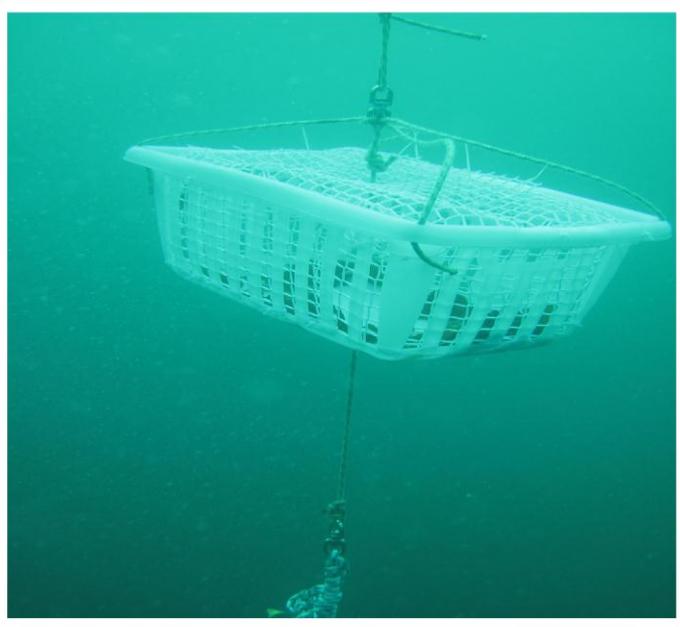


SUIVI DE LA QUALITE ECOTOXICOLOGIQUE DES EAUX DE LA ZONE  
SUD DU LAGON DE NOUVELLE-CALEDONIE PAR  
TRANSPLANTATION D'ESPECES BIO-INDICATRICES

**MISSION DE AVRIL-OCTOBRE 2014**



RAPPORT

23 janvier 2015



## 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 avril-octobre 2014

Auteur (s) :

Shilpa KUMAR-ROINE

Antoine GILBERT

Aubanie RAYNAL

Jean-Michel FERNANDEZ

Nombre de pages : 76

	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 avril-octobre 2014		
Auteurs	Shilpa KUMAR-ROINE, Antoine GILBERT, Aubanie RAYNAL et Jean-Michel FERNANDEZ		
Résumé	<p>La cinquième campagne de transplantation d'organismes marins s'est déroulée de fin-avril à début octobre 2014 (soit 155 jours d'immersion) suite aux travaux de synthèse des données de 2010 à 2013.</p> <p>A la différence de la campagne précédente, celle-ci a été marquée par une immersion plus longue (de environ 5 mois au lieu de 3 mois) et par ajout de deux stations complémentaires située dans la Baie du Prony (St15-Rade du Nord et St16P-Quai du Port de Prony) au 8 stations habituelles du suivi.</p> <p>Cette étude a permis pour les bivalves <i>Isognomon isognomon</i> de rassembler les 8 éléments étudiés en deux groupes : le groupe 1 qui est constitué de métaux appelés « latéritiques » (<i>Co</i>, <i>Cr</i>, <i>Fe</i>, <i>Mn</i> et <i>Ni</i>) et le groupe 2 d'éléments appelés « terrigènes » (<i>As</i>, <i>Cu</i> et <i>Zn</i>). 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 « Baie » (St03, St06, St15, St16, St16P et St18) et les stations dites « Océanique » (St07, St13, St14 et St31). Plus précisément, la station du port St16P présente les valeurs les plus élevés en <i>Cr</i>, <i>Co</i>, <i>Mn</i>, <i>Ni</i> et <i>Fe</i> mais également en <i>Zn</i>. A l'inverse, la station à proximité de l'îlot Nouaré (St31) qui fait office de référence présente les valeurs les plus faibles en <i>Co</i>, <i>Mn</i>, <i>Ni</i>, <i>As</i> et <i>Zn</i>.</p> <p>Cette campagne 2014 présente ainsi une réponse cohérente qui n'avait été observée que rarement depuis la réalisation du <i>caging</i> dans le périmètre de VALE. L'analyse spatiale et temporelle des facteurs biologiques et environnementaux laisse penser que cette réponse différentielle de la campagne 2014 serait induite par la durée de <i>caging</i> supérieure aux autres campagnes. Ainsi, la prochaine campagne devra être réalisée en maintenant une durée d'immersion similaire et devrait permettre de confirmer que ce facteur est bien déterminant dans la réponse différentielle observée du bioindicateur de cette campagne 2014.</p> <p>En ce qui concerne l'algue <i>Lophobara variegata</i>, une perte quasi totale de matériel biologique a été constatée sur toutes les stations. Cette diminution du nombre de frondes se révélant trop importante pour effectuer les analyses. D'après les travaux de synthèse, l'algue <i>L. variegata</i> semble fournir une réponse intéressante aux pressions environnementales et de ce fait semble être un bon bio-indicateur mais elle ne peut être utilisée dans les conditions d'exposition actuelles malgré les modifications expérimentales apportées les deux dernières années. Ainsi, deux espèces de mollusques, le clam <i>Gafarium tumidum</i> et l'huitre <i>Pinctade maculata</i> sont proposées pour remplacer cette algue pour les prochains suivis.</p>		
APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Shilpa-KUMAR-ROINE		23/01/2015
Vérificateur 1	Jean Michel FERNANDEZ		07/02/2015
Vérificateur 2	Céline Pousse		16/02/2015
Approbateur(s)	Jean Michel FERNANDEZ		18/02/2015
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR		DATE
1.0	Rapport final		18/02/2015
COPIE - DIFFUSION			
NOM	ORGANISME		
Jean Michel N'Guyen / Céline Casalis	VALE NC, Département Environnement		

