		04/02/2014
COPIE - DIFFUSION			
NOM	ORGANISME		
Jean Michel N'Guyen	VALE NC, Département Environnement		

Ce rapport doit être cité comme suit :

KUMAR-ROINE S., RAYNAL A., SENIA J., H. ET FERNANDEZ J.M., 2013. Suivi de la qualité écotoxicologique (métaux) des eaux de la zone sud du lagon de Nouvelle-Calédonie par Transplantation d'espèces bioindicatrices (Bioaccumulation), Campagne 2013. Rapport AEL 121115-VI-17, Vale-NC/AEL E54191/0001, 60 p.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	7
OBJECTIFS	8
METHODOLOGIE	9
RECOLTE ET SELECTION DES SPECIMENS A TRANSPLANTER	9
IMMERSION, CONTROLE ET RECUPERATION DES CAGES	11
CONDITIONS METEOROLOGIQUES	13
BIOMETRIE, ANALYSE DES ECHANTILLONS ET TRAITEMENT STATISTIQUE	20
RESULTATS - DISCUSSION	23
CROISSANCE ET CONDITION PHYSIOLOGIQUE DES BIVALVES TRANSPLANTES	23
CONCENTRATIONS EN METAUX DANS LES BIVALVES	28
Niveau de concentration et variabilité selon les lots	28
variabilité spatiale	33
Variabilité inter-annuelle	39
CONCENTRATIONS EN METAUX DANS LES ALGUES	43
CONCLUSION	45
REFERENCES	47
LISTE DES FIGURES	49
LISTE DES TABLEAUX	51
ANNEXES	52

INTRODUCTION

La surveillance du milieu marin potentiellement impacté par les activités industrielles du complexe de Vale Nouvelle-Calédonie (Vale-NC) s'effectue sur la base de quatre groupes d'indicateurs physico chimiques et un groupe d'indicateurs de la qualité éco-toxicologique de l'eau grâce à des bio-accumulateurs.

Cette surveillance s'effectue au niveau de stations marines selon les prescriptions réglementaires des arrêtés d'autorisation d'exploiter (du port et de l'usine) et de la Convention fixant les modalités de mise en œuvre de la démarche pour la conservation de la biodiversité, entre la Province Sud et Vale-NC. Les principaux jalons pour la mise en place de cette surveillance ont été les deux arrêtés ICPE et la convention ci-dessous :

- Arrêté ICPE : installations portuaires du 13 juillet 2007 ;
- Arrêté ICPE : usine et UPM du 9 octobre 2008 ;
- CCB : Convention pour la Conservation de la Biodiversité entre la Province Sud et Vale-NC du 20 mars 2009 (Convention n° 27-2009/APS).

Dans le cadre de la CCB, l'utilisation d'espèces bio-accumulatrices a été proposée afin de quantifier (par des analyses chimiques des tissus mous) la fraction des métaux présents dans le milieu ambiant sous forme dissoute dans l'eau et/ou sous forme particulaire/alimentaire. En effet, ces fractions sont capables de pénétrer dans ces organismes (dite « bio-disponible ») et d'y induire potentiellement des effets toxiques (écotoxicologie).

Forte de l'expérience acquise dans le cadre des précédents travaux de recherche (Convention IRD/Goro-Ni, N° 1124, 2006), l'équipe (maintenant AEL) exerce annuellement, pour Vale-NC, cette surveillance écotoxicologique depuis 2009 et, sans interruption, jusqu'à aujourd'hui (2013) (contrat AEL/Vale-NC E54191/0001).

Ce rapport présente les résultats obtenus dans le cadre de la mise en œuvre de la cinquième campagne de transplantation (« *caging* »), qui s'est déroulée de mi juin à début septembre 2013.

OBJECTIFS

La méthode de transplantation d'espèces marines en stations artificielles (ou « caging ») consiste à immerger pendant trois mois deux espèces bio-indicatrices accumulatrices de métaux (une algue et un bivalve). Cette expérimentation s'effectue dans des cages en plastique disposées à une profondeur (environ -12 m) 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 mêmes métaux présents sous formes biodisponibles pour ces espèces dans le milieu ambiant. **Cette accumulation dans les chairs fournit donc une indication quantitative des apports globaux en métaux qui sont disponibles dans le milieu marin pour le bio-indicateur.**

A l'issue de cette période d'immersion, les concentrations en différents métaux accumulés dans les tissus des deux espèces sont mesurées par analyse chimique. Les 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 temporelle et spatiale des apports en métaux bio-disponibles dans le milieu marin côtier.

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., 2009a](#) ; cette méthode suit en outre étroitement les recommandations formulées dans le protocole international standardisé [ASTM E2122-02](#).

RECOLTE ET SELECTION DES SPECIMENS A TRANSPLANTER

LE BIVALVE *ISOGNOMON ISOGNOMON*

Les bivalves *Isognomon isognomon* Linnaeus et les macroalgues brunes *Lobophora variegata* (Lamouroux) Womersley ont été récoltés le 10 et 11 juin 2013 à 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., 2009a](#)).

Après le tri et le brossage des coquilles, les bivalves (n = 260) ont été mis en dépuration pendant 48 h dans de l'eau de mer filtrée (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. 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., 2009b](#)), une sélection des spécimens ayant un poids frais total compris entre 12 et 18 g a été ciblée. Cependant, pour cette étude, en l'absence d'un nombre suffisant d'individus dans la classe 12-18 g, les spécimens compris entre 6,80 et 41,86 g ont été sélectionnés¹. Les individus ont été dispatchés de sorte que la variation des poids frais totaux moyens reste réduite, lors de la constitution des lots permettant ainsi une analyse comparative des concentrations moyennes entre les stations en fin de période de transplantation.

¹**Remarque :** Depuis 2011, une raréfaction des bivalves *I. isognomon* dans la Baie Maa de poids frais compris entre 12 et 20 g est constatée. En effet, la fourchette de cette classe de poids frais a été progressivement élargie de 12-18 g (2009) à de 11- 22 g (2012).

La Baie Maa est un site de référence reconnu par plusieurs équipes qui conduisent les études de transplantation. Ainsi, il n'est pas impossible que la collecte ciblée des individus ait pu exercer une pression sur la structure de la population. A la lumière de ce constat, il devient impératif d'entreprendre des nouvelles prospections afin de définir un nouveau gisement de référence pour les futures études à conduire.

Comme lors des précédentes campagnes de 2010-2012, neuf lots de bivalves (huit lots à transplanter ainsi qu'un lot témoin initial) ont été constitués par tirage aléatoire au sein des individus sélectionnés.

En fin de compte, les poids frais moyens des neuf lots au temps initial (T_i) varient de $20,5 \pm 6,9$ g à $21,2 \pm 8,4$ g, soit une moyenne globale de $21,0 \pm 7,5$ g (Tableau 1). Ces neuf lots présentent une différence significative de poids frais total (Test de Kruskal-Wallis (KW); $p=0,025$). Les longueurs moyennes de neuf lots de coquilles au temps initial (T_i) varient de $87,5 \pm 15,8$ mm à $92,1 \pm 15,7$ mm, soit une moyenne globale de $89,3 \pm 15,8$ mm (Tableau 1), et ne diffèrent pas significativement (KW ; $p=0,923$). Afin de permettre une analyse statistique plus robuste, chaque lot a été constitué de 25 individus à la place de 15 individus habituellement mis depuis 2010.

L'ALGUE LOBOPHORA VARIEGATA

Les algues *Lobophora variegata* récoltées ont été triées afin de sélectionner les frondes de taille supérieure à la maille des cages de transplantation (15 mm x 13 mm)². Celles-ci ont ensuite été brossées puis distribuées de façon à constituer neuf lots de 30 algues chacun (huit lots à transplanter ainsi qu'un lot témoin initial).

Contrairement aux bivalves, aucune mesure biométrique n'est réalisée sur les algues.

²**Remarque :** Depuis 2009, des pertes des frondes de *L. variegata* en fin de transplantation sont constatées. En 2010, cette perte était importante avec la mortalité et la disparition quasi-totale des algues aux stations St06 et St18 sans que la raison précise ait pu être identifiée. L'année suivante, une perte totale a été constatée à la station St31 et une perte partielle aux stations St07 et St13. Cette perte serait attribuée à la présence de nombreux poissons de petite taille à l'intérieur de la cage, présence constatée lors de sa récupération. En 2012, cette perte a été constatée sur toutes les stations du réseau. Il semble que les frondes, source de nourriture, soient ingérées par ces poissons qui réussissent à rentrer à travers la maille des cages.

Cette perte devient critique au point de rendre les traitements de données et l'émission d'interprétations sujets à caution.

Pour contourner ce problème, en 2013, en plus d'introduire 30 frondes à la place de 15 à 20 les années précédentes, le dispositif des cages a été modifié. Les frondes ont été placées d'abord dans une pochette en nylon souple dont la taille de la maille a été réduite (15 mm x 13 mm). Cette pochette a ensuite été introduite et attachée dans la cage en plastique alimentaire rigide de maille supérieure (20 mm x 20mm), habituellement utilisée, dans laquelle se trouvent également les bivalves.

IMMERSION, CONTROLE ET RECUPERATION DES CAGES

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. 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.

Sept des huit stations de transplantation ont été sélectionnées parmi les quatorze stations du plan de suivi physico-chimique du milieu marin (Contrats AEL/Vale-NC, n° C2445 de 2010 et C3052 de 2013).

La huitième station, St31-Nouaré (sous influence purement océanique et donc considérée comme une station de référence), elle ne figure pas dans le plan de suivi physico-chimique fixé par ces deux Conventions. Cette station a été créée en 2010 pour remplacer la station St05-Kié, à laquelle les interventions en plongée sous-marine et l'immersion de matériel scientifique ne sont pas aisément réalisables en raison des trop forts courants régnant à cet endroit. La localisation de la station St31-Nouaré a cependant aussi dû être déplacée en 2011 de quelques centaines de mètres vers la pointe nord-est de l'îlot Nouaré, par rapport à la campagne de 2010. En effet, par le passé, les résultats ont curieusement montré de trop fortes concentrations en certains métaux pour pouvoir utiliser sa localisation initiale comme une référence ; la présence d'eau résultant d'un up-welling en serait la raison (Fichez *et al.*, 2005).

De même, suite à des problèmes rencontrés lors des précédentes campagnes avec la cage immergée à la station St16-Port Vale (retrouvée posée sur le fond en raison de la destruction de son flotteur probablement consécutivement au passage d'un navire à l'aplomb du dispositif), en accord avec Vale-NC, la position de mouillage a été déplacée vers la zone Nord-Ouest du port, ce point se trouvant en dehors de l'alignement d'entrée des cargos.

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

La campagne d'immersion des cages a été réalisée les 13 et 14 juin 2013. 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 10 m et 12,5 m de profondeur, directement à partir du bateau.

Après environ un mois et demi d'immersion (soit le 25 et 26 juillet 2013), les dispositifs de transplantation immergés aux huit stations ont été contrôlés en plongée sous-marine puis brossés afin d'éliminer le « *biofouling* » déposé sur les cages et les flotteurs, ces développements pouvant potentiellement limiter la circulation de l'eau.

Enfin, les 02 et 03 septembre 2013, soit après trois mois d'immersion (83 jours), les dispositifs de transplantation ont été récupérés.

De huit cages déployées, sept ont pu être récupérées ; le dispositif entier au niveau de la station St31 étant introuvable. 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.

Tableau 1 : Description des huit stations de suivi écotoxicologique par transplantation d'espèces bio-accumulatrices.

Station			Longitude Nord	Latitude Sud	Profondeur des stations (m)	Profondeur des cages (m)	Poids frais moyens à T _i (g)	Longueurs moyennes à T _i (mm)	Date d'immersion
Baie du Prony	Port de Prony	St16	166°52,54	22°20,76	42,6	12,5	21,2±8,4	87,5±17,0	14/06/2013
	Ilôt Casy	St18	166°51,06	22°21,67	22,0	10,0	20,5±6,9	88,3±13,6	14/06/2013
Canal de la Havannah	Chenal de Port boisé	St03	166°58,01	22°21,19	28,4	10,5	21,0±6,9	89,9±14,1	13/06/2013
	Chenal de la baie Kwé	St 06	166°59,11	22°20,83	27,2	10,0	21,2±6,8	92,1±15,7	13/06/2013
	Ile Ouen Récif Ma	St 13	166°51,36	22°24,91	32,4	10	21,1±7,3	88,9±17,2	14/06/2013
	Récif Ioro	St 07	166°57,90	22°22,83	38,5	12,5	20,9±6,3	89,7±14,0	13/06/2013
	Port de Goro	St14	167°01,15	22°19,35	35,2	12,5	21,0±8,7	88,9±15,7	13/06/2013
	Témoins ilot Nouaré	St31	167°00,45	22°25,46	35,0	11,5	20,8±8,1	90,5±20,2	13/06/2013
	Lot témoin						21,0±8,7	87,5±15,8	
	Moyenne globale						21,0±7,5	89,3±15,8	

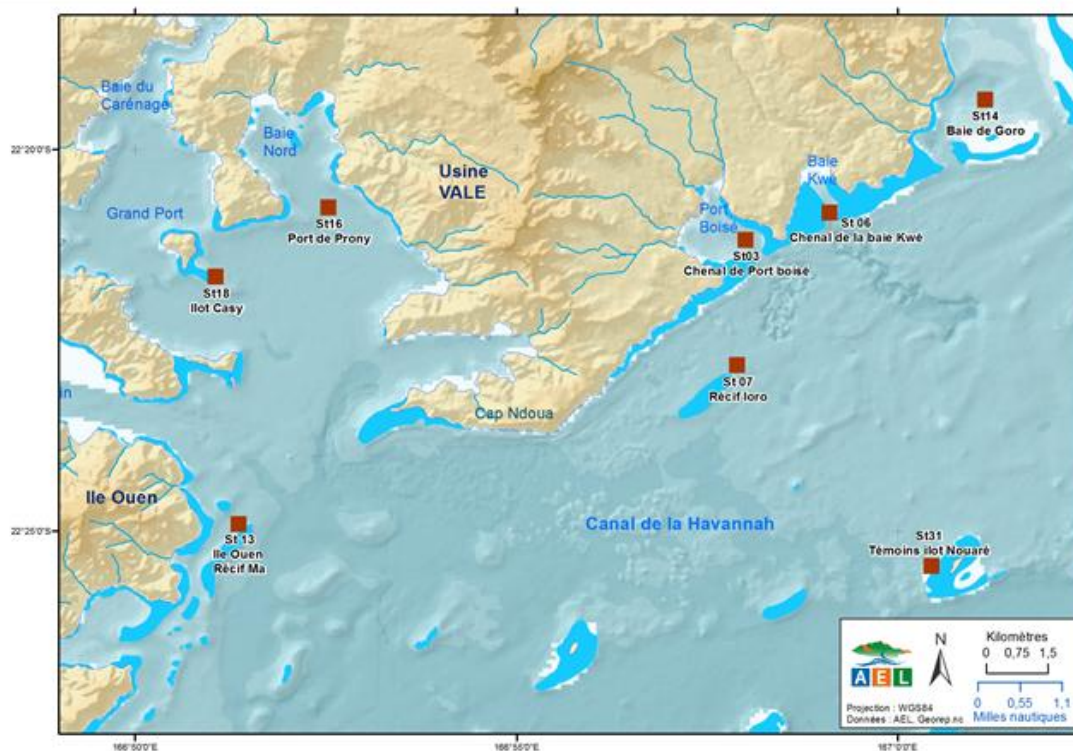


Figure 1 : Localisation géographique des huit stations de suivi écotoxicologique du milieu marin par transplantation d'espèces bio-accumulatrices.

CONDITIONS METEROLOGIQUES

Les conditions météorologiques régnant dans la zone pendant les trois mois d'immersion des cages sont susceptibles d'influer d'une part, sur la nature et la quantité des apports en métaux dans le milieu marin (lixiviation des sols en fonction des taux de précipitations) et d'autre part, sur leur dispersion en mer (force et direction des vents). La pluviométrie et les données de vents (vitesse et direction) sont mesurées par la station météorologique de Vale-NC, située sur l'ancienne usine pilote, en bordure de la Baie du Prony.

La température de l'eau peut également influencer, mais sur le métabolisme des organismes transplantés, donc potentiellement la croissance et par conséquent le taux de transfert des composés chimiques en général. Habituellement, les données de température (de l'air et de l'eau) sont obtenues par la station météorologique de AEL/IRD installée sur la balise du récif Ioro, dans le Canal de la Havannah. Pour cette campagne, ces données de température sont cependant incomplètes, car après le 13 août en raison d'une panne de la centrale d'acquisition, le relevé de données a été interrompu jusqu'à la mi-septembre.

Néanmoins, lors de cette campagne, chaque cage a été équipée d'un capteur miniaturisé (modèle HOBO Water Temperature Pro v2 Data Logger –U22-001) qui permis l'acquisition de la température d'eau ambiante à une fréquence de 6 fois par jours, soit toutes les 4 heures à partir de 15 juin 2013 jusqu'au 02 septembre 2013.

PLUVIOMETRIE

Du 13 juin au 03 septembre (soit après 83 jours de transplantation), la pluviométrie totale a été de 1065 mm (Figure 2). Les années précédentes, pour la même période, la pluviométrie a été de 411 mm en 2012 sur 114 jours de mesures, 344 mm en 2011 sur 90 jours, 315 mm en 2010 sur 85 jours, et 245 mm en 2009 sur 83 jours. Ainsi, la pluviométrie totale en 2013 est de 2,6 (2012) à 4,4 (2009) fois plus élevée que les années précédentes.

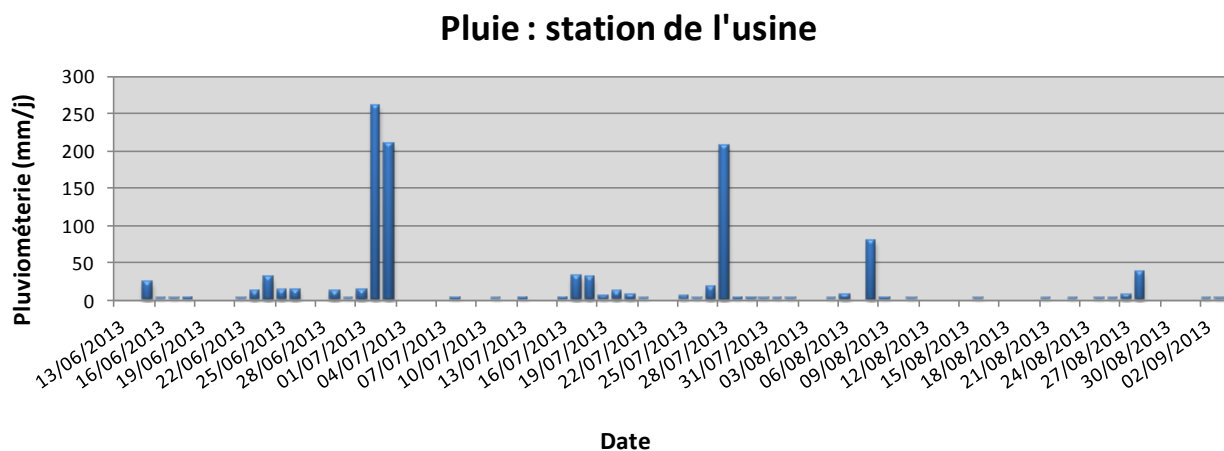


Figure 2 : Pluviométrie journalière mesurée au niveau de l'ancienne usine pilote de Vale-NC pendant toute la durée de la campagne de transplantation 2013 (83 jours d'immersion).

Pour la campagne de 2013, quatre fortes valeurs journalières de précipitations ont été mesurées au courant de la période d'immersion ; à savoir le 02 juillet (260 mm), 03 juillet (209,7 mm), 28 juillet (207,3 mm) et le 08 août (80 mm) (Figure 2) ; ces deux épisodes pluvieux ont été enregistrés juste après l'immersion des cages (Figure 3). A titre de comparaison, en 2012, seulement deux épisodes pluvieux de moyenne intensité aux 5^{ème} et 105^{ème} jours d'immersion, avec respectivement 72, 5 mm et 105,2 mm avaient été enregistrés (Figure 3).

Il est à noter que les trois forts relevés en 2013 de 260, 209,7 et 207,3 mm/j sont très exceptionnels. En cinq ans d'étude, un tel taux n'est jamais été enregistré auparavant ; la pluviométrie journalière la plus forte entre 2009 et 2012 a été de seulement 123,4 mm, relevée en 2010. En 2013, rien que lors du premier épisode pluvieux (02 et 03 juillet), la zone d'étude avait enregistré 470 mm de précipitations ; soit près de la moitié du taux cumulé sur 83 jours.

Enfin, il est important de préciser que ces épisodes pluvieux ont été marqués par la coloration en rouge de masse d'eau dans la Baie Nord, Baie Port Boisé et la Baie Kwé, phénomène dû à la mise en suspension des matières terrigènes latéritiques apportées par les eaux douces via les creeks avoisinants. Par ailleurs, suite aux pluies de 02 et 03 juillet des mortalités importantes de la faune (oursins, coquillages) en Baie Kwé ont été constatées. Cet événement climatique avait fait mobiliser l'équipe AEL pour échantillonner l'eau de mer à la station de Port Boisé (St03) afin d'analyser la salinité, les concentrations en matière en suspension et en métaux dissous et particuliers.