Ce rapport doit être cité comme suit :

KUMAR-ROINE S., GILBERT A., RAYNAL A., SENIA J., H. ET FERNANDEZ J.M., 2015. Suivi de la qualité écotoxicologique (métaux) des eaux de la zone sud du lagon de Nouvelle-Calédonie par Transplantation d'espèces bioindicatrices (Bioaccumulation), Campagne 2014. Rapport AEL 121115-VI-17, Vale-NC/AEL E54191/0001, 78 p.

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION</b> .....	7
<b>OBJECTIFS</b> .....	8
<b>METHODOLOGIE</b> .....	10
I.1.  CHOIX ET TYPOLOGIE DES STATIONS DE SUIVI .....	10
I.2.  RECOLTE ET SELECTION DES SPECIMENS A TRANSPLANTER .....	12
I.2.1.  Le bivalve <i>Isognomon isognomon</i> .....	13
I.2.2.  L'algue <i>Lobophora variegata</i> .....	13
I.3.  IMMERSION, CONTROLE ET RECUPERATION DES CAGES .....	14
I.4.  ANALYSES DES ECHANTILLONS .....	15
I.5.  PROTOCOLE DE CONTROLE QUALITE .....	16
I.6.  PRISE EN COMPTE DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES .....	19
I.7.  MESURE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU DE MER .....	19
I.8.  TRAITEMENT DES DONNEES .....	19
I.8.1.  Données de bioaccumulation du « Caging 2014 » .....	19
I.8.2.  Données environnementales .....	20
I.8.3.  Données biométriques .....	21
I.8.4.  Comparaison des données de bioaccumulation avec les Campagnes précédentes .....	22
<b>RESULTAT-DISCUSSION</b> .....	24
I.1.  ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX ET BIOMETRIQUES .....	24
I.1.1.  Analyse des Facteurs environnementaux .....	24
I.1.2.  Données biométriques et de croissance relative .....	35
I.2.  REPONSE SPATIALE DES BIOINDICATEURS .....	40
I.2.1.  Analyses exploratoires des stations .....	40
I.2.2.  Comparaisons par métal des stations regroupées par niveau typologique .....	42
I.2.3.  Comparaisons par métal au niveau des stations .....	45
I.3.  REPONSE DE LA BIOACCUMULATION AVEC LES CAMPAGNES PRECEDENTES .....	48
I.4.  CONCENTRATIONS EN METAUX DANS LES ALGUES .....	52
<b>CONCLUSION</b> .....	53
I.1.  TRANSPLANTATION 2014 .....	53
I.2.  PERSPECTIVES .....	54
<b>REFERENCE</b> .....	56
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	58
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	60
<b>ANNEXES</b> .....	61



# 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).

Fort 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 (2014) (contrat AEL/Vale-NC E54191/0001).

Pour répondre aux exigences du cahier des charges, AEL/LEA a mis en place une équipe composée de spécialistes provenant des deux seules entités expérimentées en matière de transplantation opérant sur le Territoire depuis plus de 5 ans. Ainsi, une co-traitance, entre les équipes de la société AEL (Analytical Environmental Laboratory) en qualité de mandataire et GINGER-SOPRONER, a été effectuée.

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 fin avril à début octobre 2014.

# OBJECTIFS

La méthode de transplantation d'espèces marines en stations artificielles (ou « *caging* ») consiste à immerger pendant cinq mois<sup>1</sup> deux espèces bio-indicatrices accumulatrices de métaux (*Lobophora variegata*, une algue et *Isognomon isognomon*, un bivalve). Cette expérimentation s'effectue dans des cages en plastique disposées à mi profondeur (de 5 à 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 biodisponibles dans le milieu marin pour le bio-indicateur.**

A l'issue de cette période d'immersion, les concentrations en huit métaux<sup>2</sup> 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.

Cette méthode offre des avantages importants pour le suivi environnemental car elle permet à l'expérimentateur de contrôler un certain nombre de facteurs biologiques (ex. l'espèce de spécimens transplantés, leurs tailles et stade du cycle sexuel,...) qui influent fortement sur la variabilité des concentrations des contaminants bio-accumulés. L'utilisation pour la transplantation de spécimens récoltés dans un site de référence (non contaminé comme la Baie Maa) abritant des populations importantes permet de s'affranchir de la nécessité de la présence naturelle de ces espèces sur les points de suivi. Elle autorise donc de positionner judicieusement les stations de surveillance. Elle assure aussi l'obtention, pour chacune des stations étudiées, de résultats directement comparables entre eux : les résultats obtenus sont le reflet de la quantité moyenne de contaminant disponible pendant la période de transplantation pour l'organisme transplanté en fonction d'un ensemble de facteurs hydro-climatiques et/ou anthropiques.

Ainsi, cette étude écotoxicologique de la bioaccumulation des métaux a pour objectif d'obtenir des informations intégrées dans le temps, en mesurant les concentrations dans les tissus biologiques. Ces résultats fournissent une représentation lissée des fluctuations à court terme des concentrations en métaux dans le milieu ambiant. 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, permettent d'évaluer quantitativement l'évolution temporelle et spatiale des apports en métaux bio-disponibles dans le milieu marin côtier.

---

<sup>1</sup> Initialement conduites sur des périodes de 3 mois entre 2009 et 2013, la durée de la transplantation a été étendue à 5 mois pour permettre une meilleure réponse des organismes aux concentrations auxquelles ils sont exposés.

<sup>2</sup> As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn

La présente campagne fait suite l'étude de synthèse établissant le bilan des 5 années précédentes (2009, 2010, 2011, 2012 et 2013) de suivi de la qualité des eaux par l'utilisation de bio-indicateurs dans le périmètre d'influence de Vale-NC ([Gilbert et Fernandez, 2014](#)). Basées sur les recommandations faites dans ce rapport critique, la présente campagne a fait objet des modifications suivantes afin d'améliorer le réseau de surveillance par transplantation:

- Création de deux stations supplémentaires au niveau de la rade au droit du Creek de la Rade Nord (St15) et au niveau du port de commerce sous la jetée du port (St16P) en plus de St16 qui existe déjà ;
- Une période d'immersion portée à 5 mois au lieu de 3 mois initialement pour mettre clairement en évidence des phases d'éliminations significatives des métaux séquestrés tels que *Co*, *Fe* et *Ni* dans le milieu de prélèvements (Baie Maa);
- Mesure *in situ* au niveau de cage des paramètres physico-chimique tels que la température, la turbidité, l'oxygène, la salinité et la chlorophylle totale et les teneurs en métaux dans la colonne d'eau au moment de l'immersion des cages, leur nettoyage et leur récupération ;
- Afin de limiter la mortalité des algues *L. variegata* observée lors des campagnes précédentes, ces spécimens ont été prélevés avec leur substrat (principalement constitué de fragments de corail) et fixés au fond de la cage.

# 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](#). Par ailleurs, cette technique de surveillance est recommandée par le « Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en NC » élaboré à la demande conjointe de l'ADECAL et du CNRT « Le Nickel et son environnement » ([Beliaeff \*et al.\*, 2011](#)). Enfin, la méthode de transplantation mise en œuvre suit en outre étroitement les recommandations formulées dans le protocole international standardisé [ASTM E2122-02](#).