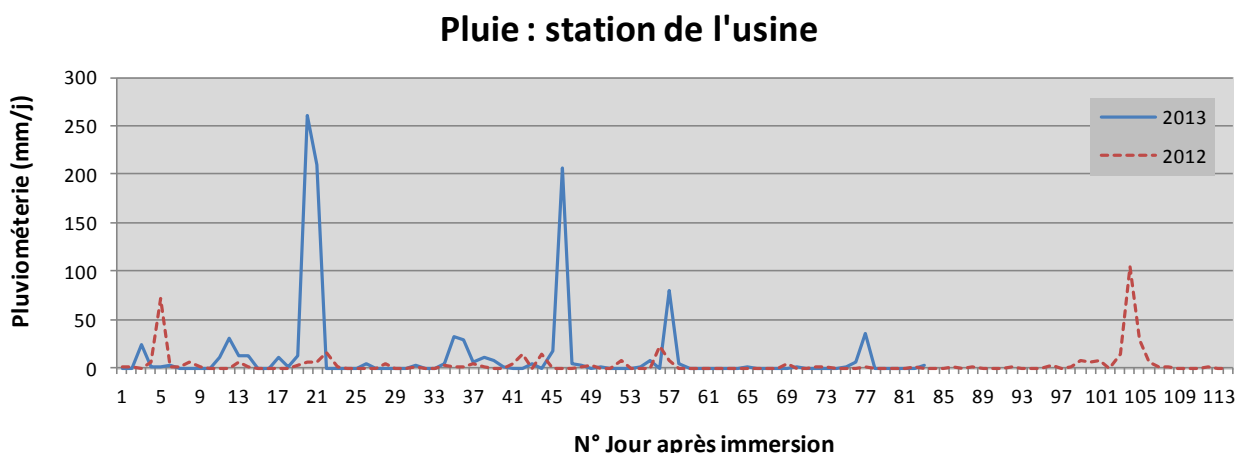


Figure 3 : Comparaison des données de pluviométrie journalière mesurées au niveau de l'ancienne usine pilote de Vale-NC pendant toute la durée des campagnes de transplantation 2012 et 2013.

VITESSE ET DIRECTION DES VENTS

La vitesse journalière moyenne du vent révélée sur l'ensemble de la campagne a été de 11,5 m/s, avec des valeurs minimales d'environ 6 m/s et une valeur maximale de 21,3 m/s. Cette amplitude de vitesse est relativement semblable à celle précédemment enregistrée lors de la campagne de 2012 (moyenne de 11,2 m/s ; valeurs minimales et maximales de 3,9 à 26,9 m/s, respectivement) (Figure 4).

Pendant les périodes d'immersion, les vents ont été généralement de SE à SW pour les deux années. La différence notable réside dans la mise en place des régimes dominants de secteur N en 2012. Ce régime n'est pas observé en 2013 (Figure 5).

Toutefois, ces écarts peuvent être imputables à la différence de situation géographique des stations de mesures et aux éventuels effets de reliefs des environnements respectifs.

Vitesse du vent : station de l'usine

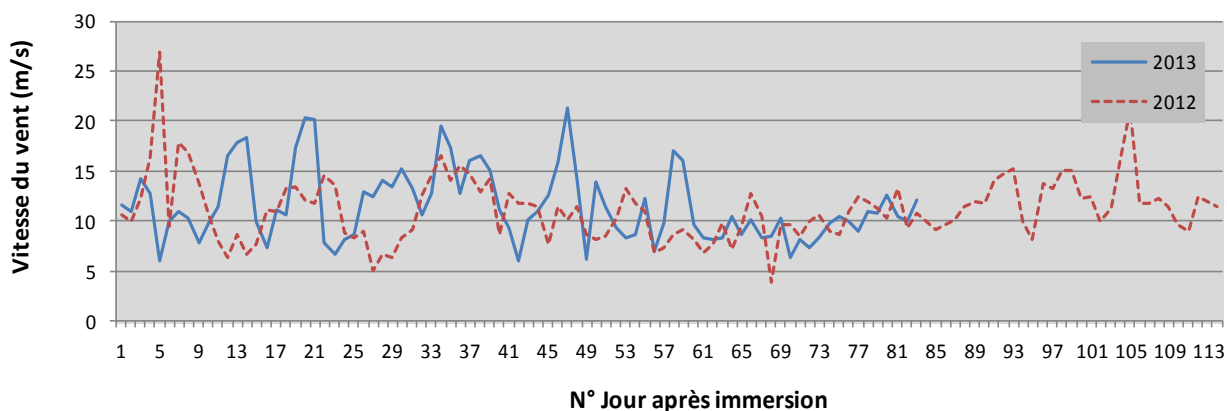


Figure 4 : Evolution et comparaison de la vitesse des vents (moyennes journalières) mesurées en continu à la station météorologique de Vale-NC lors des campagnes de 2013 et 2012.

Direction du vent : station de l'usine

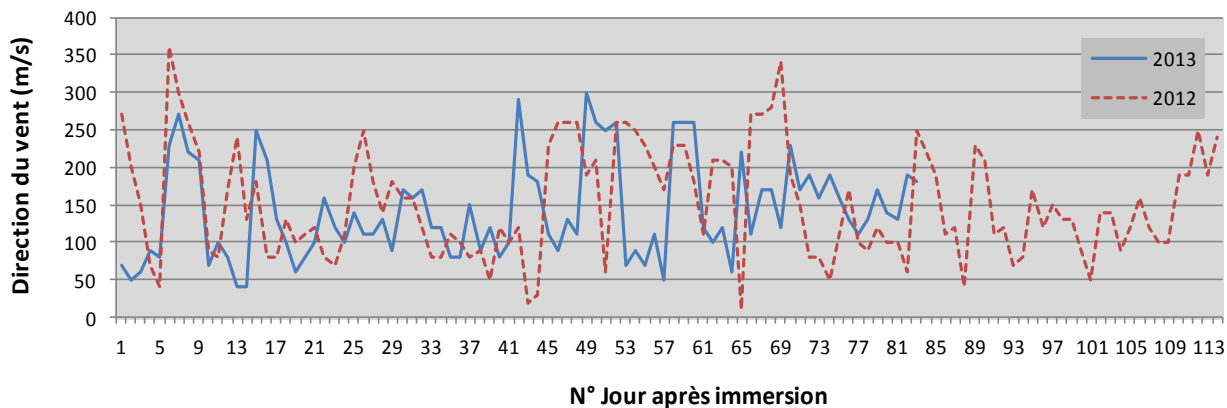


Figure 5: Evolution et comparaison des directions de vents (moyennes journalières) mesurées en continu à la station météorologique de Vale-NC lors des campagnes de 2013 et 2012.

TEMPERATURE

Cette année, en nouveauté, la température d'eau a été relevée au niveau de chaque cage équipée d'un capteur miniaturisé. La température a été enregistrée à la fréquence de 4 heures par jour ; soit 6 relevés journaliers. Ces données et les valeurs journalières moyennées sont représentées dans la Figure 6, Figure 7 et Figure 8. Ces profils montrent une tendance régulière à la baisse dès le premier jour d'immersion (début de saison fraîche).

Les températures moyennes, minimales et maximales globales par station sont représentées dans le Tableau 2.

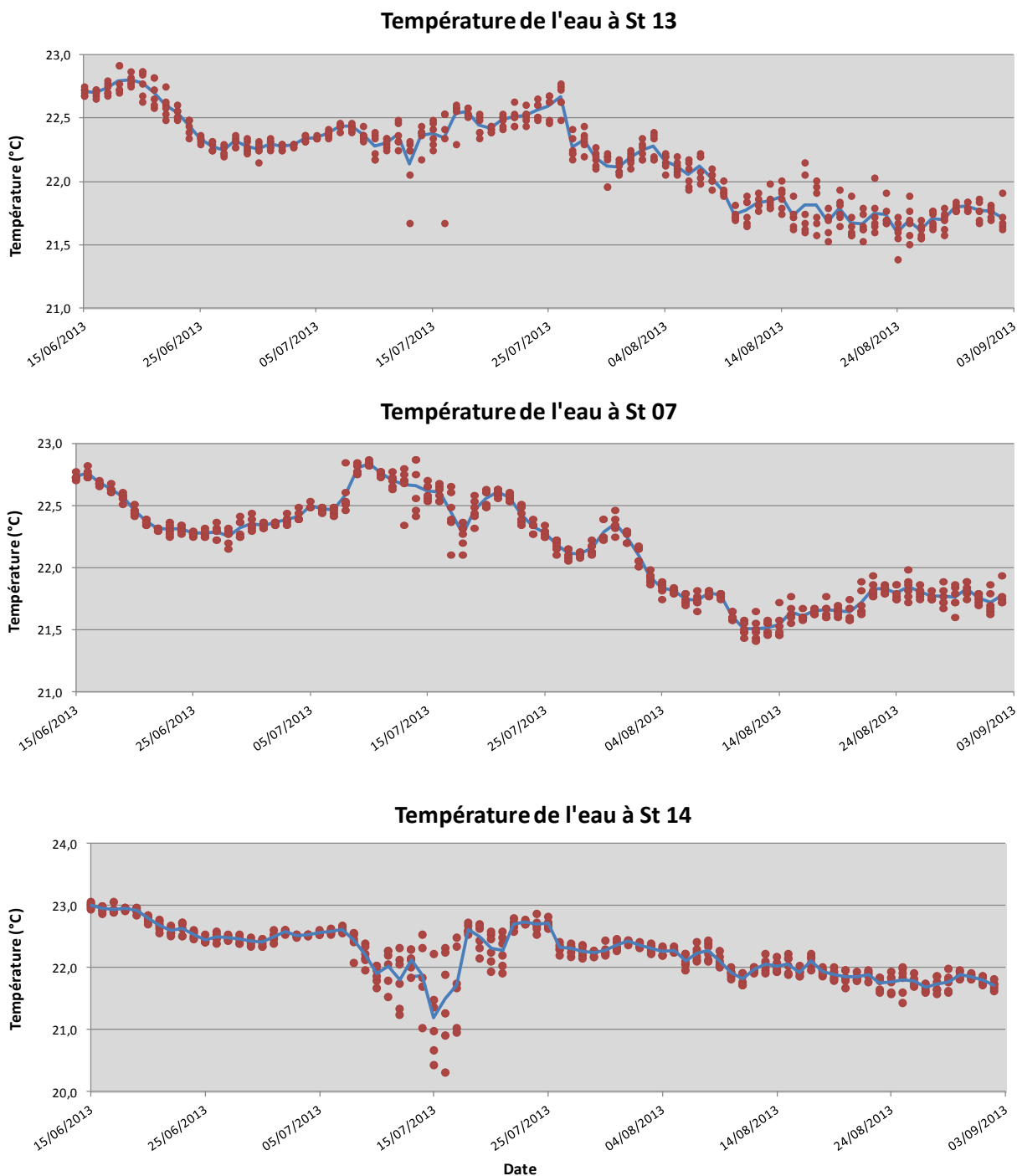


Figure 6 : Evolution de la température de l'eau de mer pendant la campagne de transplantation 2013. Les données ont été recueillies aux stations St13, St07 et St14 toutes les 4 heures, entre le 15 juin 2013 et le 02 septembre 2013, soit durant les premiers 80 jours sur 83 jours de la campagne de transplantation par les capteurs miniaturisés. (●) = relevés journaliers à une fréquence de 4 heures ; (—) = moyennes de six relevés journaliers.

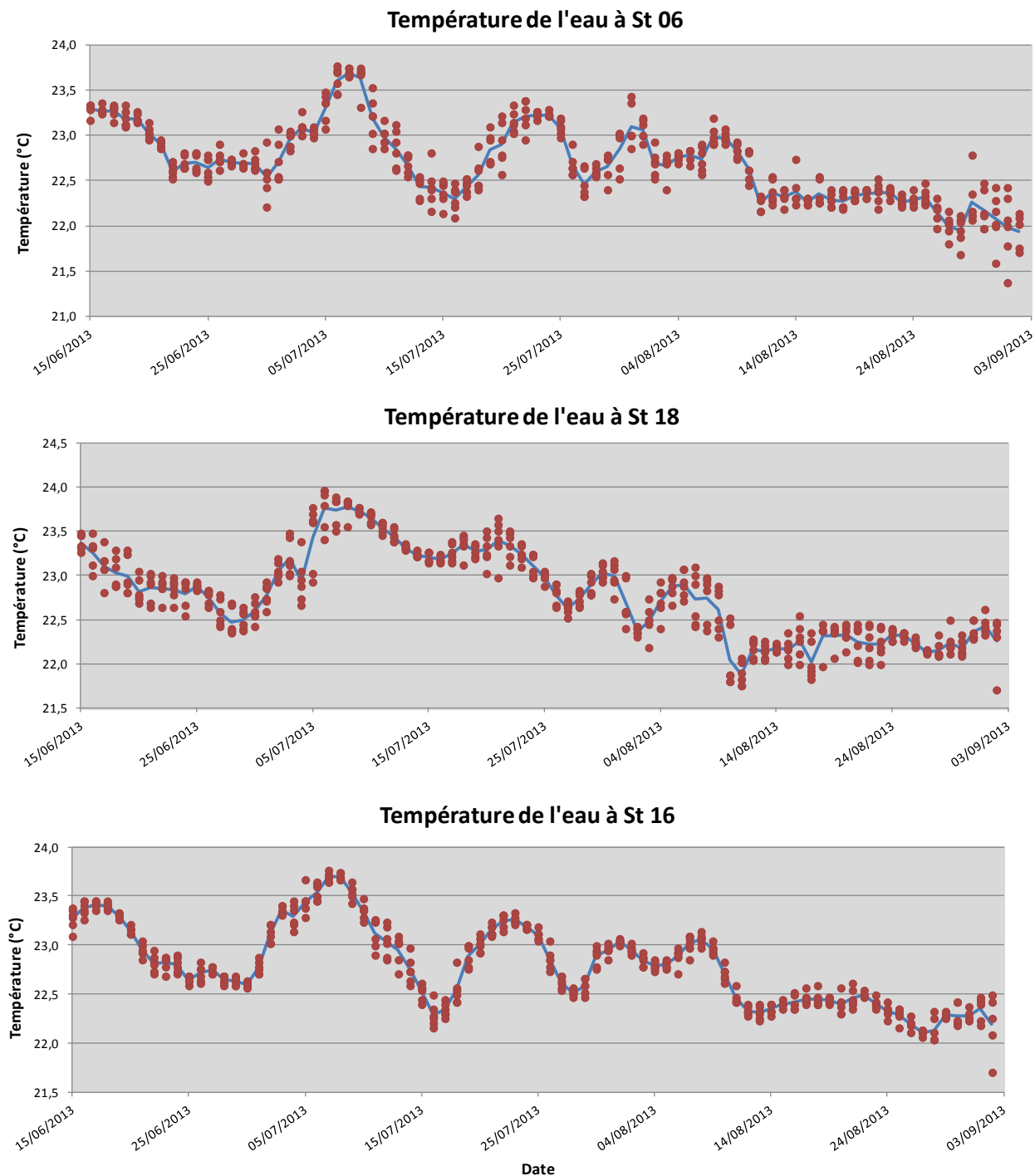


Figure 7 : Evolution de la température de l'eau de mer pendant la campagne de transplantation 2013. Les données ont été recueillies aux stations St06, St18 et St16 toutes les 4 heures, entre le 15 juin 2013 et le 02 septembre 2013, soit durant les premiers 80 jours sur 83 jours de la campagne de transplantation par les capteurs miniaturisés. (•) = relevés journaliers à une fréquence de 4 heures ; (—) = moyennes de six relevés journaliers.

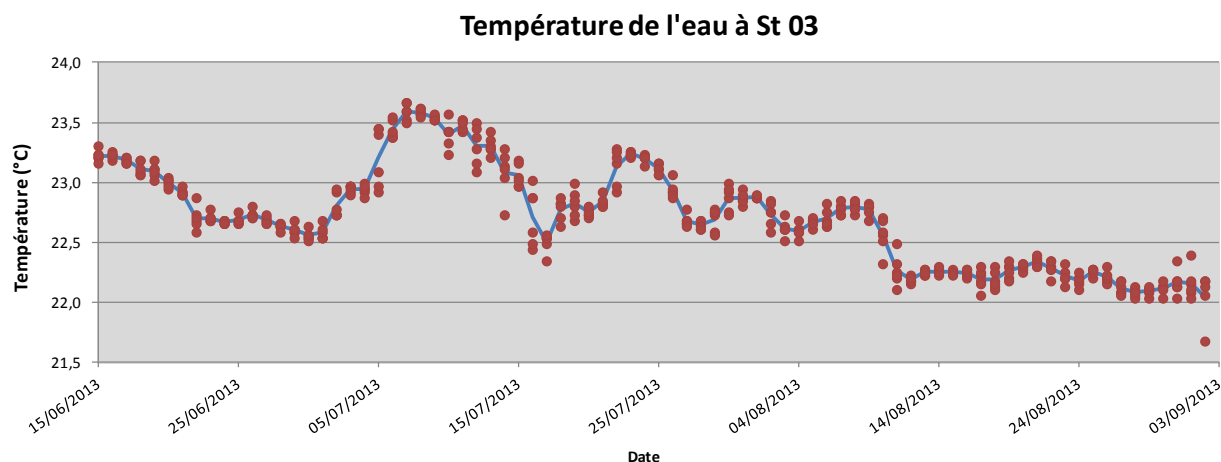


Figure 8 : Evolution de la température de l'eau de mer pendant la campagne de transplantation 2013. Les données ont été recueillies aux stations St03, toutes les 4 heures, entre le 15 juin 2013 et le 02 septembre 2013, soit durant les premiers 80 jours sur 83 jours de la campagne de transplantation par les capteurs miniaturisés. (●) = révélés journaliers à une fréquence de 4 heures ; (—) = moyennes de six relevés journaliers.

Tableau 2 : Les moyennes, écart-types, minimales et maximales de température de l'eau de mer par station. Les données ont été recueillies à chaque station par un capteur miniaturisé à la fréquence de 4 heures par jour, soit 6 relevés journaliers.

Station	St 13	St 07	St 14	St 06	St 18	St 16	St 03
Moyenne (°C)	22,19	22,16	22,24	22,70	22,79	22,80	22,72
Ecart-type (°C)	0,35	0,39	0,42	0,42	0,50	0,41	0,42
Min (°C)	21,39	21,41	20,32	21,37	21,70	21,70	21,68
Max (°C)	22,92	22,87	23,06	23,76	23,95	23,76	23,67
Moyenne globale (°C)						22,51 ± 0,50	

La température moyenne globale est $22,5 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Les valeurs de température moyenne par station mettent en évidence deux typologies principales : les stations qui se situent dans le lagon et sous l'influence océanique (St13, St07 et St14 dont la température moyenne est très proche de $22,2^{\circ}\text{C}$) et les stations qui se situent à l'intérieur d'une baie sous l'influence terrigène (St06, St18, St16 et St03 dont les températures moyennes varient de $22,7$ à $22,8^{\circ}\text{C}$) (Tableau 2).

En superposant les profils des températures moyennées par jour, la même tendance est observée (Figure 9). Généralement, durant toute la période d'immersion, les températures de l'eau aux stations St13, St07 et St14 demeurent plus fraîches qu'aux stations St03, St 06, St16 et St18, particulièrement à partir du 18 août 2013.

Par ailleurs, pour les stations St06, St18, St16 et St03, une petite mais soudaine baisse en température a été constatée le 04 juillet 2013. Il est fortement probable que cette observation soit à relier à la quantité d'eau de pluie tombée les 02 et 03 juillet 2013 (Figure 9). En effet, situées près des côtes, les eaux de ces stations semblent avoir été rafraîchies par les apports exceptionnellement importants d'eau douce déversés par les creeks de la Baie du Prony, de la Baie de Port Boisé et de la Kwé. Cette observation confirme une fois de plus l'influence terrigène de ces stations, à l'inverse des stations St13, St07 et St14.

Enfin, les températures moyennes journalières de l'eau de mer de 2013 ont été comparées à celles de 2012. Ne disposant pas de ces données à la station météorologique d'Iro pour 2013 (cette station météorologique étant tombée en panne à partir de 13 août), les données recueillies par le capteur miniaturisé de la station St07 ont été comparées avec celle de 2012 de la station météorologique du récif Iro.

Il apparaît de cette comparaison qu'en 2012, les températures moyennes journalières de l'eau durant toute la période d'immersion sont nettement inférieures à celles de 2013 ; cette différence pouvant atteindre plus de 1°C (Figure 10). Cependant, malgré cette variabilité, les courbes de température de l'eau pour les deux années suivent la même tendance ; à savoir à la baisse de moins d'un degré Celsius environ.