## I.1. CHOIX ET TYPOLOGIE DES STATIONS DE SUIVI

A l'instar de la caractérisation de l'état de référence par transplantation réalisée en 2009 ([Breau \*et al.\*, 2009b](#)), un ensemble de 8 stations (localisées dans le Canal de la Havannah et les baies adjacentes ainsi que la Baie de Prony) a été sélectionné en tenant compte des résultats de la modélisation hydrodynamique conduite par l'IRD ([Derex \*et al.\*, 2008](#) ; [Douillet et Fernandez, 2009](#)) 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 position de certaines de ces stations a cependant sensiblement été modifiée par rapport aux localisations mentionnées dans le plan de suivi physico-chimique du milieu marin (Arrêté ICPE du 9 octobre 2009) afin de tenir compte des recommandations relatives aux aspects opérationnels de déploiement des cages. Ainsi, ces recommandations qui découlent notamment des contraintes imposées par les couloirs de navigation et les aires de manœuvres et/ou de mouillage de la Baie du Prony ou de la présence de forts courants dangereux pour la plongée durant les phases de mouillage/récupération des cages, ont conduit, à effectuer les aménagements suivants :

- St05 (Réserve Merlet). Cette station a été remplacée en 2010 par St31 (Ilot Nouaré)<sup>3</sup> ;
- St16 (Port de Prony), initialement mouillée en 166°53,30E et 22°21,42S et après accord avec Vale-NC (email du 23 mai 2012), la cage a été déplacée en 2012 aux coordonnées 166°52,54E et 22°20, 76S<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> Les stations St05-Réserve Merlet et St31-Ilot Nouaré sont sous influence purement océanique et donc considérées station de référence. La St31-Nouaré a été créée pour remplacer la station St05-Kié (station fixée par Arrêté ICPE du 9 octobre 2009), 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](#)).

La synthèse des 5 campagnes réalisées entre 2009 et 2013 (Gilbert et Fernandez, 2014) a permis de faire émerger un certain nombre de modifications complémentaires. Dans cet objectif, deux sites sensibles, le port de commerce et la rade du Creek de la Rade Nord, devraient faire l'objet d'une meilleure attention.

En effet, la Rade Nord, souffre aujourd'hui d'une carence de suivi de la qualité écotoxicologique, malgré les perturbations qu'elle a subi par le passé et de l'évolution observée en matière de concentrations en métaux dissous, notamment. Une station St15 (Rade du Nord) de *caging* a donc été proposée pour pallier ce manque.

En ce qui concerne le port de commerce, la localisation actuelle de St16-Port de Prony paraît quelque peu décentrée par rapport à la zone à surveiller, compte tenu de nos critiques sur la potentielle contamination du milieu. Il a donc été proposé, d'une part de maintenir la position actuelle de St16-Port de Prony pour suivre l'évolution globale du secteur Est de la Baie du Prony, mais également de créer sous la jetée du port une station destinée uniquement à surveiller les impacts générés par la manutention des charges transportées par les navires (St16P-Quai du Port de Prony).

La liste complète des 10 stations pour la campagne 2014 et leurs coordonnées GPS sont fournies dans le Figure 1 et Tableau 1.

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

Zone	Station		GPS		Profondeur (m)		Moyenne à Ti		Date d'immersion
			Long. Nord	Lat. Sud	Stations	Cage	Poids frais (g)	Longueurs (mm)	
Baie du Prony	Port de Prony	St16	166°52,534	22°20,750	42,6	12,5	17,1 ±5,1	73,6 ±10,6	28/04/2014
	Quai du Port de Prony	St16P	166°59,102	22°20,850	10	5	17,2 ±6,7	77,3 ±15,8	29/04/2014
	Ilot Casy	St18	166°51,056	22°21,681	22	10	17,2 ±5,9	78,4 ±15,8	28/04/2014
	Rade du Nord	St15	166°52,523	22°19,982	22	11	17,2 ±5,3	80,6 ±10,7	28/04/2014
Canal de la Havannah	Chenal de Port boisé	St03	166°58,005	22°21,177	28,4	10,5	17,3 ±4,7	78,4 ±8,9	29/04/2014
	Chenal de la baie Kwé	St06	166°59,105	22°20,853	27,2	10	17,1 ±6,4	73,7 ±12,2	29/04/2014
	Récif loro	St07	166°57,847	22°23,053	30	12,5	17,0 ±5,4	77,8 ±11,3	29/04/2014
	Baie de Goro	St14	167°01,122	22°19,349	35,2	12,5	17,0 ±6,4	77,4 ±10,6	29/04/2014
	Ilot Nouaré	St31	167°01,105	22°25,050	35	11,5	16,9 ±5,6	78,1 ±13,6	29/04/2014
Ile Ouen	Récif Ma	St13	166°51,364	22°24,905	32,4	10	17,1 ±6,3	75,5 ±13,7	28/04/2014

La localisation géographique associée aux données hydrodynamiques fournies par la modélisation du transport des fractions dissoutes et particulaires (Derex *et al.*, 2008 ; Douillet et Fernandez, 2009) nous a conduit à proposer la typologie de classification des stations présentée au Tableau 2.

S'ajoute à cette typologie la station de référence où ont été prélevés les bioindicateurs (Baie Maa) que l'on nommera « Référence ». Cette typologie à trois modalités (Baie, Océanique et Référence) sera analysée de sorte à évaluer si elle constitue une stratification significative.

<sup>4</sup> Suite à des problèmes rencontrés lors des précédentes campagnes avec la cage immergée à la station St16 (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.

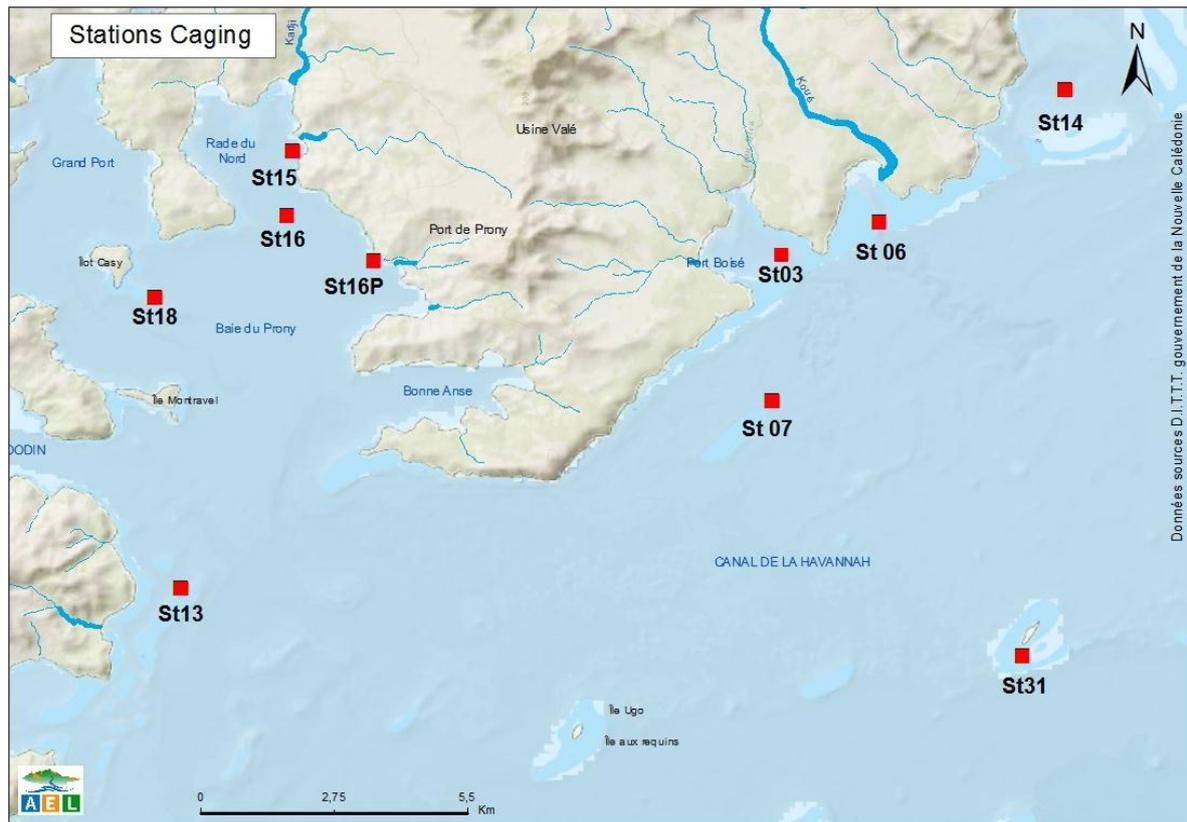


Figure 1 : Localisation géographique des dix stations de suivi écotoxicologique du milieu marin par transplantation d'espèces bio-accumulatrices.

Tableau 2 : Typologie simplifiée des stations.