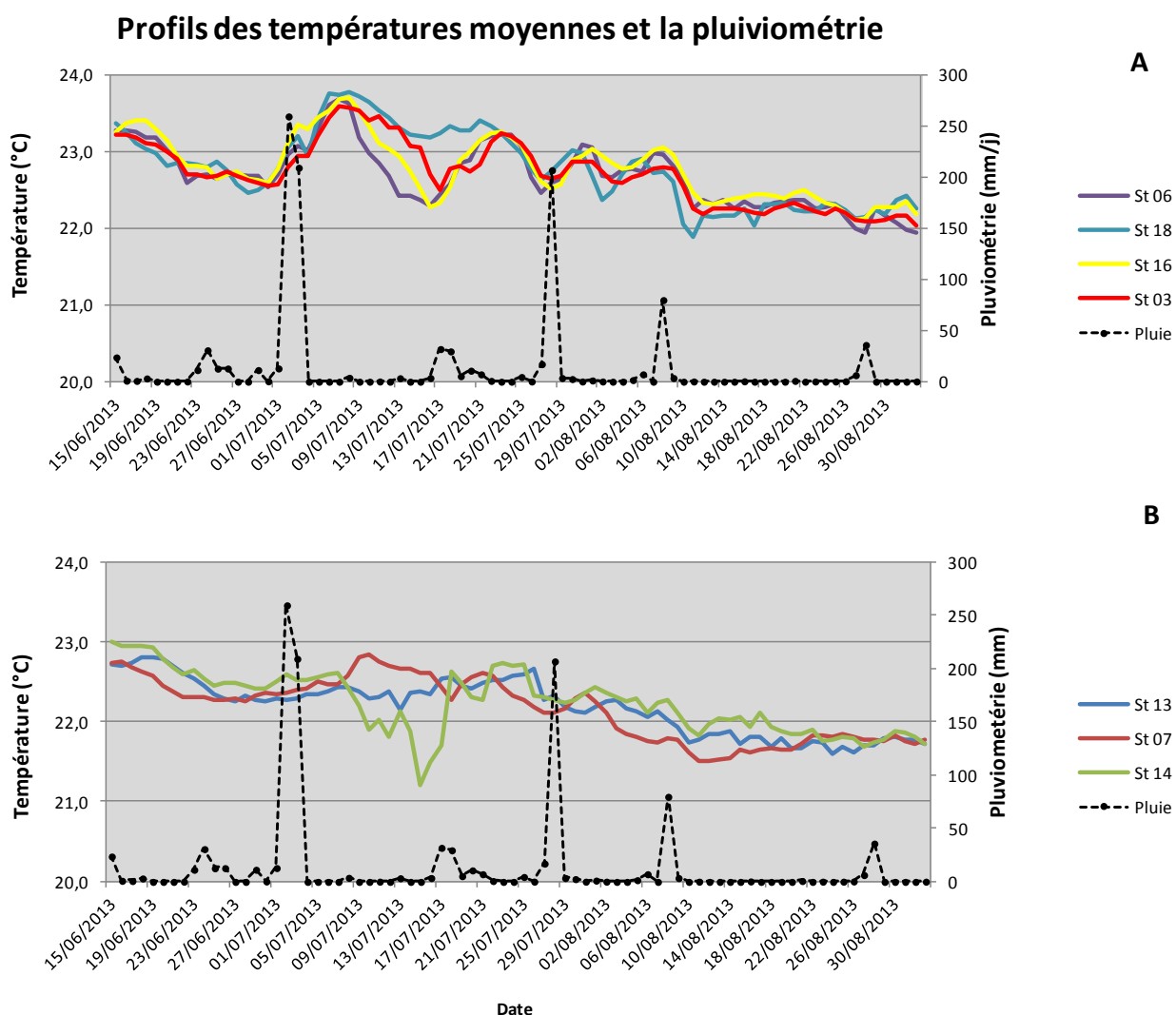


Figure 9 : Comparaison des profils de températures moyennes journalières de l'eau de mer au niveau des stations dites (A) « sous l'influence terrigène » et (B) « sous l'influence océanique » avec la pluviométrie lors de la campagne de Transplantation 2013. Les données ont été recueillies à chaque station toutes les 4 heures du 15 juin 2013 au 02 septembre 2013, soit durant les premiers 80 jours sur 83 jours de la campagne.

Température : Station loro et St07

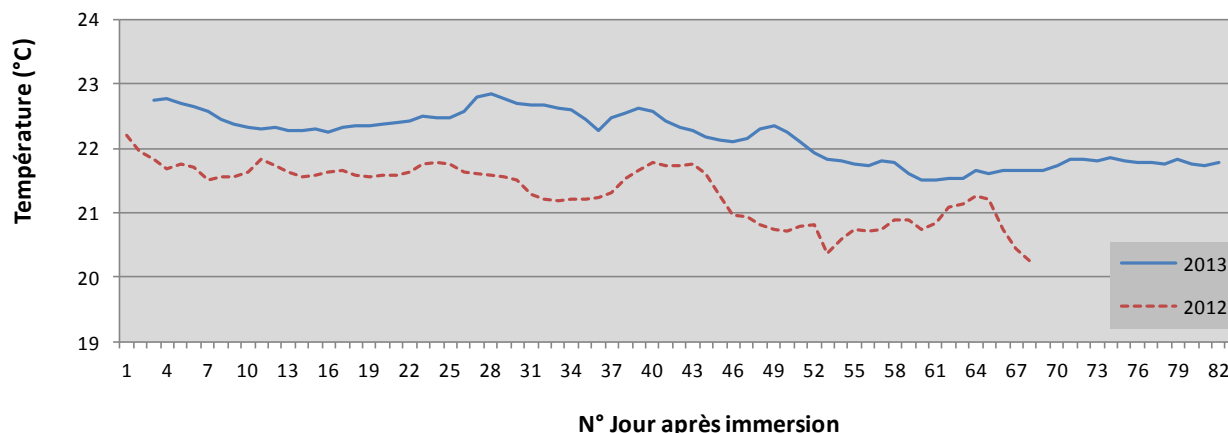


Figure 10 : Comparaison des données de température de l'eau de mer (moyennes journalières) des campagnes transplantation 2013 et 2012. Ces données ont été recueillies au niveau du récif d'Ioro, à la station St07 par un capteur miniaturisé pour 2013 et par la station météorologique du récif loro pour 2012. Pour la campagne 2012, les données concernent seulement 68 des 114 jours de la campagne 2012.

BIOMETRIE, ANALYSE DES ECHANTILLONS ET TRAITEMENT STATISTIQUE

Après la récupération des cages, les bivalves transplantés ont été placés pendant 48 h en dépuración dans de l'eau de mer filtrée (Aquarium des Lagons) puis brossés afin d'éliminer les matières ingérées ainsi que les particules de sédiments et l'épibiose adhérents. Après dépuración, chaque spécimen a été mesuré au pied à coulisse pour la longueur de coquille, épongé et pesé pour l'obtention du poids frais total, puis disséqué. Les tissus mous ont ensuite été pesés pour l'obtention du poids frais des chairs entières, puis congelés et lyophilisés.

PARAMETRE PHYSIOLOGIQUE

A partir des variables biométriques obtenues, la croissance relative (%) a été calculée ainsi que le taux de croissance journalier (TCJ) en longueur et en poids frais total selon l'expression suivante :

$$TCJ (\%) = ((\ln Vf - \ln Vi) \times 100) / (Tf - Ti)$$

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) est également calculé. Ce paramètre reflète l'importance du remplissage de la coquille du bivalve par la chair, donc son 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. Dans le cadre de cette étude l'indice AFNOR ou indice de qualité (**IC 3**) (norme AFNOR NF V45056, 1985) est utilisé et obtenu selon la formule suivante :

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

PF tot : poids frais total de l'animal vivant ; PF chairs : poids frais des chairs.

BIOACCUMULATION DES METAUX

Les chairs des 25 bivalves de chaque station ont été combinées trois par trois de manière aléatoire pour constituer huit pools par cage³.

³*Rappel : 1 station = 1 lot = 25 individus par cage = 8 pools d'environ 3 individus analysés*

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

Chaque pool de bivalves et d'algues a ensuite été minéralisé à haute température en conditions hyperbares (four micro-ondes) avec une solution d'acide nitrique concentré et de peroxyde d'hydrogène (qualité supra-pur) afin de solubiliser les métaux accumulés dans 0,5 g de 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 dans les séries analytiques du matériel biologique de référence certifié, d'origine marine (TORT-2 et DORM 3, NRCC).

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 3.

Tableau 3 : Résultats du « Contrôle Qualité » des méthodes de minéralisation et d'analyses chimiques des métaux dans 0,5 g de tissus biologiques réalisé dans le cadre de la campagne 2013.

PARAMETRES	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Valeurs obtenues (µg/g ps) ¹	20,7	0,48	0,7	83	84	10,7	2,1	163
Ecart-type ¹	0,3	0,02	0,2	1	5	0,2	0,1	3
Valeurs certifiées (µg/g ps) ²	21,6	0,51	0,8	106	105	13,6	2,5	180
Ecart-type ²	1,8	0,09	0,2	10	13	1,2	0,2	6
Précision relative (%) ³	2	4	36	2	6	2	3	2
Justesse relative (%) ⁴	96	93	89	78	80	78	83	91
Limite de quantification (µg/g ps)	1,0	0,2	0,1	0,1	2,0	0,1	0,2	10

¹ Moyenne ± écart-type : n = 5 échantillons certifiés TORT-2 (Conseil National de Recherches, Canada)

² Moyenne ± écart-type

³ La précision relative est exprimée par le coefficient de variation des valeurs obtenues (CV = écart-type/moyenne × 100)

⁴ La justesse relative est exprimée par le pourcentage des valeurs obtenues et valeurs certifiées.

La précision de la méthode est excellente pour tous les métaux sauf Cr (variation > 6 %). Par ailleurs, une excellente justesse relative a été obtenue pour As, Co et Zn (de 91 % à 96 %)¹. Cette grandeur a été évaluée en comparant les résultats d'analyse du matériel biologique de référence régulièrement inséré dans les séries avec les valeurs certifiées.

ANALYSES STATISTIQUES

Les analyses statistiques menées avaient pour objectifs de déterminer si :

- 1) le poids et la longueur des individus transplantés ont varié significativement entre le début et la fin de la transplantation, pour chaque station ;
- 2) les teneurs en différents métaux (As, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Zn) ont varié significativement au sein des individus transplantés entre le début et la fin de la transplantation, pour chaque station ;
- 3) il existe des différences significatives de poids, taille et teneurs en métaux entre les différentes stations à l'issue de la période de transplantation.

Il a tout d'abord été déterminé si les données à analyser répondaient aux exigences de mise en œuvre des analyses de variance (i.e. distribution gaussienne et homoscedasticité) (Scherrer 1984, Zar 1999).

Lorsque les conditions nécessaires étaient remplies, des analyses de variance (ANOVA) ont donc été utilisées afin de comparer les paramètres d'intérêts (poids, longueur et teneurs en métaux) entre le début et la fin de la transplantation pour une station donnée (points 1 et 2), ou entre stations (point 3).

Dans le cas contraire, des tests non-paramétriques ont remplacé les ANOVA : tests de Kruskal-Wallis pour les analyses correspondant au point 1, et tests de Wilcoxon-Mann-Whitney pour les analyses correspondant aux point 2 et 3 (Scherrer 1984, Zar 1999).

La réalisation et la validation de l'ensemble des ANOVA et tests non-paramétriques (Wilcoxon-Mann-Whitney et Kruskal-Wallis), les transformations éventuellement appliquées aux données, et l'ensemble des analyses afférentes ont été réalisées à l'aide du logiciel XLSTAT[®]. Le risque de première espèce α a été fixé à 0,05.

A l'issue des différentes analyses conduites, lorsqu'une variation significative aura été détectée sur un des paramètres considérés, la représentation graphique des données permettra de caractériser l'amplitude et le profil de cette variation, en vue de son interprétation.

¹ Les données relatives aux autres 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.

RESULTATS - DISCUSSION

CROISSANCE ET CONDITION PHYSIOLOGIQUE DES BIVALVES TRANSPLANTES

Les données correspondant à la biométrie des bivalves avant et après transplantation sont regroupées en annexe 1 et annexe 2.

Avant la transplantation (T_i), les poids frais totaux moyens par lot s'échelonnent entre $20,5 \pm 6,9$ g (St18) et $21,2 \pm 8,4$ g (St16) (Tableau 1), soit une moyenne globale de $21,0 \pm 7,5$ g, toutes stations de transplantation confondues. En fin d'expérience (T_f), les poids frais totaux moyens mesurés oscillent entre $22,2 \pm 7,3$ g (St18) et $23,1 \pm 7,2$ g (St13), soit une moyenne globale de $22,5 \pm 7,3$ g, toutes stations de transplantation confondues.

A chacune des sept stations³, le poids frais total moyen à T_f est supérieur à celui mesuré en début d'expérience à T_i (Figure 11A). Cette augmentation correspond à une croissance relative moyenne allant de 3,4% (St16) à 9,3% (St13) du poids initial (Tableau 4). Cependant, cette différence en poids frais observée entre T_i et T_f n'est pas statistiquement significative (ANOVA ; $p > 0,05$).

³**Rappel :** les données pour la station St31 n'existent pas car la cage a été introuvable.

De même, à T_i , les longueurs moyennes des coquilles par lot s'échelonnent entre $87,5 \pm 17,0$ mm (St16) et $92,1 \pm 15,7$ mm (St06) soit une moyenne globale de $89,3 \pm 15,8$ mm, toutes stations de transplantation confondues. A T_f , les longueurs des coquilles mesurées sont comprises entre $85,8 \pm 15,3$ (St16) et $94,0 \pm 10,7$ mm (St07) soit une moyenne globale de $90,5 \pm 13,6$ mm, toutes stations de transplantation confondues (Figure 11B). Les croissances relatives moyennes représentent de -2,0% (St16) à 4,8% (St07) de la longueur moyenne initiale (Tableau 4). Cette différence en longueur n'est cependant statistiquement pas significative (ANOVA ; $p > 0,05$).

Les taux moyens de croissance journalière « *TCJ en poids frais* » s'échelonnent entre 0,04 % (St16) et 0,11% (St13) et les « *TCJ en longueur* » correspondants sont compris entre -0,02 % (St16) et 0,04 % (St07) (Tableau 4). Ces taux diffèrent faiblement entre les stations.

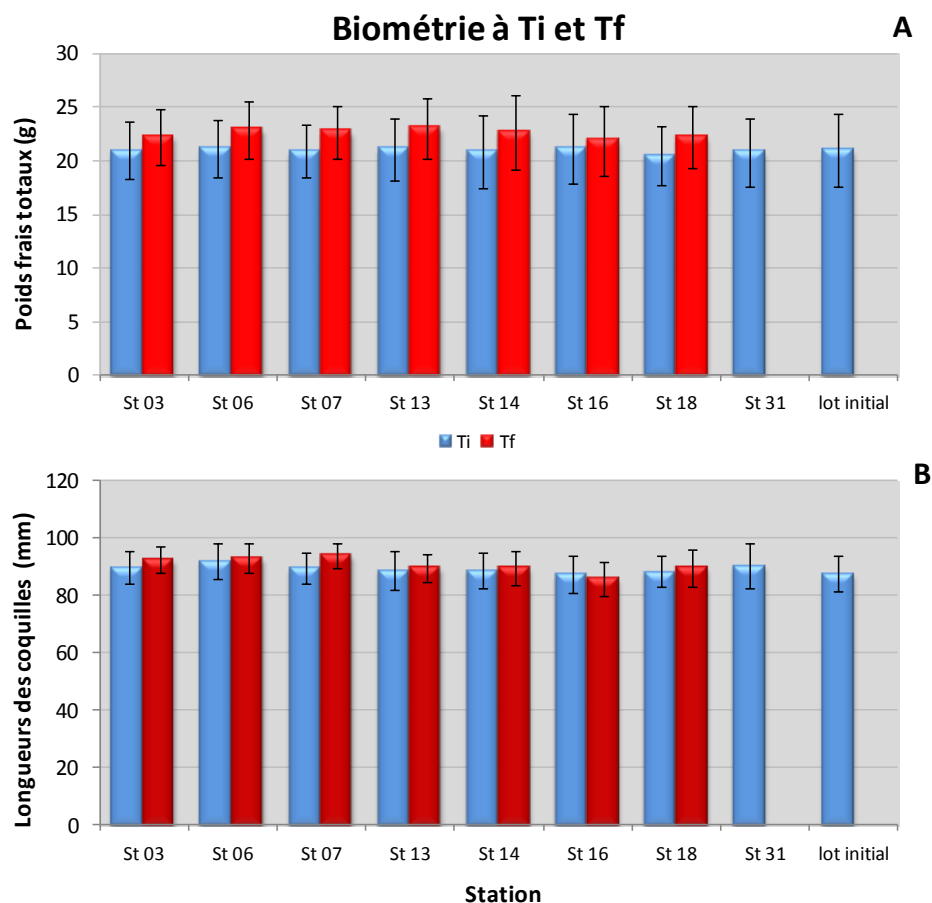


Figure 11 : Comparaison des valeurs moyennes des poids frais totaux (A) et des longueurs des coquilles (B) avant (Ti) et après (Tf) transplantation chez le bivalve *Isoognomon isognomon* (n=25 individus par station).

Tableau 4 : Taux de croissance moyenne et journalière en poids frais total (PF_{tot}) et en longueur des coquilles (Long.) et indice de condition physiologique du bivalve *Isoognomon isognomon*.

Station	LOCALISATION	Croissance moyenne		Taux moyens de croissance journalière (TCJ)		Indice de condition physiologique (IC) (%)
		PF _{tot} (%)	Long. (%)	PF _{tot} (%)	Long. (%)	
St 03	Chenal de la Baie de Port Boisé	6,2	2,9	0,07	0,02	10,2
St 06	Chenal de la Baie Kwé	8,3	0,8	0,10	0,01	11,0
St 07	Récif Ioro (pointe nord)	8,6	4,8	0,10	0,04	11,3
St 13	Récif Ma (pointe nord), Ile Ouen	9,3	0,8	0,11	0,01	10,7
St 14	Port de Goro	8,4	0,7	0,10	0,01	10,5
St 16	Port commercial de l'usine Vale NC	3,4	-2,0	0,04	-0,02	10,0
St 18	Îlot Casy (pointe du platier sud-est)	8,3	1,3	0,10	0,01	9,7
St 31	Îlot Nouaré (bord ouest)					
Lot initial		-	-	-	-	10,4

La comparaison interannuelle des deux indices de croissance (TCJ et moyenne) obtenus pour les campagnes 2012 et 2013 indique qu'à l'exception de la station St07, le développement des organismes en 2013 en poids frais total et longueur des coquilles sur les autres stations est en diminution significative (Figure 12). Les sept stations⁴ comprises, cette diminution est de x1,7 (TCJ) à x2,6 (croissance moyenne) pour les poids frais totaux et de x5,7 (TCJ) à x8,2 (croissance moyenne) pour les longueurs des coquilles. Cette diminution est plus marquante pour le paramètre longueurs des coquilles des bivalves. Ceci pourrait-être du au fait que les individus sélectionnés au début de l'étude ont été de plus grosse taille et donc avaient atteint la croissance maximale au niveau leurs longueurs des coquilles.

⁴**Rappel :** pour 2013 aucune valeur TCJ ni valeur de croissance moyenne pour St31 n'est pas pu être calculée en raison de la perte de la cage.

Par ailleurs, tandis que les TCJ ainsi que les croissances moyennes les plus faibles ont été observés au niveau des stations St06 et St07 lors de la campagne de 2012, en 2013, ceux-ci ont été observés au niveau de la station St16 (Tableau 4 ; Figure 12). Pour cette station, St16, les taux de croissance des coquilles sont même négatifs.

De manière générale, l'extrémité des valves des *I. isognomon* est très fine et cassante. En période de stress, afin de dépenser moins d'énergie ou compenser l'énergie dépensée, les bivalves peuvent, soit arrêter, soit altérer les mécanismes de précipitation des carbonates (Kanazawa et Sato, 2008) et même réabsorber les carbonates de leurs coquilles (McIvor et Aldridge, 2007). Donc, il est très probable que cette décroissance soit liée aux phénomènes de désagrégation ou réabsorption des extrémités fragiles associées à un stress environnemental et/ou physiologique.

La période de cette étude a été marquée par plusieurs phénomènes météorologiques exceptionnels qui ont donné lieu aux conditions physico-chimiques (turbidité, dessalures,...) inhabituelles qui ont engendré une mortalité d'organismes dans la zone d'étude.

En effet, lors du suivi semestriel « Colonne d'eau » qui s'est déroulé du 06 au 08 août, 2013, soit douze jours après le deuxième épisode pluvieux du 28 juillet (207,3 mm de précipitations), les profils enregistrés à la station St16 mettent en évidence un pic très prononcé de fluorescence à mi-profondeur (entre 5 et 10 m) et une augmentation de la turbidité à l'approche du fond ; ce dernier traduisant probablement la décantation des matériels terrigènes. En effet, par sa position géographique dans la Baie du Prony, la station St16 reçoit des apports chargés en particules latéritiques et du matériel détritique d'origine végétale (influence de divers creeks).

Il est également à noter qu'à la station St07, les deux indices de croissance (TCJ et moyenne) pour les poids frais totaux et les longueurs des coquilles demeurent étonnement homogènes entre 2013 et 2012 tandis que pour toutes les autres stations elles sont en diminution. Située loin des côtes, la station St07 (en dehors de St31 qui a été perdue) est la seule du suivi 2013 possédant un caractère océanique avéré et donc, moins sujette aux influences terrigènes. Aussi, la croissance des *I. isognomon* à cette station est restée relativement exempte des conséquences liées aux phénomènes météorologiques de 2013.

Par ailleurs, comme constaté auparavant, les données recueillies au niveau des cages par les capteurs miniaturisés ont mesuré une légère mais perceptible baisse en température de l'eau de mer au niveau de toutes les stations côtières (St06, St18, St16 et St03) le 04 juillet suite à l'épisode pluvieux des 02 et 03 juillet, 2013. Ceci démontre que les eaux douces fraîches déversées par les bassins versants des baies du Prony, de Port Boisé et de la Kwé ont pénétré la couche intermédiaire de la colonne d'eau jusqu'à 10 à 12 m, profondeurs où se trouvaient les cages. Cette pénétration

des eaux douces (déjà observée pour la dépression tropicale Fréda de janvier 2013) a non seulement rafraîchi la colonne d'eau, mais il est fortement probable que leur dilution a également provoqué une dessalure, phénomène qui pourrait avoir engendré du stress plus ou moins important. On rappellera que des mortalités importantes d'organismes (oursins, mollusques et poisson) ont été rapportées suite à ces pluies de juillet.