Station	Typologie	
	Typologie « Baie »	« Océanique »
ST03	Baie	
ST06	Baie	
ST07		Océanique
ST13		Océanique
ST14		Océanique
ST15	Baie	
ST16	Baie	
ST16P	Baie	
ST31		Océanique
ST18	Baie	

## I.2. RECOLTE ET SELECTION DES SPECIMENS A TRANSPLANTER

Sur la base des travaux de recherche conduits localement (Hédouin *et al.*, 2007 ; Hédouin *et al.*, 2008 ; Hédouin *et al.*, 2009 ; Hédouin *et al.*, 2010 ; Hédouin *et al.*, 2011), deux espèces bioindicatrices ont été retenues pour la

réalisation de ce suivi écotoxicologique : l'huître *Isognomon isognomon* Linnaeus et l'algue brune *Lobophora variegata* (Lamouroux) Womersley.

Ces spécimens ont été récoltés le 23 et 24 avril 2014 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).

---

### I.2.1. LE BIVALVE *ISOGNOMON ISOGNOMON*

Après un tri initial et le brossage des coquilles, les bivalves (n = 300) 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 6,8 et 27,5 g ont été sélectionnés.

**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.

Les individus ont ensuite 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.

Onze lots de bivalves (dix lots à transplanter ainsi qu'un lot témoin initial) ont été constitués par tirage aléatoire au sein des individus sélectionnés.

---

### I.2.2. L'ALGUE *LOBOPHORA VARIEGATA*

Les macroalgues brunes *Lobophora variegata* (Lamouroux) Womersley récoltées avec leurs substrats (principalement constitués de fragments de corail). Celles-ci ont ensuite été brossées puis distribuées de façon à constituer onze lots de 25 frondes chacun sur leur substrat (dix lots à transplanter ainsi qu'un lot témoin initial).

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

**Remarque :** Depuis 2009, la perte de frondes de *L. variegata* en fin de transplantation est constatée. En 2010, cette perte était très importante avec la mortalité et la disparition de la quasi-totalité 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 ainsi qu'une disparition partielle aux stations St07 et St13. Cette dernière perte a pu être attribuée à la présence de nombreux poissons de petite taille à l'intérieur de la cage, présence constatée lors de sa récupération. En 2012, la disparition des algues a été notée sur toutes les stations du réseau. Il semble que les frondes, source de nourriture, aient été ingérées par ces poissons qui réussissent à rentrer à travers la maille des cages.

La diminution du nombre de frondes est devenue critique au point de rendre les traitements de données 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 fixée dans la cage habituellement utilisée dont la maille est légèrement supérieure (20 mm x 20mm). La cage contient ainsi les algues et les es bivalves de manière isolée.

Malgré ces changements, le même constat a été fait au bout de 83 jours d'immersion ; une perte conséquente de matériel biologique. Cette fois-ci, les quelques 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 en raison de l'important biofouling développé sur les dispositifs.

En 2014, une nouvelle configuration a encore été testée pour pallier ce qui pouvait-être en 2013 davantage lié à une mortalité des frondes qu'à un broutage par des poissons. En effet, ces algues dans leur milieu de prélèvement (Baie Maa) vivent fixées au substrat par leur base, ou fréquemment par une partie des frondes. Afin de réduire le stress dû à la transplantation et de recréer des conditions similaires, les algues ont été soustraites du site de référence avec leurs substrats lors du prélèvement. En effet, les années précédentes, les algues avaient été récoltées, en les extrayant de leur substrat. De surcroît, avant l'immersion des cages, les algues fixées sur leurs substrats naturels ont été maintenues au fond de la cage à l'aide de colliers pour atténuer le mouvement générés par les courants dans leur milieu récepteur.

### I.3. IMMERSION, CONTROLE ET RECUPERATION DES CAGES

Pour chacune des deux espèces, 10 des 11 lots ont été transférés dans des glacières compartimentées remplies d'eau de mer jusqu'à leur immersion en cages. Le onzième lot (lot de référence ou lot Baie Maa) a été congelé en chambre froide (-25°C) dans l'attente de son traitement pour la détermination des concentrations initiales en métaux avant transplantation.

La campagne d'immersion des cages a été réalisée les 28 et 29 avril 2014. 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. Tous les individus (algue avec leur support et huitre) ont été immobilisés grâce à des fils tendu en croix sur le fond de cage afin d'éviter que le courant les amasse dans un coin. Chaque cage, sauf celle de St16P- Quai du Port de Prony et St31-Ilot Nouaré, a été équipée d'un capteur miniaturisé (modèle HOBO Water Temperature Pro v2 Data Logger –U22-001) programmé pour l'enregistrement de la température de l'eau au niveau des cages à la fréquence de 4 relevés journaliers.