L'indice de condition physiologique (IC) moyen oscille entre 9,7% (St18) et 11,3% (St07) ; ces valeurs sont remarquablement similaires entre les 7 différents lots⁵ transplantés dans la zone d'étude et celui conservé comme lot témoin (différence maximale de seulement 0,8%) (Tableau 2).

⁵**Rappel :** pour 2013 aucune valeur IC pour St31 n'a pu être calculée en raison de la perte de la cage.

La comparaison interannuelle de cet indice ne révèle pas non plus de différence. Les valeurs en 2013 et 2012 sont très proches voire identiques entre les différentes stations malgré la différence en taille des individus mis en cage entre les deux campagnes (Figure 13). Le même constat est établi pour la station St16 où une décroissance en longueur de la coquille a été pourtant mesurée en 2013.

Ces résultats indiquent que, globalement, les conditions nutritionnelles et physiologiques lors de la campagne de 2013 ont été similaires à celles de l'année précédente.

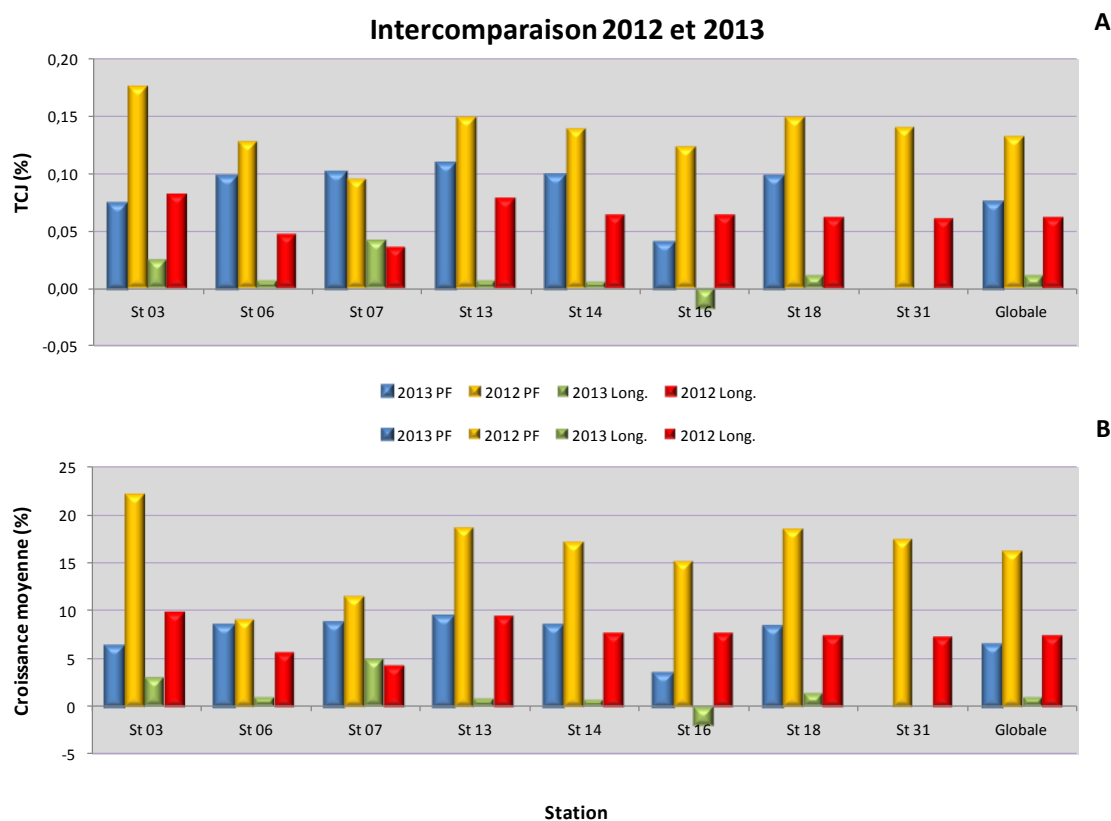


Figure 12 : Comparaison interannuelle des (A) taux moyens de croissance journalière (TCJ) en poids frais total (PF) et en longueur des coquilles (Long.) et (B) croissance moyenne en poids frais total (PF) et en longueur des coquilles (Long.) chez les bivalves *Isognomon isognomon* transplantés lors des campagnes 2013 et 2012.

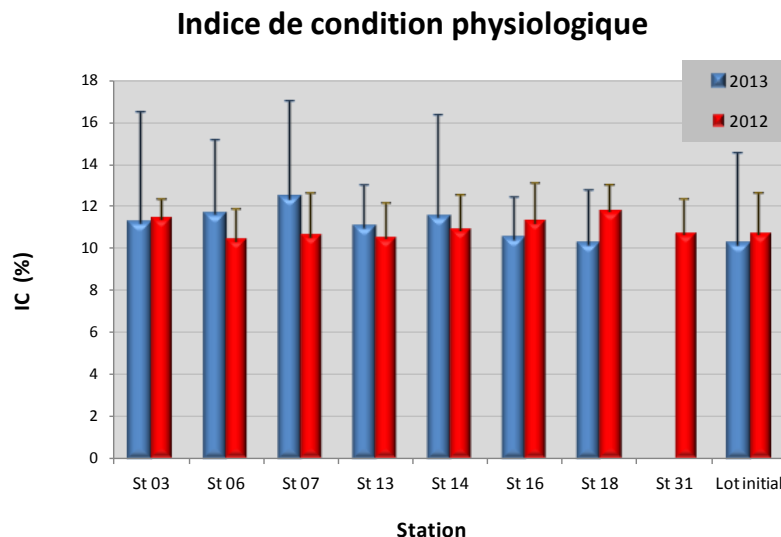


Figure 13 : Comparaison interannuelle des indices de condition physiologique (IC) moyenne des bivalves *Isognomon isognomon* transplantés lors des campagnes 2012 et 2013.

CE QU'IL FAUT RETENIR

Pour chaque station, les taux de croissance des bivalves entre le début et la fin de la période de transplantation (83 jours) ont été évalués par différents indices de croissance (croissance relative moyenne et journalière en poids frais total et en longueur des coquilles) et l'indice de condition physiologique. Ce dernier indique que les conditions nutritionnelles régnant à proximité des cages sont propices au bon fonctionnement de leur métabolisme global voire similaires à celles de la zone de collecte (Baie Maa). La comparaison interannuelle (2013 et 2012) de cet indice montre des valeurs très proches entre les différentes stations indiquant les conditions physiologiques identiques malgré la différence de tailles des spécimens entre les deux années.

Cependant, en dépit de l'indice de condition physiologique identique, les taux de croissances (moyenne et TCJ) sont en nette baisse par rapport l'année 2012 à l'exception de la station St07. Cette diminution est plus évidente pour les longueurs des coquilles des individus. Les individus sélectionnés pour l'étude en 2013 ont été de plus grosse taille. Il semblerait que ces individus aient atteint la taille limite après laquelle la croissance ralentit naturellement surtout en termes de longueur des coquilles.

Cependant, il serait également possible que la croissance ait aussi été ralentie par les conditions météorologiques exceptionnelles (fortes précipitations) qui sont à l'origine des conditions physico-chimiques particulières (pic de turbidité et fluorescence, et refroidissement des eaux) lors de cette étude, provoquant un stress chez les bivalves, particulièrement au niveau des stations influencées par les apports côtiers.

En effet, la croissance la plus faible, voire une décroissance, a été enregistrée en St16, une station enclavée et connue pour la turbidité des eaux en période des grosses pluies. Par ailleurs, les températures relevées par les capteurs miniaturisés aux stations St03, St06, St16 et St18 ont mis en évidence une baisse dans les températures des eaux au niveau des cages suite au premier épisode pluvieux (02 et 03 juillet 2013). Cette baisse en température indique une

possible dessalure passagère des eaux au niveau des cages due à la pénétration des eaux douces dans la couche intermédiaire où se situaient les cages. D'autre part, la dessalure suite aux pluies de 02 et 03 juillet avait provoqué des mortalités dans la population native d'oursins, mollusques et poissons de la Baie Kwé.

Enfin, pour appuyer davantage cette hypothèse, les individus à la station St07 (influence purement océanique) ont montré la même croissance que ceux de 2012 (en poids frais totaux et en longueurs des coquilles) et ce malgré le fait que les individus sélectionnés en 2013 aient été de plus grande taille.

Ces observations indiquent que même si les conditions physiologiques (nutritionnelle, reproduction,..) ont été identiques entre les deux campagnes 2013 et 2012, les conditions physico-chimiques contrastées semblent avoir fortement influencé la croissance des *I. isognomon*.

CONCENTRATIONS EN METAUX DANS LES BIVALVES

NIVEAU DE CONCENTRATION ET VARIABILITE SELON LES LOTS

Les concentrations en métaux chez les bivalves, après leur transplantation ainsi que celles du lot initial de la campagne de transplantation 2013 sont regroupées dans l'annexe 3.

Les concentrations moyennes et médianes en métaux (n=8) pour chacune des différentes stations ainsi que le profil de variabilité inter-stations et intra-stations de ces concentrations sont représentées dans la Figure 14 tandis que les traitements statistiques caractérisant l'amplitude de cette variation sont reportés dans le Tableau 5.

Les résultats d'analyses indiquent que les gammes de concentrations mesurées chez les bivalves transplantés varient considérablement selon le métal considéré. Les valeurs moyennes extrêmes vont de $0,4 \pm 0,1$ µg/g ps (ps = poids sec) pour le cobalt à 750 ± 71 µg/g ps pour le zinc.

Les niveaux de concentrations mesurés permettent de classer les métaux selon l'ordre global suivant : (Zn) > (Fe) > (As) > (Mn) > (Cu) > (Ni) = (Cr) > (Co).

Pour chaque élément analysé, la variation inter-station et intra-station (ou la dispersion des résultats) s'effectue de la manière suivante :

- **Arsenic (As) : après 83 jours d'immersion**, les concentrations médianes dans les bivalves varient de 39,3 à 44,6 µg/g ps, soit une moyenne globale de $43,1 \pm 3,1$ µg/g ps. Graphiquement, les taux d'incorporation d'arsenic sont notablement constants entre les stations St07, St13 et St14 et entre les stations St03, St06, St16 et St18. Cependant, aucune tendance claire n'est constatée entre les stations de suivi pour ce métalloïde (Figure 14). Toutefois, les teneurs relevées au niveau des stations St07, St13 et St14 sont statistiquement inférieures à celles mesurées à la station St03 (Test de Mann-Whitney (MW) ; $p < 0,05$) (Tableau 5).

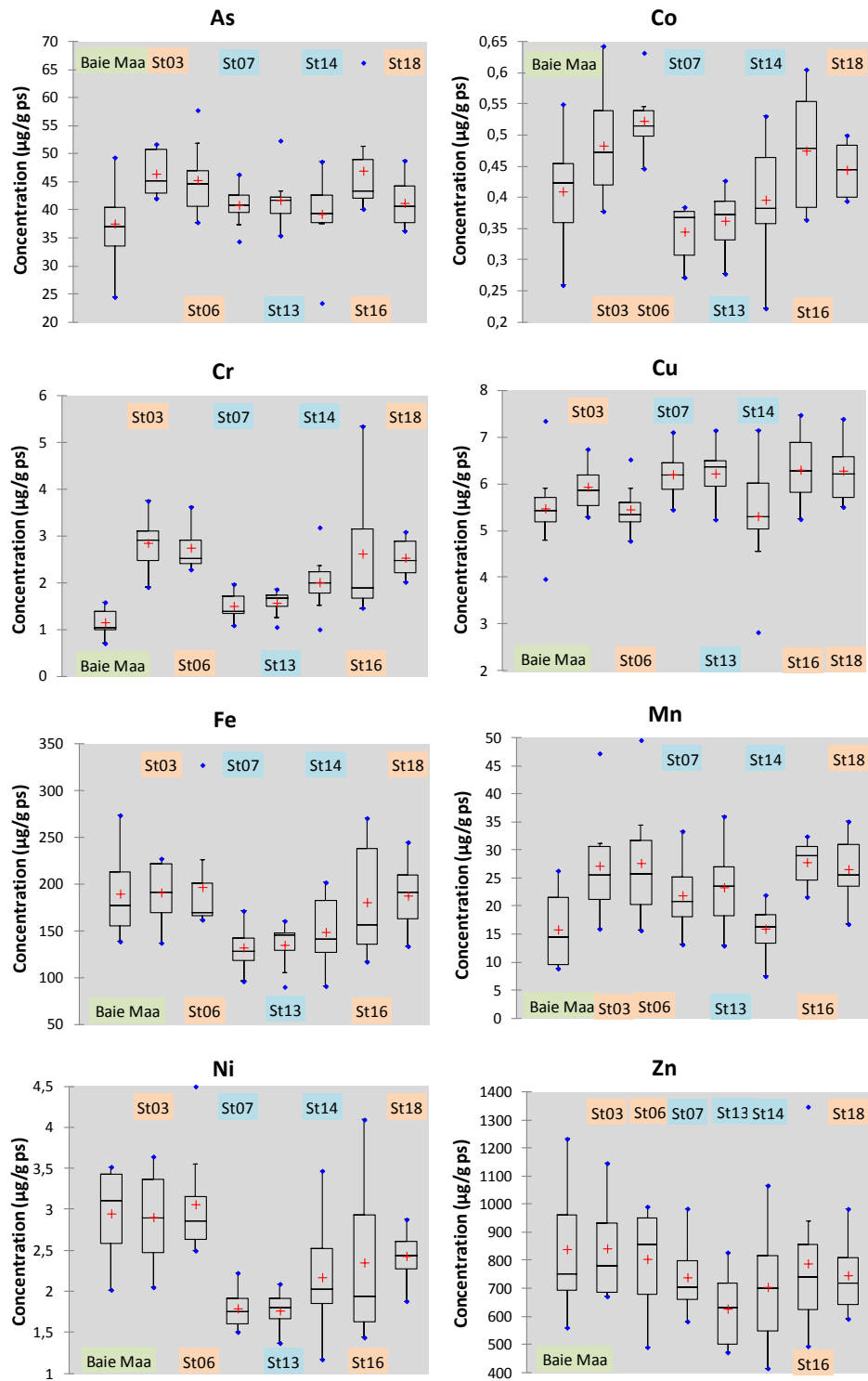


Figure 14 : Variabilité des concentrations en métaux chez le bivalve *Isognomon isognomon* lors de la campagne de transplantation 2013 (n=8 pools de 3 spécimens/station). (Les rectangles représentent la distribution de 50 % des données ; à l'intérieur, la croix rouge représente la moyenne et le trait horizontal la valeur médiane des données ; les points bleus représentent les valeurs minimales et maximales et les barres verticales représentent les écart-type. « Baie Maa » = lot initial en Tj).

Tableau 5 : Valeurs p du test Mann-Whitney pour les teneurs des huit éléments mesurés chez les individus du bivalve *Isognomon isognomon*. Détermination des différences significatives des teneurs en éléments ($p \leq 0,05$), d'une part, entre les différentes stations à l'issue de la période de transplantation et, d'autre part, entre les différentes stations et les individus du lot initial.

ÉLÉMENT	As							Co						
Station	St03	St06	St07	St13	St14	St16	St18	St03	St06	St07	St13	St14	St16	St18
Baie Maa	0,024	0,052	0,270	0,128	0,372	0,031	0,227	0,227	0,018	0,128	0,189	0,793	0,270	0,431
St03		0,713	0,014	0,031	0,024	0,637	0,083		0,431	0,003	0,007	0,083	1,000	0,564
St06			0,227	0,318	0,189	0,958	0,156			0,000	0,000	0,014	0,495	0,005
St07				0,875	0,713	0,104	1,000				0,495	0,270	0,005	0,000
St13					0,372	0,128	0,958					0,431	0,031	0,005
St14						0,052	0,875						0,156	0,270
St16							0,875							0,793
Élément	Cr							Cu						
Baie Maa	0,000	0,000	0,041	0,007	0,014	0,002	0,000	0,189	0,875	0,041	0,066	0,875	0,104	0,052
St03		0,637	0,001	0,000	0,031	0,227	0,270		0,052	0,372	0,372	0,227	0,318	0,318
St06			0,000	0,000	0,010	0,318	0,372			0,018	0,052	0,958	0,041	0,018
St07				0,793	0,066	0,018	0,000				0,793	0,104	0,875	0,958
St13					0,083	0,104	0,000					0,066	0,958	0,875
St14						0,875	0,083						0,083	0,052
St16							0,318							0,958
Élément	Fe							Mn						
Baie Maa	0,713	0,637	0,008	0,010	0,066	0,564	0,958	0,031	0,031	0,128	0,041	0,875	0,004	0,014
St03		0,564	0,005	0,007	0,066	0,793	0,793		1,000	0,227	0,431	0,010	0,495	0,875
St06			0,014	0,000	0,104	0,564	0,875			0,270	0,564	0,024	0,637	0,875
St07				0,637	0,270	0,083	0,005				0,793	0,128	0,083	0,128
St13					0,875	0,318	0,018					0,052	0,156	0,495
St14						0,431	0,052						0,001	0,005
St16							0,713							0,793
Élément	Ni							Zn						
Baie Maa	0,958	0,958	0,002	0,001	0,041	0,104	0,104	0,875	0,958	0,564	0,083	0,270	0,713	0,637
St03		0,793	0,002	0,001	0,041	0,128	0,083		0,875	0,495	0,041	0,270	0,372	0,318
St06			0,000	0,000	0,014	0,128	0,024			0,372	0,052	0,318	0,564	0,431
St07				0,875	0,227	0,431	0,003				0,189	0,637	1,000	0,875
St13					0,156	0,372	0,003					0,431	0,227	0,227
St14						1,000	0,270						0,637	0,713
St16							0,431							0,958

Seuil de signifiante statistique : $0,000 \leq P \leq 0,050$

- Cobalt (Co) : après 83 jours d'immersion**, les concentrations médianes du cobalt varient peu, à savoir de 0,4 à 0,5 µg/g ps, soit une moyenne globale de $0,4 \pm 0,1$ µg/g ps. Ces concentrations s'inscrivent toutes dans la gamme des valeurs précédemment mesurées dans la Grande Rade de Nouméa (0,18 à 0,69 µg/g ps). A l'exception de la station St06, les teneurs entre les lots transplantés et le lot témoin ($0,4 \pm 0,1$ µg/g ps) restent similaires et statistiquement invariables (MW ; $p > 0,05$) (Tableau 5). Toutefois, une variation semble se dessiner entre les stations St03, St06 et St18 voire St16 (stations côtières ; concentrations supérieures) et les stations St07 et St13 voire St14 (stations lagunaires ; concentrations inférieures) (Figure 14). Les traitements statistiques confirment cette observation. La différence en teneurs en cobalt entre ces deux groupes de stations est significative à hautement significative (MW ; $0,000 < p < 0,050$) (Tableau 5). Enfin, graphiquement, à l'exception de la station St06, toutes les autres stations montrent une dispersion des résultats assez grande dont la station 16 présente la plus grande dispersion.
- Chrome (Cr) : après 83 jours d'immersion**, les concentrations médianes du chrome varient de 1,4 à 2,9 µg /g ps, soit une moyenne globale de $2,3 \pm 0,6$ µg/g ps. Ces résultats se caractérisent également par une variabilité notable. Les valeurs moyennes des stations St03, St06, St16 et St18 (stations côtières), oscillant entre $2,5 \pm 0,4$ et $2,9 \pm 0,6$ µg/g ps, montrent des teneurs très proches de celles observées au fond de la Grande Rade de Nouméa (1,0 à 3,7 µg/g ps). A l'inverse, les teneurs aux stations St07 et St 13 voire St14 (stations lagunaires) sont bien plus faibles (de $1,5 \pm 0,3$ à $2,0 \pm 0,6$ µg/g ps). Cette différence est significative à hautement significative pour ces deux groupes de stations (MW ; $0,000 < p < 0,050$). Par ailleurs, ce test révèle également une différence significative, à hautement significative, dans les teneurs en chrome entre tous les lots transplantés et le lot témoin ($1,2 \pm 0,3$ µg/g ps) (MW ; $0,000 < p < 0,050$) (Tableau 5). Ceci signifierait que le sédiment de Baie Maa (zone de collecte des bivalves) serait pauvre en ce métal. Graphiquement, seule la station St16 montre une dispersion des résultats assez grande (Figure 14).
- Cuivre (Cu) : après 83 jours d'immersion**, les concentrations médianes du cuivre varient de 5,3 à 6,4 µg/g ps, soit une moyenne globale de $6,0 \pm 0,4$ µg/g ps. Ces concentrations sont largement inférieures à celles précédemment mesurées dans la Grande Rade de Nouméa en 2007 et 2008 (8,6 à 12,1 µg/g ps). Aucune tendance notable n'est constatée (Figure 14). Par ailleurs, les concentrations des lots transplantés restent dans le même ordre de grandeur que celle du lot témoin ($5,5 \pm 1,0$ µg/g ps), sauf pour la station St07 dont la concentration est statistiquement différente à celle du lot témoin (MW ; $p < 0,050$). Enfin, bien qu'aucune tendance ne soit constatée, les concentrations des stations St07, St16 et St18 sont, légèrement, mais statistiquement supérieures à celle de la station St06 (MW ; $p < 0,050$) (Tableau 5).
- Fer (Fe) : après 83 jours d'immersion**, les concentrations médianes du fer varient de 128 à 191 µg/g ps, soit une moyenne globale de 168 ± 28 µg/g ps. Ces teneurs correspondent aux teneurs minimales mesurées en Grande Rade de Nouméa (117 à 311 µg/g ps). Par ailleurs, elles sont toutes inférieures ou égales à la valeur fournie par le lot témoin (190 ± 47 µg/g ps), dont les stations St07 et St13 présentent des teneurs significativement inférieures à ce dernier (MW ; $p \leq 0,010$). Toutefois, entre certains lots transplantés, les concentrations varient de façon notable. Cette observation est particulièrement avérée pour les stations St03 et St06 (stations côtières) où ces valeurs sont significativement plus hautes que celles des stations St07 et St13 (stations lagunaires) (MW ; $p < 0,050$). Enfin, graphiquement, à l'exception des stations St07 et St13 voire St06, toutes les autres stations montrent une dispersion des résultats remarquable dont la station 16 présente la plus grande dispersion (Tableau 5 ; Figure 14).

- **Manganèse (Mn) : après 83 jours d'immersion**, les concentrations médianes du manganèse varient de 16,4 à 29,0 µg/g ps, soit une moyenne globale de $24,3 \pm 4,3$ µg/g ps. Elles sont proches, voire légèrement supérieures aux valeurs enregistrées en 2007 et 2008 dans la Grande Rade de Nouméa (12,3 à 24,4 µg/g ps). Ces concentrations supérieures sont relevées au niveau des stations St03, St06, St16 et St 18 (stations côtières) par rapport aux stations St07, St13 et St14 (stations lagunaires) (Figure 14). La variabilité inter-station est particulièrement avérée entre la station St14 et les stations St03, St06, St16 et St18 avec les teneurs moyennes différentes significatives (MW ; $p < 0,050$). Par ailleurs, à l'exception de la station St07 et St14 où les valeurs faibles ont été enregistrées, la variabilité des teneurs est statistiquement significative entre le lot témoin ($15,8 \pm 6,7$ µg/g ps) et les lots transplantés (MW ; $p < 0,050$) (Tableau 5).
- **Nickel (Ni) : après 83 jours d'immersion**, les concentrations médianes du nickel varient de 1,8 à 2,9 µg/g ps, soit une moyenne globale de $2,4 \pm 0,5$ µg/g ps. Ces teneurs correspondent aux valeurs minimales, voire sont inférieures à celles précédemment enregistrées en 2007 et 2008 dans la Grande Rade de Nouméa (2,0 à 13,2 µg/g ps). Les teneurs mesurées dans les lots transplantés aux stations St03, St06, voire St16 et St18 (stations côtières) varient peu par rapport aux teneurs du lot témoin ($2,9 \pm 0,6$ µg/g ps), à l'inverse des stations St07, St13 et St14 (stations lagunaires) où on observe les teneurs statistiquement plus faibles que le lot témoin (MW ; $p < 0,050$). Les valeurs les plus élevées sont constatées aux stations St03 et St06 (Figure 14). Ces concentrations sont statistiquement supérieures à celles enregistrées aux stations St07, St13 et St14 (MW ; $p < 0,050$). La station St18 présente une teneur moyennement élevée. Elle est statistiquement inférieure à celle de St06 mais significativement supérieure à celles enregistrées aux stations St07 et St13 (MW ; $p < 0,050$) (Tableau 5). Comme constaté pour les métaux Co, Cr et Fe, une fois de plus la station St16 montre la plus grande dispersion des résultats pour le Ni. Les plus faibles dispersions sont observées aux stations St07, St13 et St18 (Figure 14). Ces résultats permettent de mettre en évidence une variation entre les stations se situant près de la côte et celles se situant dans le lagon mais également entre deux stations ayant la même typologie mais subissant les pressions à différentes échelles (St06 et St18 ; station côtières).
- **Zinc (Zn) : après 83 jours d'immersion**, les concentrations médianes du zinc varient de 633 à 855 µg/g ps, soit une moyenne globale de 750 ± 71 µg/g ps. Elles correspondent aux valeurs minimales, voire inférieures à celles antérieurement mesurées dans la Grande Rade de Nouméa (748 à 1663 µg/g ps). Ces résultats ne sont pas statistiquement significatifs pour conclure à une quelconque variation, ni entre les lots transplantés et le lot témoin (840 ± 240 µg/g ps), ni entre les différents lots transplantés, à l'exception de St03 (teneur maximale) et St13 (teneur minimale) (MW ; $p < 0,05$) (Tableau 5). Graphiquement, toutes les stations présentent une grande dispersion des résultats dont la plus faible est observée à la station St07 et St18 (Figure 14).

CE QU'IL FAUT RETENIR

Globalement, une tendance commune est constatée pour les métaux Co, Cr, Fe, Mn et Ni et aucune pour les éléments As, Cu et Zn.

Ces éléments peuvent être rassemblés en deux groupes selon leurs comportements géochimiques ou bien leurs termes sources différents : les éléments appelés « latéritiques » (issus des massifs latéritiques ; Co, Cr, Fe, Mn et Ni) ; et ceux appelés « terrigènes » (issus de la géosphère mais également produits par l'activité anthropique ; As, Cu et Zn).

Ainsi, ces premières observations illustrent que les éléments terrigènes semblent présenter une dispersion selon la typologie des stations ; les concentrations élevées enregistrées aux stations dites « côtières » (à savoir St03, St06, St16 et St18) et les concentrations faibles aux stations dites « lagunaires » (à savoir St07, St13 et St14).

VARIBILITE SPATIALE

Plusieurs analyses statistiques ont été conduites afin de définir la variabilité spatiale des données obtenues, l'objectif étant d'obtenir une répartition géographique des métaux dans la zone d'étude. Ces informations pourraient être un outil dans la compréhension des influences ou pressions en jeu dans la zone d'étude menant à la bioaccumulation des éléments chez les organismes à des différentes concentrations.

MATRICE DE PROXIMITE INTER-ELEMENTS BIO-ACCUMULES

Rappel : pour 2013 aucune valeur de concentration en métaux pour St31 n'a pu être calculée en raison de la perte de la cage.

Dans un premier temps, une analyse de la matrice de proximité entre les éléments bio-accumulés a été conduite pour vérifier la distribution selon les stations (Tableau 6 et Tableau 7).

Pour les sept stations du suivi écotoxicologique, cette analyse (sans le lot témoin) montre l'existence de relations de proportionnalité entre les quatre éléments qui sont : le **cobalt**, le **chrome**, le **fer** et le **nickel** (Tableau 6).

Les coefficients de Pearson pour les six couples [Co/Cr ($r = 0,8222$), Co/Fe ($r = 0,8468$) et Co/Ni ($r = 0,8593$), Cr/Fe ($r = 0,8990$), Cr/Ni ($r = 0,9322$) et Fe/Ni ($r = 0,9203$)] sont supérieurs au seuil de « significativité » (seuil de dissimilarité = 0,80).

Tableau 6 : Matrice de proximité (Coefficient de corrélation de Pearson) des concentrations moyennes en métaux dans le bivalve *Isognomon isognomon*. Calcul sans prise en compte du lot témoin (Baie Maa).

	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
As	1							
Co	0,4230	1						
Cr	0,3468	0,8222	1					
Cu	0,1773	0,0072	-0,1063	1				
Fe	0,4137	0,8468	0,8990	-0,0024	1			
Mn	0,1218	0,2790	0,2401	0,2655	0,2659	1		
Ni	0,4023	0,8593	0,9322	-0,1196	0,9203	0,2681	1	
Zn	0,5442	0,5794	0,3635	0,0831	0,5309	0,0080	0,0080	1

Seuil de dissimilarité = 0,80

Lorsque les concentrations des individus du lot témoin sont incluses dans cette analyse, cette corrélation ne devient acceptable plus que pour trois éléments : le **cobalt**, le **fer** et le **nickel** et avec, de surcroît, des coefficients de corrélation en diminution (Tableau 7).

En effet, dans ce cas de figure, le chrome corrèle moins bien ($0,6885 < r < 0,7645$), très probablement du fait de la charge beaucoup plus faible de ce métal dans les individus du lot témoin par rapport aux individus transplantés.

Hormis ces éléments (Co, Cr, Fe et Ni), aucune corrélation avec les autres métaux ne peut être dégagée (Tableau 7).

Le Co, Cr, Fe, Mn et Ni sont les marqueurs des sols latéritiques du sud de la Nouvelle-Calédonie et par conséquent, ces métaux sont utilisés dans le suivi de la qualité du milieu marin comme des indicateurs des influences terrigènes naturelles et forcées. La bonne corrélation entre le Co, Cr, Fe et Ni traduit clairement l’empreinte terrigène dans la zone d’étude.

Tableau 7 : Matrice de proximité (Coefficient de corrélation de Pearson) des concentrations moyennes en métaux dans le bivalve *Isognomon isognomon*. Calcul avec prise en compte du lot témoin (Baie Maa).

	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
As	1							
Co	0,4118	1						
Cr	0,3848	0,7645	1					
Cu	0,2653	0,0758	0,0090	1				
Fe	0,2874	0,8101	0,7224	-0,0074	1			
Mn	0,2094	0,2806	0,3461	0,3200	0,1974	1		
Ni	0,2875	0,8053	0,6885	-0,1028	0,9000	0,1685	1	
Zn	0,3731	0,5853	0,2765	0,0679	0,6003	-0,0123	0,4827	1

Seuil de dissimilarité = 0,80

RELATION DE PROPORTIONNALITE ENTRE CO, CR, FE ET NI BIO-ACCUMULES

Les analyses ont été poursuivies par l’étude de relation de proportionnalité avec les quatre métaux (Co, Cr, Fe et Ni) afin de dégager une tendance spatiale permettant un classement des stations selon leurs niveaux de concentration (Figure 15).

Pour ces éléments, une relation linéaire étroite ($R^2 > 0,8500$) s’observe pour les sept stations de la zone d’étude (Figure 15).

Cette approche statistique permet de conclure que :

- malgré une grande variabilité des conditions environnementales et un faible gradient de concentrations pour les trois métaux (Co, Cr et Ni), les organismes bioaccumulateurs répondent relativement clairement ; et
- un classement des stations selon leurs niveaux de concentration peut être évoqué : **St13 = St07 < St14 < St18 = St16 < St03 = St06**. Ainsi les teneurs minimales sont toujours obtenues au niveau des stations St13 et St07 (stations lagunaire sous influence océanique) et les teneurs maximales sont observées aux stations St03 et St06 (stations côtières sous influence terrigène).

Bien que proche de la côte Est de l'île Ouen, la station St13 (Récif Ma) présente des teneurs parmi les plus faibles. Ces faibles teneurs sont probablement à relier à l'influence océanique qui est probablement dominante dans ce secteur.

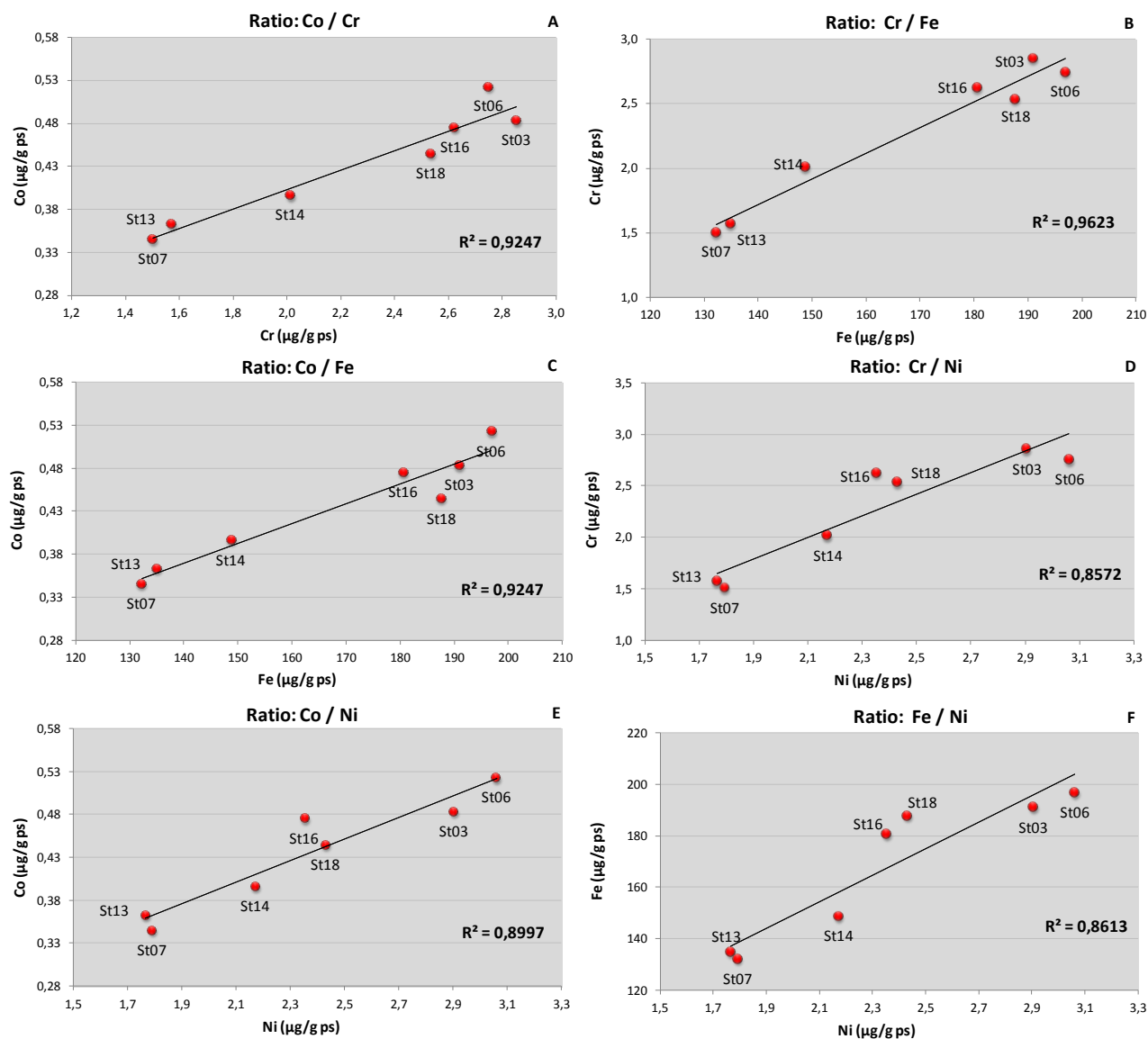


Figure 15 : Relations de proportionnalité entre deux métaux bioaccumulés chez les bivalves *Isognomon isognomon* transplantés lors de la campagne de 2013 (n=8). Seuil de dissimilarité = 0,80.

En effet, le modèle hydrodynamique du Canal de la Havannah (Derex et Douillet, 2008) montre clairement que la résultante des courants résiduels de marée est orientée selon un axe NE/SW prenant son origine au niveau de la passe de la Havannah (Douillet et Le Gendre, 2008). Il en résulte que l'influence terrigène de l'île Ouen y est vraisemblablement amoindrie du fait de la position plus à l'Ouest de la station St13.

D'autre part, la station St18 d'Ilot Casy est également relativement isolée de la Grande Terre, pourtant les teneurs

enregistrées y sont étonnamment similaires voire identiques à celles relevées à la station St16 (le port commercial de l'usine Vale-NC). Ces teneurs relativement hautes sont très probablement à relier au taux de précipitation exceptionnel que cette zone a reçu pendant cette campagne. En effet, la Baie du Prony est alimentée en apports terrigènes par plusieurs creeks, notamment ceux débouchant dans la baie du Carénage (Grande Rade) située au nord de la station St18. Cette caractéristique conjointement à l'hydrodynamique de faible intensité présente dans ce secteur, permet de justifier de l'influence terrigène à la station St18.

Les teneurs les plus élevées ont été enregistrées aux stations St03 (Baie du Port Boisé) et St06 (Baie Kwé). Proche de la côte, la station St06 se situe au débouché du bassin versant de la Baie Kwé et du massif minier de Vale-NC, tandis que la station St03 se situe au niveau de celui de la Baie du Port Boisé, en amont d'anciennes carrières abandonnées.

Les termes sources d'apports terrigènes conjointement à une hydrodynamique faible au niveau de ces deux stations (Douillet et Le Gendre, 2008) conduisent à considérer l'influence terrigène comme prépondérante, accentuée particulièrement en temps des fortes pluies.

Remarque

Une autre hypothèse de terme source potentiel concernerait les effluents déversés dans les eaux du Canal après la rupture du tuyau ; la première cassure s'étant probablement produite au début du mois d'août, soit deux semaines après l'immersion des cages : les deux stations (St03 et St06) sont situées dans les chenaux faisant face au Canal de la Havannah.

La modélisation a démontré que localement et momentanément le panache a pu longer la côte et que des lentilles d'eau relativement peu diluées ont pu se former sous certaines conditions hydrodynamiques, notamment à la faveur de la renverse des courants au moment de l'étal de marée et par les vents des régimes d'ouest voire de nord (Fernandez et al., 2013). Toutefois, les simulations montrent clairement que Port Boisé et la Baie Kwé n'ont pas été concernés par les lentilles de surconcentration formées. Cette information permet de conclure que l'augmentation des concentrations en métaux observée à la station St03 et St06 serait imputable plutôt aux apports inhabituels de matière issue du lessivage des bassins versants.

MATRICE DE PROXIMITE ENTRE METAUX BIO-ACCUMULES ET METAUX DISSOUS

Les concentrations en métaux accumulés dans les chairs et celles mesurées dans la colonne d'eau (formes dissoutes et/ou particulaires) sont liées. Cependant, la corrélation entre ces grandeurs n'est pas évidente à établir.

En effet, l'incorporation de métaux dans les tissus dépend, d'une part, des voies de transferts trophiques dont la complexité est avérée depuis longtemps (eg. : Strady et al., 2011) et, d'autre part, des influences terrigènes dont l'occurrence et l'intensité sont fonction de paramètres hydro-climatiques. A cette problématique, le type de donnée collectée constitue une difficulté supplémentaire. En effet, la bioaccumulation résulte d'un phénomène intégrateur sur 3 mois, contrairement à l'analyse des masses d'eau dont l'échantillonnage est de type discret et de fréquence semestrielle. En dépit de ces difficultés, il a été recherché si une tendance globale pouvait être extraite pour expliquer le profil de distribution des métaux d'influence terrigène dans les organismes bioaccumulateurs.

Dans cet objectif, les concentrations de chaque métal mesurées dans les organismes et celles dosées dans la colonne d'eau ont été comparées. Pour la comparaison, il a été considéré les données des métaux dissous de la campagne semestrielle de suivi physico-chimique « Colonne d'eau » réalisée en août 2013. Les valeurs utilisées correspondent

aux concentrations obtenues en **surface** et à **mi-profondeur** de la colonne d'eau; ces deux cotes étant assimilables à la profondeur d'immersion des cages. En effet, en moyenne les cages ont été déployées à -11 m sur une moyenne de 33 m de profondeur, soit un tiers de la colonne d'eau.

Dans le cadre de l'étude de Transplantation 2013, sept des huit stations⁹ sont communes aux opérations de suivi physico-chimique, à savoir : St03, St06, St07, St13, St14, St16 et St18.

⁹**Rappel :** pour 2013 aucune valeur des concentrations en métaux pour St31 n'est obtenue en raison de la perte de la cage et donc la station St05 du suivi colonne d'eau qui correspond à la station St31 n'est pas retenue pour ces études de comparaison avec les données métaux dissouts.

L'analyse de la matrice de proximité entre les métaux bio-accumulés et dissouts dans les eaux de surface de la colonne d'eau montre l'existence de relations de proportionnalité entre les deux éléments latéritiques, le **chrome** et le **nickel**, avec une corrélation particulièrement forte ($r > 0,9000$) (Tableau 8). Ces observations sont en parfait accord lorsque les concentrations moyennées sur les deux profondeurs (surface et mi-profondeur) sont utilisées. Par contre, aucune corrélation n'est constatée avec les concentrations mesurées à mi-profondeur uniquement (Tableau 8).

En effet, le suivi des métaux dissouts dans la colonne d'eau a démontré que les concentrations dans les couches intermédiaires de la colonne d'eau sont relativement invariantes, voire très homogènes dans le temps (Le Grand et al., 2013). Les veines d'eau restent bien individualisées, notamment par l'existence courants matérialisés par des thermoclines ; ces eaux ne sont que difficilement concernées par les apports en eau douce en surface, ni par la resuspension des sédiments qui reste limitée au fond.

Par conséquent, d'après les résultats obtenus ici, il est possible que le Cr et Ni soit majoritairement bio-disponibles sous sa forme dissoute ($r > 0,9000$), ce qui serait pas le cas pour le Co et Fe ($r < 0,8000$) dont il faudrait alors évaluer la contribution de formes autres que dissoutes.

Le Cr et Ni constituant d'excellents marqueurs des sols latéritiques du sud de la Nouvelle-Calédonie, un classement des stations en fonction de leurs concentrations a été recherché avec l'étude de relation de proportionnalité.

Tableau 8 : Matrice de proximité (Coefficient de corrélation de Pearson) des concentrations en métaux dissouts dans la colonne d'eau (à la surface et mi-profondeur et la moyenne de ces deux profondeurs) et des concentrations moyennes en métaux dans le bivalve *Isognomon isognomon*.