Ensuite, les cages ont été immergées entre 5 m et 12,5 m de profondeur, directement à partir du bateau.

A intervalle de 6 à 8 semaines d'immersion (soit le 10 et 11 juin 2014 et le 7 et 8 août, 2014), les dispositifs de transplantation immergés aux 10 stations du réseau 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 grandement la circulation de l'eau.

Enfin, les 02 et 03 octobre 2014, soit après 5 mois d'immersion (155 jours), les 10 dispositifs de transplantation ont été récupérés.

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. Une perte quasiment totale d'algues *L. variegata* a été constatée.

## I.4. ANALYSES DES ECHANTILLONS

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 (longueur de coquille), épongé et pesé pour l'obtention du poids frais total, puis disséqué. Les tissus mous de chaque individu de 11 lots ont ensuite été pesés pour l'obtention du poids frais des chairs entières, puis congelés et lyophilisés.

Les chairs des 20 bivalves de chaque lot ont été combinées quatre par quatre de manière aléatoire pour constituer huit pools par cage.

**Rappel :** 1 station = 1 lot = 20 individus par cage = 5 pools d'environ 4 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.

**Remarque :** Pour les algues, suite à la perte quasi-totale des frondes sur toutes les stations, ces organismes n'ont pas été analysés. Pour les bivalves quelques mortalités ont été constatées, surtout au niveau de la station St18.

Chaque pool de bivalves 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.* (2009a).

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 limites de quantification de la méthode figurent dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Limite de quantification de la méthode de dosage des métaux dans les tissus biologique par ICP-OES.

Métaux	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
LQ (µg/g ps)	0,1	0,2	0,1	0,1	2	0,1	0,2	10

## I.5. PROTOCOLE DE CONTROLE QUALITE

Un contrôle qualité des méthodes de minéralisation et d'analyse a été effectué :

- en insérant à intervalle de 10 échantillons dans chaque série analytique du **matériel biologique de référence certifié**, d'origine marine (TORT-2 et DORM 3, NRCC). La comparaison des données obtenue avec les valeurs certifiées permet de vérifier la précision et la justesse des mesures ;
- en faisant analyser 5 % d'échantillons dits de « **contrôle inter-laboratoire** ». Ces échantillons sont envoyés à un laboratoire d'analyse externe afin de renseigner sur la qualité des analyses réalisées par AEL; et
- en analysant des **triplicatas**) sur 5 % des échantillons. Les triplicatas permettent de vérifier la précision des mesures.

Les résultats du contrôle qualité réalisé par l'insertion de matériel biologique de référence certifié sont présentés dans le Tableau 4. La précision de la méthode est excellente pour tous les métaux sauf Cr et Ni (variation > 5 %). Par ailleurs, une excellente justesse relative a été obtenue pour As, Co, Fe et Zn (de 90 % à 110 %)<sup>5</sup>.

**Tableau 4 : Résultats des mesures des métaux dans 0,5 g de matériel biologique de référence certifié minéralisé et analysé dans le cadre de la campagne transplantation de 2014.**

Métaux	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Valeurs mesurées (µg/g ps) <sup>*</sup>	20,7	0,5	0,7	88,3	103,9	11,5	2,2	180,4
Ecart-type	1,0	0,0	0,1	1,3	1,0	0,3	0,1	4,5
Valeurs certifiées (µg/g ps)	21,6	0,5	0,8	106,0	105,0	13,6	2,5	180,0
Ecart-type	1,8	0,1	0,2	10,0	13,0	1,2	0,2	6,0
Précision relative (%) <sup>**</sup>	4,8	4,4	9,3	1,5	1,0	2,5	6,8	2,5
Justesse relative (%) <sup>***</sup>	95,9	89,0	93,7	83,3	99,0	84,5	86,3	100,2
Limite de quantification (µg/g ps)	1,0	0,2	0,1	0,1	2,0	0,1	0,2	10,0

<sup>\*</sup> Moyenne ± écart-type : n = 5 échantillons certifiés TORT-2 (Conseil National de Recherches, Canada)

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

<sup>\*\*\*</sup> La justesse relative est exprimée par le pourcentage des valeurs obtenues et valeurs certifiées.