	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Surface	0,7935	0,9104	-0,5148	0,5177	0,4609	0,9250	-0,1859
Mi-profondeur	-1,0000	0,2791	0,2591	0,4268	-0,0092	0,0433	-0,3445
Moyenne	0,7591	0,9158	-0,5430	0,5481	0,4512	0,9374	-0,2413

Seuil de dissimilarité = 0,80

RELATION DE PROPORTIONNALITE ENTRE CR ET NI BIO-ACCUMULES ET DISSOUS

Afin de dégager une tendance spatiale pouvant aboutir à un classement des stations selon leurs niveaux de concentration mesurés à la fois dans les bivalves et dans la colonne d'eau, les analyses statistiques ont été poursuivies par l'étude de relation de proportionnalité avec les deux métaux dissous (Cr et Ni) (Figure 16).

Pour ces deux éléments, une relation linéaire significative ($R^2 > 0,8500$) s'observe pour les sept stations de la zone d'étude à la fois avec les valeurs de métaux obtenues pour la surface de la colonne d'eau (Figure 16A et Figure 16C) et pour la moyenne des concentrations sur les deux profondeurs (surface et mi-profondeur) (Figure 16B et Figure 16D)

Cette approche statistique permet de confirmer que :

- malgré une grande variabilité des conditions environnementales et un faible gradient de concentrations pour les deux métaux (Cr et Ni), les organismes bioaccumulateurs répondent relativement clairement ;
- un classement des stations selon leurs niveaux de concentration peut être évoqué : **St13 = St07 < St14 < St18 = St16 < St03 = St06**. Ainsi les teneurs minimales sont toujours observées au niveau des stations St13 et St07 (stations lagunaires sous influence océanique) et les maximales sont mesurées aux stations St03 et St06 (stations côtières sous influence terrigène).

Ce classement est conforme avec les conditions hydrodynamiques observées à ces stations et leur position géographique. Par ailleurs, le classement est en parfait accord avec la relation de proportionnalité entre Co, Cr, Fe et Ni bio-accumulés.

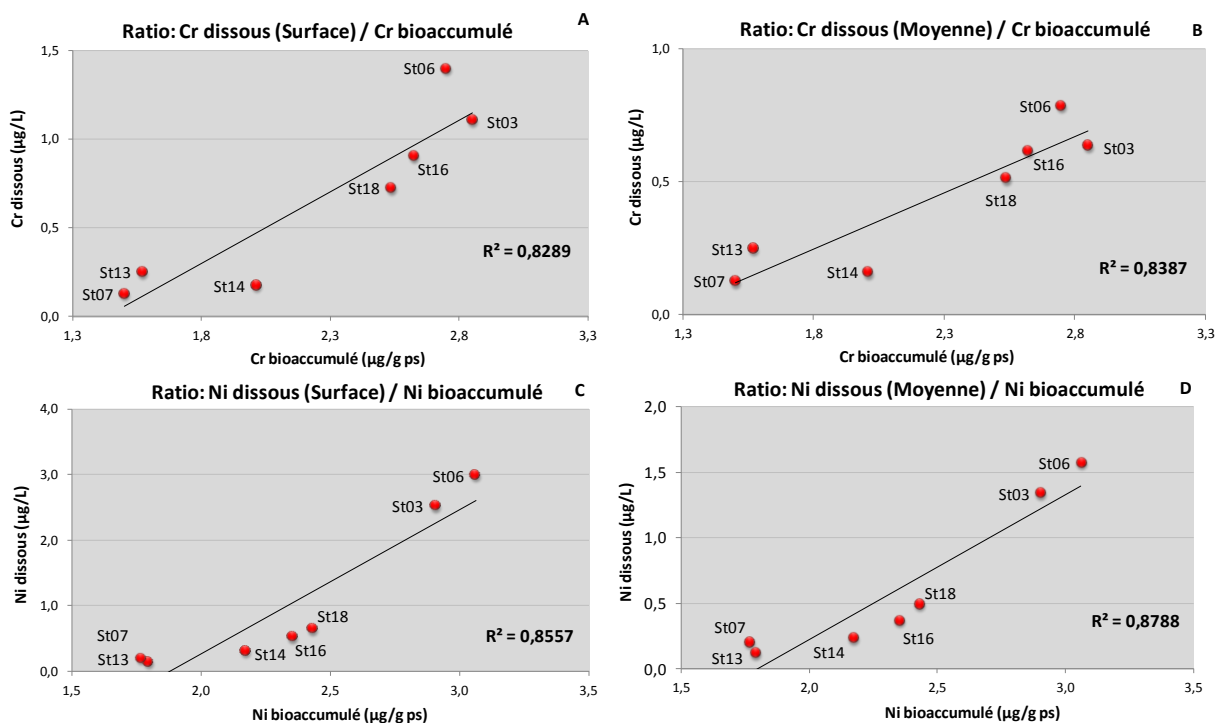


Figure 16 : Corrélation entre la concentration de métal bioaccumulé chez le bivalve *Isognomon isognomon* transplanté lors de la campagne de 2013 (n=8) et la concentration du même métal dissous dans les eaux de surface de la colonne d'eau et la moyenne entre les valeurs de surface et de mi-profondeur. Seuil de dissimilarité = 0,80.

VARIABILITE INTER-ANNUELLE

Pour chaque métal, les concentrations mesurées en 2013 sur l'ensemble des stations ont été comparées à celles précédemment obtenues en 2012 (Figure 17). Globalement, les principales tendances pour le réseau de suivi sont explicitées ci-dessous :

- **Arsenic (As)** : les teneurs en arsenic mesurées en 2013 sont toutes inférieures à celles de 2012, y compris le lot témoin. La diminution est particulièrement marquée aux stations St06, St13, St14, et St18 ainsi que pour le lot témoin. Cette variation interannuelle est significative (MW ; $0,005 < p < 0,05$).
- **Cobalt (Co)** : les teneurs en cobalt mesurées en 2013 sont semblables à celles de 2012 pour les stations St07, St13 et St14 (stations lagunaires) et St16 tandis qu'elles sont supérieures à celles de 2012 pour les stations St03, St06 et St18 (stations côtières). Toutefois, l'augmentation n'est significative que pour la station St18 (MW ; $p < 0,005$).
- **Chrome (Cr)** : les teneurs en chrome mesurées en 2013 sont similaires à celles de 2012 pour les stations St07, St13 et St14 (stations lagunaires voire océaniques) et St16 tandis qu'elles sont supérieures à celles de 2012 pour les stations St03, St06 et St18 (stations côtières). Cette tendance est inversée pour le lot témoin. Statistiquement, la variation interannuelle est significative pour les stations St06 et St18 (MW ; $p < 0,005$).
- **Cuivre (Cu)** : en 2013, sauf pour les stations St13 et St 16 dont les teneurs augmentent, les teneurs en cuivre sont similaires, voire inférieures à celles de 2012. Cependant, la variation interannuelle n'est que faiblement significative pour une station, la St14. Elle est également significative pour le lot témoin dont la concentration est inférieure à celle de 2012 (MW ; $p < 0,05$).
- **Fer (Fe)** : hormis deux stations (St06 et St18) pour lesquelles les concentrations sont respectivement 1,3 et 1,7 fois plus élevées en 2013 par rapport à 2012, les valeurs varient peu. Cette variation interannuelle n'est significative que pour la station St18 (MW ; $p < 0,05$).
- **Manganèse (Mn)** : hormis deux stations (St03 et St06) pour lesquelles les concentrations sont respectivement 1,4 et 1,6 fois plus élevées en 2013 par rapport à 2012, les valeurs varient peu. A l'inverse, la concentration du lot témoin enregistrée en 2013 est inférieure à celle de 2012. La variation interannuelle n'est significative que pour la station St06 (MW ; $p < 0,05$).
- **Nickel (Ni)** : comme constaté pour le Co et Cr, les teneurs en Ni sont similaires entre les deux années pour les stations St07, St13 et St14 (stations lagunaires) et St16 tandis qu'elles sont supérieures pour les stations St03, St06 et St18 (stations côtières) en 2013 par rapport à 2012. Cette augmentation interannuelle est significative pour les stations St06 et St18 (MW ; $0,005 < p < 0,05$). Elle est également significative pour le lot témoin dont la concentration est supérieure à celle de 2012 (MW ; $p < 0,05$).
- **Zinc (Zn)** : les teneurs en zinc lors de la campagne 2013 demeurent similaires à celles de 2012, à l'exception des stations St07, St13 et St14 où elles sont légèrement inférieures et la station St03 où elle est légèrement supérieure. Cependant, aucune de ces variations interannuelles n'est significative (MW ; $p > 0,05$).

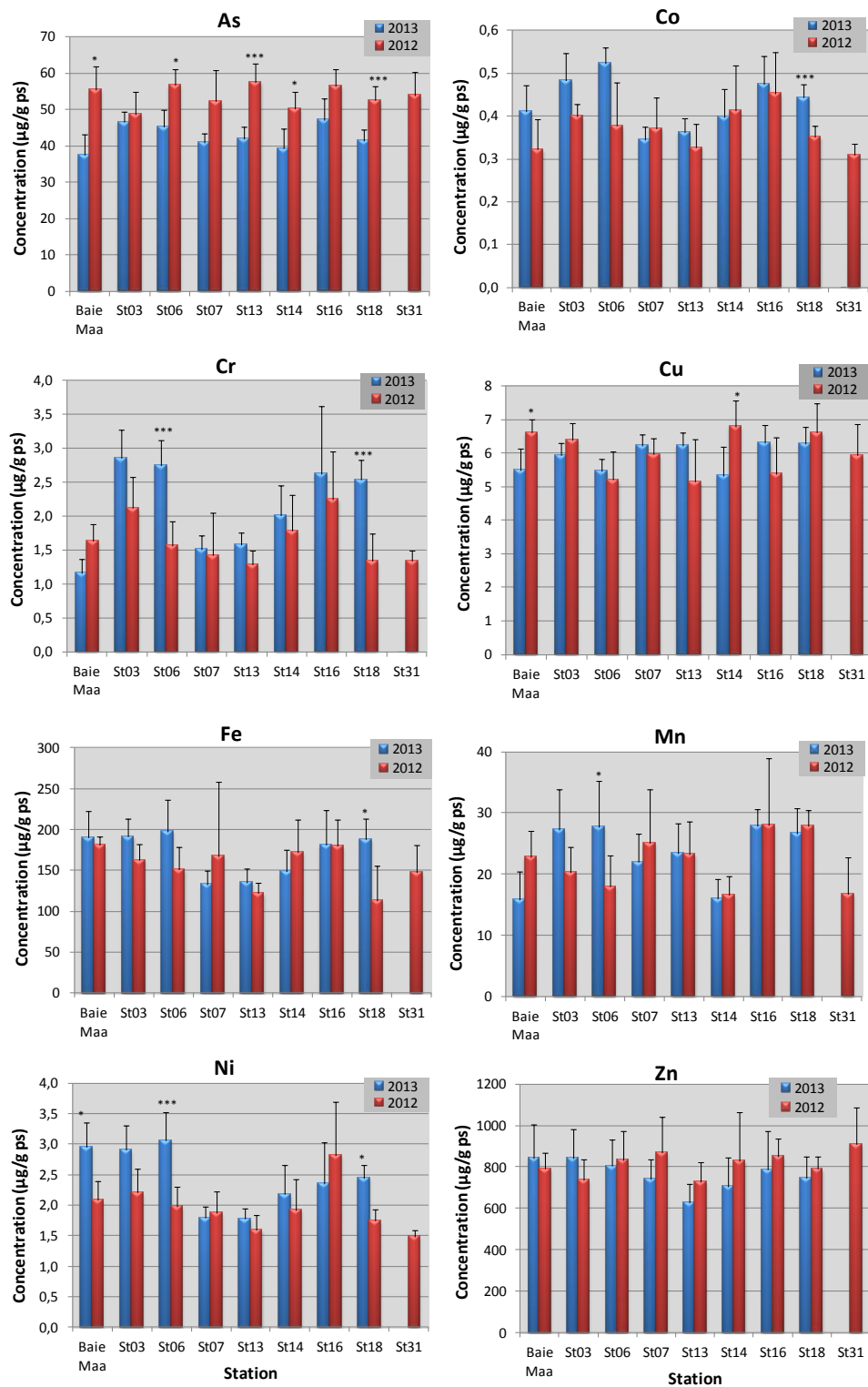


Figure 17 : Evolution temporelle des concentrations moyennes des huit métaux analysés (As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn) chez le bivalve *Isognomon isognomon* transplanté aux différentes stations en 2013 et 2012 (n=8 et 5, respectivement).

Comme constaté pour 2013, les données obtenues pour le cobalt, le chrome et le nickel en 2012 montrent également un lien de proportionnalité (Figure 18) et un classement des stations selon leurs niveaux de concentration.

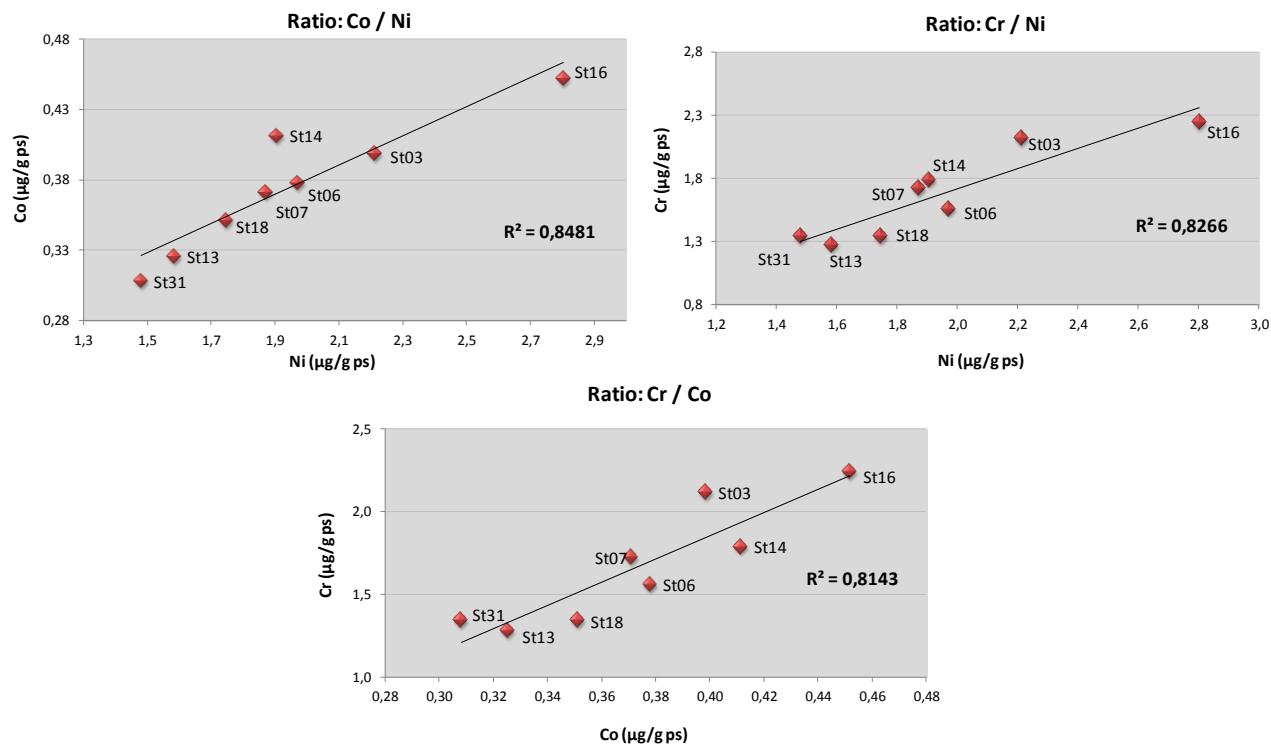


Figure 18 : Relations de la proportionnalité entre deux métaux bio accumulés chez le bivalve *Isognomon isognomon* transplantés lors de la campagne de 2012 (n=5).

Cependant, la comparaison de distribution spatiale des teneurs montre une évolution importante entre les deux années. Les classements des 7 stations par ordre croissant sont :

- St13 < St18 < St07 = St06 = St14 = St03 < St16 **en 2012** ; et
- St13 = St07 < St14 < St18 = St16 < St03 = St06 **en 2013**.

En 2013, les stations sous les influences terrigènes (St03, St06, St16 et St18) se distinguent clairement des celles influencées par les apports océaniques (St07 et St13). Logiquement, les stations côtières, enclavées dans des baies seraient plus enclines à être rapidement impactées par les apports terrigènes et donc présenteraient des teneurs en métaux latéritiques supérieures à celles qui sont distantes de la côte. En effet, les courants océaniques permettent un renouvellement régulier des masses d'eau qui permettent une dilution rapide des apports terrigènes.

Ce démarquage est peu évident en 2012. En effet, la station St18 (Baie du Prony) montrait des teneurs plus faibles qu'en St07 (Balise Ioro ; Canal du Havannah) mais similaires à celles de St06 et St03 (Baie de Port Boisé et Baie Kwé) ; le gradient de concentration observé en 2013 est notamment due aux stations St06 et St18 qui présentaient des teneurs en Co, Cr, Fe, Mn et Ni plus élevées qu'en 2012, et de manière significative pour Cr et Ni.

Par ailleurs, en 2013, la position de la station St14 dans le classement est également intéressante. Elle présente des teneurs supérieures aux stations St07 et St13 mais inférieures aux 4 stations côtières. En effet, cette station lagonaire

à Port Goro est partiellement ouverte aux courants océaniques, cependant, elle se situe à proximité de la côte dans un secteur anciennement concerné par l'exploitation minière (Kuébini).

CE QU'IL FAUT RETENIR

Globalement, le classement par ordre d'importance en métaux bioaccumulés est : $Zn > Fe > As > Mn > Cu > Ni = Cr > Co$. Ce classement est identique par rapport à celui de 2012.

A l'inverse de 2012, en 2013, les variations inter-stations sont manifestes (MW ; $p < 0,05$). Ces variations inter-stations significatives ainsi que les variations intra-stations sont synthétisées ci-dessous :

Elément	Variation inter-stations (Mann Whitney; $p < 0,05$)	Variation intra-station (dispersion des données)
As	St07, St13 et St 14 < St03	St07 et St13 <
Co	St07 et St13 < St03, St06, St16, St18	St06 < et St16 >
Cr	St07, St13 et St14 < St03 et St06	St06 St07, St13 et St14 < et St16 >
Cu	St06 < St07, St16 et St18	St14, St16 et St18 >
Fe	St07, St13 < St03, St06 et St18	St06, St07 et St13 < et St16 >
Mn	St14 < St03, St06, St16 et St18	Toutes les stations >
Ni	St07, St13, St14 < St03, St06, St18	St07 et St13 < et St16 >
Zn	St13 < St03	Toutes les stations >

Pour les éléments dits « latéritiques » en lien direct avec l'exploitation minière (Co, Cr, Fe, Mn et Ni), ces résultats permettent de mettre en évidence une distribution ordonnée selon le type de stations, « côtières » (St03, St06, St16 et St18) et « lagunaires » (St07, St13 et St14). Aucune tendance n'est constatée pour les éléments autres comme As et Zn, voire Cu.

En termes de variation intra-station, celle-ci est très importante pour le Mn et Zn quelle que soit la station. De même, aucune tendance claire n'a pas pu être constatée pour l'As. Pour des raisons d'éloignement et/ou d'exposition aux influences océaniques, cette variabilité est minimale aux stations St07 et St13 pour Cr, Fe et Ni, trois métaux « latéritiques ». De manière surprenante, la variation est également minimale en St06 (Baie Kwé) pour les métaux latéritiques Co, Cr et Fe malgré le fait que cette station se trouve dans un secteur d'influence minière directe. A l'inverse, la dispersion est maximale en St16 (Port de commerce, Baie du Prony) pour Co, Cr, Fe et Ni ainsi que pour Cu. Pour le Cu, la dispersion maximale a été observée au niveau des stations St14 et St18.

Les quatre marqueurs latéritiques (Co, Cr, Fe et Ni) qui montrent des distributions identiques, permettent le classement des stations selon leurs niveaux des concentrations : $St13 = St07 < St14 < St18 = St16 < St03 = St06$.

Ce classement a pour bornes géographiques les stations St07/St13 (Canal de Havannah/Ile Ouen, respectivement) et St03/St06 (Port Boisé/Baie Kwé). Entre ces limites, les 3 autres stations (St14, St16, St18) se répartissent selon un ordonnancement qui n'est pas une fonction directe de la distance à la côte. En effet, ces observations sont plutôt à relier aux conditions hydro-climatiques spécifiques de chacune de ces stations.

Les concentrations bio-accumulées et les concentrations en métaux dissous des eaux de sub-surface (surface + mi-profondeur) du suivi physico-chimique de la colonne d'eau (août 2013) ont montré une très bonne corrélation pour les métaux Cr et Ni. Ces résultats statistiques reconfirment le classement des stations ci-dessus proposé.

Il est rappelé que l'étude de Transplantation 2013 se singularise par un taux de précipitations exceptionnellement élevé (1065 mm en 83 jours, contre 411 mm en 114 jours pour 2012) et que les trois épisodes pluvieux en 2013 se sont distribués tout le long de la période d'immersion (contrairement à l'étude de Transplantation 2012 dont les deux épisodes pluvieux sont survenus au tout début et à la toute fin de la période d'exposition).

Le taux de précipitation serait donc à l'origine des augmentations en teneurs des métaux terrigènes enregistrées en 2013, particulièrement aux stations St06 et St18 ; les températures relevées aux stations côtières (St03, St06, St16 et St18) ayant clairement montré que les cages ont été exposées aux apports d'eau de pluies.

CONCENTRATIONS EN METAUX DANS LES ALGUES

Après les 83 jours d'immersion, une perte conséquente de matériel biologique a été constatée sur toutes les stations.

En effet, sur trois des huit stations (St13, St16 et St18), seules trois frondes ont pu être analysées sur les lots de 30 initialement placées dans les cages pour l'étude. Pour la station St03, une seule fronde a pu être récupérée pour l'analyse. Aucune fronde n'a été trouvée aux stations St06, St07 et St14 tandis que le dispositif entier de la station St31 avait disparu.

Cette diminution du nombre de frondes se révèle être trop importante pour pouvoir traiter les données analytiques et émettre une quelconque interprétation pertinente sur l'évolution des concentrations fournies par cette étude. Cependant, les données des concentrations des métaux sont quand même présentées dans l'annexe 4.

Remarque :

L'origine de cette perte semblait être le broutage des frondes d'algues par les poissons. En effet, en 2012, lors des phases de broyage des cages pour éliminer le biofouling et de la récupération des mouillages, de grandes colonies de poissons de petite taille ont pu être observées à l'intérieur des nasses. Pour remédier à cette colonisation, en 2013, la maille des cages contenant les algues avait été réduite afin limiter l'accès de ces populations de petits poissons aux filets contenant les frondes.

*Ces pertes répétées amènent à conclure que, si l'algue *L. variegata* semble fournir une réponse intéressante aux variations environnementales et de ce fait semble être un bon bio-indicateur, elle ne peut être utilisée dans les conditions d'exposition actuelles malgré les modifications expérimentales apportées.*

En effet, si la perte systématique du nombre de frondes a été constatée depuis 2009, cette année, les frondes récupérées montraient manifestement un état de décomposition pour la plupart. Une des explications avancées peut

être liée à la diminution de la maille qui aurait pu contribuer à la décomposition des frondes en réduisant la lumière solaire nécessaire à la photosynthèse des algues en raison de l'important biofouling développé sur les dispositifs.

De nouvelles solutions techniques sont donc maintenant à l'étude pour pallier ce qui est peut-être davantage lié à une mortalité des frondes qu'à un broutage par des poissons.

CONCLUSION

Cette cinquième campagne de transplantation de bioindicateurs en stations artificielles a permis de préciser un certain nombre d'aspects techniques et scientifiques :

- L'étude biométrique des bivalves *I. isognomon* entre le début et la fin de la période de transplantation a confirmé que les conditions (trophiques) régnant à proximité des cages sont propices à la croissance des spécimens. Ces conditions sont similaires à celles de la zone de collecte (Baie Maa). Cependant, en dépit de cette similarité, les taux de croissances sont en nette baisse par rapport à l'année 2012 à l'exception de la station St07. Cette diminution est plus marquée pour les longueurs des coquilles.

D'une part, les individus récoltés pour l'étude en 2013 semblent avoir, globalement, atteint la taille critique après laquelle la croissance ralentit naturellement, en particulier celle de la longueur des coquilles.

De surcroît, il est fortement possible que la croissance ait été ralentie à l'issue des conditions météorologiques exceptionnelles (fortes précipitations) qui ont engendré des modifications physico-chimiques dans la colonne d'eau, particulièrement au niveau des stations directement influencées par les apports côtiers (importante mortalité de la faune native observée notamment dans la Baie Kwé).

- Les concentrations en métaux dans les tissus des bivalves transplantés varient selon l'élément considéré et également selon la station. Toutefois, comme en 2012, le classement en métaux bioaccumulés est, par ordre d'importance, toujours respecté, à savoir : $Zn > Fe > As > Mn > Cu > Ni = Cr > Co$.

En revanche, les variations inter-stations sont manifestes ; les teneurs en métaux terrigènes (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) sont globalement distribuées selon les stations dites « côtières » (St03, St06, St16 et St18) et les stations dites « lagunaires » (St07, St13 et St14).

En termes de variation intra-stations, celle-ci est très dispersée pour le Mn et Zn, quelle que soit la station. De même, aucune tendance claire n'a pas pu être constatée pour l'As. Pour des raisons d'éloignement et/ou d'exposition aux influences océaniques, cette variabilité est minimale aux stations St07 et St13 pour Cr, Fe et Ni. De manière surprenante, la variation est également minimale en St06 (Baie Kwé) pour Co, Cr et Fe, malgré l'exposition de la station à l'influence minière directe (zone excavée). A l'inverse, la dispersion est maximale en St16 (Port de commerce, Baie du Prony) pour Co, Cr, Fe et Ni ainsi que pour Cu. Pour le Cu, la dispersion maximale a été observée au niveau des stations St14 et St18.

- Les traitements statistiques ont permis d'établir un classement des stations selon leurs niveaux des concentrations en métaux (Co, Cr, Fe et Ni) : $St13 = St07 < St14 < St18 = St16 < St03 = St06$.

Les concentrations bio-accumulés et les concentrations en métaux dissous des eaux de sub-surface (surface + mi-profondeur) du suivi physico-chimique de la colonne d'eau (août 2013) ont montré une très bonne corrélation pour Cr et Ni. Ces résultats statistiques reconfirment le classement des stations ci-dessus proposé.

- La campagne 2013 se singularise par un taux de précipitations exceptionnellement élevé (1065 mm en 83 jours) répartis en 3 épisodes pluvieux distribués tout le long de la période d'immersion. Les précipitations sont donc à l'origine des augmentations en teneurs des métaux terrigènes enregistrés en 2013, particulièrement aux stations St06 et St18 ; les températures relevées aux stations côtières (St03, St06, St16 et St18) ayant clairement montré que les cages ont été exposées aux apports d'eau de pluies.

En ce qui concerne l'algue *L. variegata*, une perte conséquente de matériel biologique a été constatée sur toutes les stations. Cette diminution du nombre de frondes se révélant trop importante, les données analytiques n'ont pas pu être traitées.

Ces pertes répétées amènent à conclure que, si l'algue *L. variegata* semble fournir une réponse intéressante aux pressions environnementales et de ce fait semble être un bon bio-indicateur, elle ne peut être utilisée dans les conditions d'exposition actuelles malgré les modifications expérimentales récemment apportées.

De nouvelles solutions techniques sont donc maintenant à l'étude pour pallier ce qui est peut-être davantage lié à une mortalité des frondes qu'à un broutage par des poissons.

REFERENCES

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.*

Beliaeff B, Bouvet G, Fernandez JM, David C, Laugier T, 2011. Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle-Calédonie. Programme ZONECO et programme CNRT "Le Nickel et son environnement". 169pp

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., 2009a. 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., 2009b. 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., Rounsard F., Legrand H., 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. Contrat de Consultance AEL-LEA/Vale NC, Convention n°C2466, 44 p.

Dereux P et Douillet P, 2008. Modélisation et simulation du transport des formes dissoutes et particulaires. Modèle hydrodynamique. Atlas des courants. Convention IRD/Goro-Ni n°1124, 83p

Douillet P. et Le Gendre, 2008. Modélisation et simulation du transport des formes dissoutes et particulaires. Modèle hydrodynamique. Note technique – Validation. Convention IRD/Goro-Nickel n°1124, 54p.

Fernandez J.M., Le Grand H., Senia J., Moreton, B., Kaplan H., Pousse C., 2013. Rupture de l'émissaire : analyse des eaux de mer autour du point de cassure du diffuseur ; Analyse de l'effluent industriel (physico-chimique et toxicité) ; Premiers résultats de modélisation de la dispersion du panache. Contrat de Consultance AEL-LEA/Vale NC, Convention n°131210-VI-22, 35 p.

Ficher R., Adjero 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 input in coral lagoon systems. *Aquatic Living Resources*, 18: 125-147.

Kanazawa, T. et Sato S., 2008. Environmental and physiological controls on shell microgrowth pattern of *Ruditapes philippinarum* (Bivalvia: Veneridae) from Japan. *Journal of Molluscan Studies*, 74: 89-95.

Le Grand H., Kaplan H., Haddad L., Goyaud A., Moreton B., Kumar-Roiné S., Fernandez J.M., 2013. Suivi de la qualité physico-chimique de l'eau de mer de la zone sud du lagon de Nouvelle-Calédonie. Contrat de Consultance AEL-LEA/Vale NC, Convention n°T1368, 80 p.

McIvor, A.L., Alridge, D.C., 2007. The reproductive biology of the depressed river mussel, *Pseudanodonta complanata* (Bivalvia: Unionidae), with implications for its conservation. *Journal of Molluscan Studies*, 73: 259-266.

Scherrer B., 1984. Biostatistique. Gaëtan Morin Editions, Paris.

Strady E, Blanc G, Baudrimont M, Schäfer J, Robert S, Lafon V, 2011. Roles of regional hydrodynamic and trophic contamination in cadmium bioaccumulation by Pacific oysters in the Marennes-Oléron Bay (France). *Chemosphere*, 84: 80-90.

Zar J.H., 1999. Biostatistical Analysis, 4th Edition. Prentice Hall International, London.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES HUIT STATIONS DE SUIVI ECOTOXICOLOGIQUE DU MILIEU MARIN PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIO-ACCUMULATRICES.	12
FIGURE 2 : PLUVIOMETRIE JOURNALIERE MESUREE AU NIVEAU DE L'ANCIENNE USINE PILOTE DE VALE-NC PENDANT TOUTE LA DUREE DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2013 (83 JOURS D'IMMERSION).	13
FIGURE 3 : COMPARAISON DES DONNEES DE PLUVIOMETRIE JOURNALIERE MESUREES AU NIVEAU DE L'ANCIENNE USINE PILOTE DE VALE-NC PENDANT TOUTE LA DUREE DES CAMPAGNES DE TRANSPLANTATION 2012 ET 2013.	14
FIGURE 4 : EVOLUTION ET COMPARAISON DE LA VITESSE DES VENTS (MOYENNES JOURNALIERES) MESUREES EN CONTINU A LA STATION METEOROLOGIQUE DE VALE-NC LORS DES CAMPAGNES DE 2013 ET 2012.	15
FIGURE 5 : EVOLUTION ET COMPARAISON DES DIRECTIONS DE VENTS (MOYENNES JOURNALIERES) MESUREES EN CONTINU A LA STATION METEOROLOGIQUE DE VALE-NC LORS DES CAMPAGNES DE 2013 ET 2012.	15
FIGURE 6 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU DE MER PENDANT LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2013. LES DONNEES ONT ETE RECUEILLIES AUX STATIONS St13, St07 ET St14 TOUTES LES 4 HEURES, ENTRE LE 15 JUIN 2013 ET LE 02 SEPTEMBRE 2013, SOIT DURANT LES PREMIERS 80 JOURS SUR 83 JOURS DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION PAR LES CAPTEURS MINIATURISES. (●) = REVELES JOURNALIERS A UNE FREQUENCE DE 4 HEURES ; (—) = MOYENNES DE SIX RELEVES JOURNALIERS.	16
FIGURE 7 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU DE MER PENDANT LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2013. LES DONNEES ONT ETE RECUEILLIES AUX STATIONS St06, St18 ET St16 TOUTES LES 4 HEURES, ENTRE LE 15 JUIN 2013 ET LE 02 SEPTEMBRE 2013, SOIT DURANT LES PREMIERS 80 JOURS SUR 83 JOURS DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION PAR LES CAPTEURS MINIATURISES. (●) = REVELES JOURNALIERS A UNE FREQUENCE DE 4 HEURES ; (—) = MOYENNES DE SIX RELEVES JOURNALIERS.	17
FIGURE 8 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU DE MER PENDANT LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2013. LES DONNEES ONT ETE RECUEILLIES AUX STATIONS St03, TOUTES LES 4 HEURES, ENTRE LE 15 JUIN 2013 ET LE 02 SEPTEMBRE 2013, SOIT DURANT LES PREMIERS 80 JOURS SUR 83 JOURS DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION PAR LES CAPTEURS MINIATURISES. (●) = REVELES JOURNALIERS A UNE FREQUENCE DE 4 HEURES ; (—) = MOYENNES DE SIX RELEVES JOURNALIERS.	18
FIGURE 9 : COMPARAISON DES PROFILS DE TEMPERATURES MOYENNES JOURNALIERES DE L'EAU DE MER AU NIVEAU DES STATIONS DITES (A) « SOUS L'INFLUENCE TERRIGENE » ET (B) « SOUS L'INFLUENCE OCEANIQUE » AVEC LA PLUVIOMETRIE LORS DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2013. LES DONNEES ONT ETE RECUEILLIES A CHAQUE STATION TOUTES LES 4 HEURES DU 15 JUIN 2013 AU 02 SEPTEMBRE 2013, SOIT DURANT LES PREMIERS 80 JOURS SUR 83 JOURS DE LA CAMPAGNE.	19
FIGURE 10 : COMPARAISON DES DONNEES DE TEMPERATURE DE L'EAU DE MER (MOYENNES JOURNALIERES) DES CAMPAGNES TRANSPLANTATION 2013 ET 2012. CES DONNEES ONT ETE RECUEILLIES AU NIVEAU DU RECIF D'ORO, A LA STATION St07 PAR UN CAPTEUR MINIATURISE POUR 2013 ET PAR LA STATION METEOROLOGIQUE DU RECIF IORO POUR 2012. POUR LA CAMPAGNE 2012, LES DONNEES CONCERNENT SEULEMENT 68 DES 114 JOURS DE LA CAMPAGNE 2012.	20
FIGURE 11 : COMPARAISON DES VALEURS MOYENNES DES POIDS FRAIS TOTAUX (A) ET DES LONGUEURS DES COQUILLES (B) AVANT (Ti) ET APRES (Tf) TRANSPLANTATION CHEZ LE BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> (N=25 INDIVIDUS PAR STATION).	24
FIGURE 12 : COMPARAISON INTERANNUELLE DES (A) TAUX MOYENS DE CROISSANCE JOURNALIERE (TCJ) EN POIDS FRAIS TOTAL (PF) ET EN LONGUEUR DES COQUILLES (LONG.) ET (B) CROISSANCE MOYENNE EN POIDS FRAIS TOTAL (PF) ET EN LONGUEUR DES COQUILLES (LONG.) CHEZ LES BIVALVES <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> TRANSPLANTES LORS DES CAMPAGNES 2013 ET 2012.	26
FIGURE 13 : COMPARAISON INTERANNUELLE DES INDICES DE CONDITION PHYSIOLOGIQUE (IC) MOYENNE DES BIVALVES <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> TRANSPLANTES LORS DES CAMPAGNES 2012 ET 2013.	27
FIGURE 14 : VARIABILITE DES CONCENTRATIONS EN METAUX CHEZ LE BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> LORS DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2013 (N=8 POOLS DE 3 SPECIMENS/STATION). (LES RECTANGLES REPRESENTENT LA DISTRIBUTION DE 50 % DES DONNEES ; A L'INTERIEUR, LA CROIX ROUGE REPRESENT LA MOYENNE ET LE TRAIT HORIZONTAL LA VALEUR MEDIANE DES DONNEES ; LES	

POINTS BLEUS REPRESENTENT LES VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES ET LES BARRES VERTICALES REPRESENTENT LES ECART-TYPE. « BAIE MAA » = LOT INITIAL EN T1).....	29
FIGURE 15 : RELATIONS DE PROPORTIONNALITE ENTRE DEUX METAUX BIOACCUMULES CHEZ LES BIVALVES <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> TRANSPLANTES LORS DE LA CAMPAGNE DE 2013 (N=8). SEUIL DE DISSIMILARITE = 0,80.	35
FIGURE 16 : CORRELATION ENTRE LA CONCENTRATION DE METAL BIOACCUMULE CHEZ LE BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> TRANSPLANTE LORS DE LA CAMPAGNE DE 2013 (N=8) ET LA CONCENTRATION DU MEME METAL DISSOUS DANS LES EAUX DE SURFACE DE LA COLONNE D'EAU ET LA MOYENNE ENTRE LES VALEURS DE SURFACE ET DE MI-PROFONDEUR. SEUIL DE DISSIMILARITE = 0,80.	38
FIGURE 17 : EVOLUTION TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS MOYENNES DES HUIT METAUX ANALYSES (As, Co, Cr, Cr, Fe, Mn, Ni ET Zn) CHEZ LE BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> TRANSPLANTE AUX DIFFERENTES STATIONS EN 2013 ET 2012 (N=8 ET 5, RESPECTIVEMENT).	40
FIGURE 18 : RELATIONS DE LA PROPORTIONNALITE ENTRE DEUX METAUX BIO ACCUMULES CHEZ LE BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> TRANSPLANTES LORS DE LA CAMPAGNE DE 2012 (N=5).	41

LISTE DES TABLEAUX

TABEAU 1 : DESCRIPTION DES HUIT STATIONS DE SUIVI ECOTOXICOLOGIQUE PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIO-ACCUMULATRICES.....	12
TABEAU 2 : LES MOYENNES, ECART-TYPES, MINIMALES ET MAXIMALES DE TEMPERATURE DE L'EAU DE MER PAR STATION. LES DONNEES ONT ETE RECUEILLIES A CHAQUE STATION PAR UN CAPTEUR MINIATURISE A LA FREQUENCE DE 4 HEURES PAR JOUR, SOIT 6 RELEVES JOURNALIERS.....	18
TABEAU 3 : RESULTATS DU « CONTROLE QUALITE » DES METHODES DE MINERALISATION ET D'ANALYSES CHIMIQUES DES METAUX DANS 0,5 G DE TISSUS BIOLOGIQUES REALISE DANS LE CADRE DE LA CAMPAGNE 2013.....	21
TABEAU 4 : TAUX DE CROISSANCE MOYENNE ET JOURNALIERE EN POIDS FRAIS TOTAL (PF_{TOT}) ET EN LONGUEUR DES COQUILLES (LONG.) ET INDICE DE CONDITION PHYSIOLOGIQUE DU BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i>	24
TABEAU 5 : VALEURS P DU TEST MANN-WHITNEY POUR LES TENEURS DES HUIT ELEMENTS MESURES CHEZ LES INDIVIDUS DU BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> . DETERMINATION DES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES DES TENEURS EN ELEMENTS ($p \leq 0,05$), D'UNE PART, ENTRE LES DIFFERENTES STATIONS A L'ISSUE DE LA PERIODE DE TRANSPLANTATION ET, D'AUTRE PART, ENTRE LES DIFFERENTES STATIONS ET LES INDIVIDUS DU LOT INITIAL.....	30
TABEAU 6 : MATRICE DE PROXIMITE (COEFFICIENT DE CORRELATION DE PEARSON) DES CONCENTRATIONS MOYENNES EN METAUX DANS LE BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> . CALCUL SANS PRISE EN COMPTE DU LOT TEMOIN (BAIE MAA).....	33
TABEAU 7 : MATRICE DE PROXIMITE (COEFFICIENT DE CORRELATION DE PEARSON) DES CONCENTRATIONS MOYENNES EN METAUX DANS LE BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> . CALCUL AVEC PRISE EN COMPTE DU LOT TEMOIN (BAIE MAA).....	34
TABEAU 8 : MATRICE DE PROXIMITE (COEFFICIENT DE CORRELATION DE PEARSON) DES CONCENTRATIONS EN METAUX DISSOUS DANS LA COLONNE D'EAU (A LA SURFACE ET MI-PROFONDEUR ET LA MOYENNE DE CES DEUX PROFONDEURS) ET DES CONCENTRATIONS MOYENNES EN METAUX DANS LE BIVALVE <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i>	37

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 *Isognomon isognomon*

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

ANNEXE 1

Biométrie des bivalves *Isognomon isognomon* avant transplantation (Ti)

Station	St 03	St 06	St 07	St 13	St 14	St 16	St 18	St 31	lot initial
N° individus	Poids frais total (g)								
1	9,10	9,70	8,50	8,50	8,40	7,40	11,00	6,80	9,25
2	10,80	11,20	9,60	9,20	9,90	8,80	12,00	9,80	9,65
3	10,90	13,00	12,00	11,10	10,80	10,50	12,60	11,00	10,38
4	14,60	13,05	12,10	11,60	10,90	11,60	13,20	11,20	11,64
5	15,40	13,80	15,40	12,90	11,10	14,70	14,00	12,40	13,60
6	15,40	14,50	15,50	14,00	12,50	15,10	15,20	14,10	14,63
7	15,50	16,00	16,00	15,70	12,95	16,00	16,10	15,40	15,30
8	16,10	16,20	18,00	17,40	16,50	16,20	16,80	15,80	15,60
9	16,40	17,40	18,20	18,30	18,00	16,60	16,90	16,40	16,55
10	18,10	18,40	18,80	19,30	18,00	17,50	18,20	17,30	16,80
11	20,20	18,60	19,20	21,00	18,50	17,60	18,30	18,90	17,20
12	20,30	19,80	20,90	21,20	18,90	18,10	18,40	18,90	18,46
13	21,00	21,05	22,60	22,10	19,20	18,40	18,50	19,10	19,20
14	21,40	21,60	22,70	22,20	20,70	18,60	18,60	21,10	20,90
15	21,80	22,15	23,40	22,20	22,00	22,50	18,80	21,60	21,80
16	22,70	23,20	23,90	22,30	22,50	22,60	21,70	22,10	22,90
17	24,00	25,10	24,80	24,60	23,60	23,90	22,20	23,90	22,90
18	24,30	26,60	26,00	26,20	24,90	26,90	23,90	25,30	24,40
19	25,40	26,70	26,20	26,20	25,80	30,00	24,10	28,00	25,40
20	25,50	27,50	26,30	26,25	27,50	30,10	24,60	28,30	26,20
21	28,00	29,80	26,30	28,20	28,50	31,40	24,90	29,30	28,80
22	30,00	29,80	27,40	30,00	30,70	31,50	29,30	32,80	29,33
23	30,50	30,00	29,00	31,40	34,30	32,10	34,10	33,40	31,00
24	31,10	31,10	29,30	32,90	34,50	33,30	34,40	33,60	41,03
25	35,30	32,40	30,40	33,10	41,70	37,90	35,20	34,10	41,86
Moyenne (g)	20,95	21,15	20,90	21,11	20,89	21,17	20,52	20,82	20,99
Ecart-type	6,85	6,82	6,33	7,29	8,67	8,44	6,94	8,09	8,70

Station	St 03	St 06	St 07	St 13	St 14	St 16	St 18	St 31	Lot initial
N° individus	Longueur max de coquille (mm)								
1	59,9	56,0	56,3	69,1	87,0	57,4	71,3	61,0	58,6
2	73,5	68,1	78,5	70,1	62,8	75,3	90,1	61,6	65,3
3	78,9	93,2	66,3	67,3	72,5	73,4	72,2	54,8	69,7
4	72,0	70,1	92,6	80,4	64,5	63,6	81,8	59,2	78,4
5	91,0	76,4	86,2	66,7	71,5	69,7	82,0	90,3	74,8
6	81,3	104,2	90,8	85,9	77,1	89,3	84,7	77,1	81,7
7	91,6	87,1	68,8	74,4	78,9	76,9	75,3	76,0	82,8
8	82,0	71,0	80,7	76,1	84,0	78,8	86,3	93,1	79,1
9	83,6	107,5	84,7	102,3	88,2	83,4	70,9	91,7	92,2
10	82,6	89,2	97,2	70,6	95,5	92,6	87,6	81,6	69,2
11	103,0	81,0	87,0	79,6	84,6	67,0	84,2	79,5	74,6
12	84,5	96,5	97,7	83,0	86,5	73,7	99,1	82,9	84,4
13	90,8	82,4	90,0	97,3	79,7	103,9	70,0	91,3	104,9
14	106,8	100,4	84,9	70,0	99,3	94,8	85,3	102,3	88,5
15	83,8	84,6	97,2	71,1	87,0	97,0	85,2	85,8	100,4
16	87,7	99,5	93,0	107,8	88,8	64,5	96,1	96,2	104,5
17	90,7	102,5	91,0	108,9	88,6	81,0	71,1	103,1	76,2
18	90,9	99,4	106,9	100,3	85,6	106,0	82,5	86,9	80,6
19	92,5	93,0	84,6	101,8	100,6	106,9	101,9	114,3	111,2
20	78,2	111,2	76,2	98,3	86,9	97,6	104,3	102,6	99,3
21	99,7	93,1	120,1	124,4	94,4	111,2	103,7	111,0	101,4
22	108,8	112,3	103,3	95,3	109,0	113,8	93,0	91,8	78,9
23	93,7	120,5	105,8	99,5	133,7	110,2	113,5	134,2	113,6
24	113,5	108,8	104,0	108,4	96,5	96,3	95,8	104,8	109,7
25	125,3	95,2	98,1	113,6	118,6	102,9	120,2	130,0	107,1
Moyenne	89,85	92,13	89,67	88,89	88,87	87,49	88,32	90,52	87,47
Ecart-type	14,14	15,70	14,02	17,19	15,70	16,92	13,55	20,20	15,83

ANNEXE 2

Biométrie des bivalves *Isognomon isognomon* après transplantation (Tf)

N° individus	Station	St 03	St 06	St 07	St 13	St 14	St 16	St 18	St 31	Lot initial
	Pool d'analyse	Poids frais total (g)								
1	1	25,57	28,57	29,56	36,39	22,51	19,35	24,04		14,11
2	1	21,66	28,93	25,74	25,63	24,36	26,03	26,72		26,61
3	1	31,35	31,45	17,43	12,49	37,70	20,62	18,83		28,21
4	2	18,69	17,45	13,97	25,17	30,27	19,12	34,85		24,53
5	2	17,47	30,21	20,92	17,06	43,40	23,58	27,12		15,08
6	2	31,46	32,03	16,95	25,88	27,82	18,35	19,71		25,38
7	3	29,52	24,68	26,94	15,79	12,11	8,94	31,73		22,37
8	3	24,92	19,12	28,26	13,94	24,39	32,95	22,12		9,46
9	3	12,63	28,85	19,46	20,43	19,97	33,37	28,05		16,30
10	4	15,70	12,36	24,44	36,19	19,58	15,61	20,50		30,30
11	4	16,70	33,66	27,94	25,35	32,23	18,14	11,14		24,21
12	4	10,82	19,66	31,83	19,50	20,97	39,38	22,82		39,91
13	5	36,81	23,18	23,48	19,80	12,45	32,95	32,94		21,49
14	5	25,78	31,53	11,43	30,87	12,43	17,44	33,93		16,55
15	5	22,36	16,84	27,15	24,16	35,48	30,23	23,57		22,39
16	6	29,85	14,39	13,18	23,94	14,76	29,98	21,61		16,52
17	6	25,77	12,70	25,36	36,05	29,49	15,31	29,35		8,95
18	6	26,82	26,82	17,27	20,17	18,17	34,64	14,01		17,69
19	7	23,02	21,99	23,14	19,84	25,34	9,90	22,91		18,31
20	7	16,09	20,50	32,20	19,14	19,83	18,10	11,85		10,03
21	7	16,62	21,36	27,39	33,13	11,29	13,61	23,15		11,37
22	8	19,01	14,73	11,70	13,10	27,25	11,98	17,32		20,20
23	8	22,19	14,82	30,59	18,56	20,88	23,06	15,12		40,84
24	8	12,66	23,95	20,73	16,80	13,63	18,53	9,50		15,17
25	8	22,90		20,47	27,43	9,84	16,20	12,72		16,47
Moyenne		22,25	22,91	22,70	23,07	22,65	21,89	22,22		20,50
Ecart-type		6,65	6,74	6,29	7,17	8,87	8,37	7,31		8,34

N° individus	Station	St 03	St 06	St 07	St 13	St 14	St 16	St 18	St 31	Lot initial
	Pool d'analyse	Longueur max de coquille (mm)								
1	1	87,0	112,8	102,7	120,1	97,4	104,0	96,9		81,4
2	1	86,1	100,0	93,1	100,0	87,2	81,9	108,3		102,4
3	1	111,9	119,8	94,6	71,6	96,0	91,4	82,2		80,0
4	2	88,7	80,1	89,8	102,6	94,6	72,0	113,8		109,5
5	2	85,0	90,8	94,3	87,6	115,4	99,6	99,9		81,7
6	2	96,2	98,9	86,7	100,6	100,6	82,6	102,1		98,1
7	3	106,9	98,9	103,6	82,5	66,1	59,3	95,6		72,0
8	3	88,4	108,0	106,5	80,8	87,2	112,0	83,3		66,7
9	3	81,9	90,9	82,7	83,4	94,4	111,7	101,1		90,3
10	4	89,3	72,0	101,8	112,1	84,7	69,4	68,8		113,2
11	4	83,8	96,1	116,5	86,7	108,1	80,6	69,8		80,9
12	4	72,1	95,2	105,9	77,5	91,9	103,1	80,1		108,1
13	5	124,7	87,3	99,0	84,8	74,8	106,3	99,2		98,7
14	5	89,9	113,0	71,0	95,7	70,8	77,3	111,0		68,9
15	5	98,8	85,1	81,8	95,9	132,8	95,9	108,0		104,2
16	6	97,8	92,2	78,8	80,2	81,2	95,9	79,6		70,7
17	6	94,0	69,5	102,3	92,3	89,2	80,1	120,9		60,4
18	6	98,6	103,0	85,4	100,1	85,6	96,4	66,3		84,6
19	7	107,0	92,0	91,8	88,6	92,0	73,8	78,7		105,0
20	7	78,0	85,4	101,3	73,3	88,8	85,9	67,7		69,7
21	7	90,7	96,2	85,9	70,6	66,2	62,2	94,3		78,3
22	8	87,1	75,1	80,8	84,8	92,8	74,1	78,8		87,8
23	8	101,0	76,6	105,9	88,2	81,5	70,8	84,1		106,2
24	8	79,9	91,1	91,5	75,3	77,1	68,8	67,4		77,1
25	8	86,6		95,6	105,3	80,4	89,0	79,2		75,6
Moyenne		92,44	92,91	93,96	89,61	89,47	85,75	89,47		86,85
Ecart-type		11,61	13,01	10,72	12,74	14,82	15,31	16,22		15,58

N° individus	Station	St 03	St 06	St 07	St 13	St 14	St 16	St 18	St 31	Lot initial
	Pool d'analyse	Poids frais de chair (g)								
1	1	2,46	2,53	3,41	3,85	3,11	1,83	2,46		1,33
2	1	3,36	2,86	3,33	3,21	2,35	1,88	2,82		2,45
3	1	3,10	3,28	3,54	1,44	3,57	1,97	1,90		2,27
4	2	3,40	1,95	2,36	2,41	3,48	1,89	3,08		2,10
5	2	2,29	3,47	2,37	1,82	4,73	1,96	1,65		1,48
6	2	1,31	2,49	3,04	2,59	2,66	2,19	2,59		2,61
7	3	2,54	3,94	2,22	2,14	1,05	1,06	3,14		2,16
8	3	2,35	2,18	1,84	1,44	2,25	3,60	2,06		0,74
9	3	3,31	2,81	2,58	2,05	2,38	3,41	3,01		1,81
10	4	1,75	2,06	2,59	3,94	2,30	1,74	2,18		3,62
11	4	1,29	3,11	2,77	3,15	2,10	2,15	1,50		2,53
12	4	2,29	1,43	3,22	2,00	3,50	3,28	1,85		3,34
13	5	2,63	1,47	2,15	2,80	1,15	3,83	2,64		2,11
14	5	1,19	2,07	2,67	3,93	1,38	1,78	2,44		1,95
15	5	1,47	1,98	1,47	2,52	1,26	2,14	1,88		1,50
16	6	2,78	2,92	2,02	2,36	3,22	2,51	2,52		1,12
17	6	2,56	1,55	2,54	3,59	1,16	1,64	1,66		1,62
18	6	2,58	3,21	3,17	2,32	2,59	3,04	2,47		1,44
19	7	1,40	2,86	1,89	1,95	2,49	1,12	2,17		1,21
20	7	1,99	2,59	1,84	2,06	1,92	2,48	1,53		1,43
21	7	2,31	2,87	2,53	1,78	2,04	1,60	2,43		2,05
22	8	2,34	1,86	1,99	1,96	2,99	1,31	1,89		4,01
23	8	1,80	2,64	3,30	1,66	1,63	1,92	1,66		1,91
24	8	2,17	2,21	2,71	2,28	1,51	2,19	0,86		2,16
25	8	1,87		2,74	2,56	2,44	2,41	1,36		
Moyenne		2,26	2,51	2,57	2,47	2,37	2,20	2,15		2,04
Ecart-type		0,65	0,65	0,56	0,75	0,91	0,74	0,58		0,79

ANNEXE 3

Concentrations en métaux chez les bivalves *Isognomon isognomon*
(µg/g de poids sec)

Pool	Lot initial							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	32,9	0,5	1,6	4,8	239	9,6	3,5	1157
2	33,7	0,4	1,6	5,5	274	26,3	3,4	1232
3	48,1	0,4	1,0	5,3	189	8,9	2,7	753
4	36,4	0,3	1,0	5,6	151	12,8	2,3	704
5	37,9	0,4	1,0	5,3	157	21,5	2,9	666
6	49,3	0,4	1,0	5,9	166	21,8	3,4	747
7	24,5	0,3	0,7	4,0	139	9,5	2,0	560
8	37,6	0,5	1,3	7,3	204	16,1	3,3	897
Médiane	37,0	0,4	1,0	5,4	178	14,5	3,1	750
Moyenne	37,5	0,4	1,2	5,5	190	15,8	2,9	840
Ecart-type	8,1	0,1	0,3	1,0	47	6,7	0,6	240
Intervalle de confiance	5,6	0,1	0,2	0,7	33	4,6	0,4	166
Pool	St03							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	43,5	0,4	2,5	5,5	167	24,6	2,5	863
2	46,9	0,6	3,5	6,7	222	20,3	3,6	1146
3	50,5	0,5	3,0	5,5	221	31,1	3,3	1128
4	42,3	0,6	3,0	5,9	207	30,3	2,9	869
5	51,3	0,5	3,7	5,8	227	21,4	3,6	671
6	43,3	0,4	2,3	6,0	170	26,6	2,3	679
7	51,7	0,4	2,9	6,7	176	47,2	2,9	687
8	42,0	0,4	1,9	5,3	137	15,9	2,1	695
Médiane	45,2	0,5	2,9	5,9	192	25,6	2,9	779
Moyenne	46,4	0,5	2,9	5,9	191	27,2	2,9	842
Ecart-type	4,2	0,1	0,6	0,5	33	9,6	0,6	199
Intervalle de confiance	2,9	0,1	0,4	0,4	23	6,6	0,4	138
Pool	St06							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	45,4	0,6	3,6	6,5	327	34,5	4,5	866
2	51,8	0,5	2,3	5,0	169	15,6	2,5	991
3	39,4	0,5	2,4	5,4	162	20,7	2,7	938
4	57,8	0,5	2,7	4,8	193	18,8	3,0	985
5	45,0	0,5	3,5	5,2	226	30,8	3,6	844
6	37,8	0,4	2,4	5,3	163	49,6	2,7	630
7	44,2	0,5	2,4	5,9	169	29,5	2,6	692
8	41,0	0,5	2,6	5,5	167	21,9	3,0	490
Médiane	44,6	0,5	2,5	5,3	169	25,7	2,9	855
Moyenne	45,3	0,5	2,7	5,5	197	27,7	3,1	804
Ecart-type	6,6	0,1	0,5	0,5	57	11,0	0,7	182
Intervalle de confiance	4,6	0,0	0,4	0,4	39	7,6	0,5	126

Pool	St07							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	37,4	0,3	1,4	5,9	121	19,0	1,7	594
2	40,4	0,4	1,9	6,7	171	13,1	2,1	898
3	41,3	0,4	1,3	6,2	126	20,1	1,5	682
4	46,3	0,3	1,4	7,1	113	15,2	1,6	717
5	44,8	0,4	2,0	5,8	168	33,3	2,2	984
6	42,0	0,3	1,1	6,1	96	21,7	1,5	582
7	40,2	0,4	1,4	6,4	130	28,9	1,9	763
8	34,4	0,4	1,7	5,4	133	24,0	1,8	690
Médiane	40,9	0,4	1,4	6,2	128	20,9	1,8	704
Moyenne	40,9	0,3	1,5	6,2	132	21,9	1,8	739
Ecart-type	3,8	0,0	0,3	0,5	26	6,7	0,3	140
Intervalle de confiance	2,6	0,0	0,2	0,4	18	4,7	0,2	97
Pool	St13							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	41,6	0,4	1,6	7,1	137	22,6	1,7	763
2	52,3	0,4	1,6	5,7	150	28,4	2,0	471
3	41,8	0,4	1,8	5,2	146	26,6	1,9	624
4	41,7	0,3	1,7	6,5	145	12,9	1,8	641
5	38,1	0,3	1,3	6,3	105	36,0	1,4	508
6	35,4	0,3	1,1	6,0	90	18,9	1,4	478
7	39,8	0,4	1,7	6,5	145	24,6	2,1	828
8	43,3	0,4	1,9	6,4	161	16,8	1,8	704
Médiane	41,6	0,4	1,7	6,4	145	23,6	1,8	633
Moyenne	41,8	0,4	1,6	6,2	135	23,3	1,8	627
Ecart-type	5,0	0,0	0,3	0,6	24	7,3	0,2	134
Intervalle de confiance	3,4	0,0	0,2	0,4	17	5,0	0,2	93
Pool	St14							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	37,5	0,3	1,9	7,1	137	21,4	1,9	546
2	41,1	0,5	2,2	5,9	184	21,9	2,5	1066
3	47,1	0,4	1,8	5,4	128	13,5	2,1	689
4	23,4	0,2	1,0	2,8	91	7,5	1,2	414
5	48,6	0,5	3,2	5,2	202	15,8	3,5	709
6	39,7	0,4	2,1	5,2	144	13,3	2,0	863
7	38,9	0,5	2,4	4,6	183	16,9	2,7	800
8	37,9	0,4	1,5	6,2	121	17,4	1,6	549
Médiane	39,3	0,4	2,0	5,3	141	16,4	2,0	699
Moyenne	39,3	0,4	2,0	5,3	149	16,0	2,2	705
Ecart-type	7,6	0,1	0,6	1,3	38	4,7	0,7	206
Intervalle de confiance	5,3	0,1	0,4	0,9	26	3,2	0,5	143
Pool	St16							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	66,2	0,5	2,8	7,5	235	23,6	2,8	1347
2	43,2	0,6	5,3	5,3	270	30,1	4,1	582
3	42,5	0,4	1,5	6,9	117	24,9	1,4	637
4	40,2	0,6	2,0	6,4	173	30,1	1,9	940
5	43,4	0,6	4,3	5,2	248	21,6	3,4	802
6	51,4	0,4	1,7	6,2	140	32,4	1,9	827
7	40,8	0,4	1,8	7,0	121	27,8	1,6	493
8	48,1	0,4	1,7	6,0	141	31,9	1,6	678
Médiane	43,3	0,5	1,9	6,3	157	29,0	1,9	740
Moyenne	47,0	0,5	2,6	6,3	181	27,8	2,4	788
Ecart-type	8,6	0,1	1,4	0,8	61	4,0	1,0	268
Intervalle de confiance	6,0	0,1	1,0	0,5	43	2,8	0,7	185

Pool	St18							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	44,5	0,4	2,1	5,5	145	16,8	1,9	761
2	48,8	0,5	3,0	5,8	245	21,5	2,8	947
3	38,2	0,5	2,9	7,4	196	24,3	2,5	759
4	36,2	0,4	2,2	6,2	187	25,2	2,4	592
5	43,2	0,5	3,1	5,6	219	30,1	2,9	983
6	38,1	0,4	2,7	6,3	207	33,7	2,5	681
7	44,2	0,4	2,0	6,3	134	25,8	2,1	591
8	36,6	0,4	2,3	7,3	169	35,1	2,3	658
Médiane	40,7	0,4	2,5	6,2	191	25,5	2,4	720
Moyenne	41,2	0,4	2,5	6,3	188	26,6	2,4	746
Ecart-type	4,6	0,0	0,4	0,7	37	6,2	0,3	150
Intervalle de confiance	3,2	0,0	0,3	0,5	26	4,3	0,2	104

ANNEXE 4

Concentrations en métaux chez les algues *Lobophora variegata* (µg/g de poids sec)

Pool	Lot initial							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	26,2	2,0	6,0	3,2	390	20,6	5,5	<LQ
2	27,1	2,3	6,8	3,2	462	23,0	6,8	<LQ
3	27,9	2,7	6,0	3,4	346	23,2	5,6	<LQ
4	27,1	5,0	15,8	3,4	734	41,6	12,0	<LQ
5	27,2	2,8	11,7	3,5	570	30,4	7,6	11
Médiane	27,1	2,7	6,8	3,4	462	23,2	6,8	11
Moyenne	27,1	2,9	9,3	3,4	501	27,8	7,5	11
Ecart-type	0,6	1,2	4,3	0,2	156	8,6	2,7	
Intervalle de confiance	0,4	0,8	3,0	0,1	108	5,9	1,9	
Pool	St03							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	24,9	7,0	51,7	3,9	2226	83,2	47,5	27
Médiane	24,9	7,0	51,7	3,9	2226	83,2	47,5	27
Moyenne	24,9	7,0	51,7	3,9	2226	83,2	47,5	27
Ecart-type								
Intervalle de confiance								
Pool	St13							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	18,4	3,6	37,1	2,3	1811	46,0	32,8	12
2	17,3	3,4	35,5	2,5	1576	43,4	31,0	15
3	17,4	4,1	48,3	3,1	2134	52,4	42,3	19
Médiane	17,4	3,6	37,1	2,5	1811	46,0	32,8	15
Moyenne	17,7	3,7	40,3	2,7	1841	47,3	35,4	15
Ecart-type	0,6	0,4	7,0	0,4	280	4,6	6,0	3
Intervalle de confiance	0,4	0,3	4,8	0,3	194	3,2	4,2	2
Pool	St16							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	28,8	7,1	82,6	3,3	3422	98,8	57,4	14
2	30,5	5,8	57,3	3,5	2313	76,9	39,6	11
3	30,2	5,7	57,4	3,5	2289	76,8	39,4	13
Médiane	30,2	5,8	57,4	3,5	2313	76,9	39,6	13
Moyenne	29,8	6,2	65,8	3,4	2675	84,2	45,4	13
Ecart-type	0,9	0,7	14,6	0,1	647	12,7	10,3	2
Intervalle de confiance	0,6	0,5	10,1	0,1	448	8,8	7,2	1
Pool	St18							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	22,3	6,9	83,8	3,4	3623	81,2	65,3	20
2	20,2	6,0	76,8	3,3	3298	69,0	62,0	18
3	20,9	7,2	98,4	3,4	4204	85,9	77,0	21
Médiane	20,9	6,9	83,8	3,4	3623	81,2	65,3	20
Moyenne	21,2	6,7	86,3	3,4	3709	78,7	68,1	20
Ecart-type	1,0	0,6	11,0	0,1	459	8,7	7,9	1
Intervalle de confiance	0,7	0,4	7,6	0,1	318	6,0	5,4	1