Les échantillons pour les comparaisons inter laboratoires ont été confiés au laboratoire UT2a (France) et analysés par ICP-MS. Les résultats de cet exercice sont présentés dans le Tableau 5. La variation des mesures entre les deux laboratoires reste inférieure à 25% (Tableau 6). Pour plupart des métaux, l'écart est même inférieure à 10% ce qui constitue un résultat excellente étant donné que les analyses ont été effectuées en utilisant deux méthodes différentes ; ICP-OES pour AEL et ICP-MS pour UT2a.

Pour toute station confondue, les précisions obtenues diffèrent d'un élément à l'autre mais le coefficient de variation reste inférieur à 10% pour tous les métaux (Tableau 7). Les résultats de triplicatas sont présentés dans le Tableau 8.

<sup>5</sup> 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.

Tableau 5 : Comparaison inter laboratoire des résultats d'analyse des métaux pour la campagne transplantation de 2014 par ICP-MS (UT2a) et ICP-OES (AEL).

Métaux (µg/g ps)	Station									
	Lot initial		St06		St14		St15		St31	
	UT2a	AEL	UT2a	AEL	UT2a	AEL	UT2a	AEL	UT2a	AEL
<b>As</b>	36,11	46,78	43,40	58,31	43,10	60,02	53,50	65,83	30,00	36,64
<b>Co</b>	0,3	0,32	0,42	0,45	0,36	0,30	0,32	0,41	0,19	0,26
<b>Cr</b>	1,3	1,11	1,90	2,35	1,50	1,53	1,20	1,61	1,11	1,22
<b>Cu</b>	5,2	5,26	6,30	5,96	5,80	5,38	6,60	6,53	6,10	6,50
<b>Fe</b>	163	187	154	188	146	165	125	155	111	117
<b>Mn</b>	13,3	13,16	17,60	15,93	19,70	17,00	22,00	18,08	12,00	12,41
<b>Ni</b>	2,1	2,24	2,10	2,37	2,10	1,72	1,70	1,93	1,17	1,30
<b>Zn</b>	964	989	1191	1199	1307	1304	1051	1143	540	537

Tableau 6 : Ecartes moyennes (%) de la mesure pour chaque élément analysé de l'exercice inter laboratoire, toutes stations confondues.

Elément	Moyenne
	Ecart moyenne globale (%)
<b>As</b>	23%
<b>Co</b>	8%
<b>Cr</b>	8%
<b>Cu</b>	1%
<b>Fe</b>	14%
<b>Mn</b>	9%
<b>Ni</b>	4%
<b>Zn</b>	2%

Tableau 7 : Concentration et écart moyen pour la campagne transplantation 2014 et précision moyenne globale (%) de la mesure en triplicatas pour chaque élément analysé, toutes stations confondues.

Elément	Moyenne		
	Concentration (µg/g ps)	Ecart-type (µg/g ps)	Précision (%)
<b>As</b>	53,5	2,9	5,3
<b>Co</b>	0,3	0,0	5,9
<b>Cr</b>	1,6	0,1	6,7
<b>Cu</b>	5,9	0,2	3,0
<b>Fe</b>	162,4	9,0	5,5
<b>Mn</b>	15,3	0,6	3,9
<b>Ni</b>	1,9	0,1	7,6
<b>Zn</b>	1034,5	64,0	6,2

Tableau 8 : Précision des mesures en triplicatas des métaux pour la campagne transplantation de 2014.

Eléments (µg/g ps)		Station				
		Lot initial	St06	St14	St15	St31
As	Réplicat 1	42,2	60,8	60,8	68,1	35,0
	Réplicat 2	49,8	58,1	59,7	59,4	37,2
	Réplicat 3	48,4	56,0	59,5	70,0	37,8
	Moyenne	<b>46,8</b>	<b>58,3</b>	<b>60,0</b>	<b>65,8</b>	<b>36,6</b>
	Ecart-type	<b>4,0</b>	<b>2,4</b>	<b>0,7</b>	<b>5,6</b>	<b>1,5</b>
	CV%	<b>8,6</b>	<b>4,2</b>	<b>1,2</b>	<b>8,6</b>	<b>4,0</b>
Co	Réplicat 1	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3
	Réplicat 2	0,3	0,5		0,4	0,3
	Réplicat 3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,2
	Moyenne	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,3</b>
	Ecart-type	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
	CV%	<b>10,9</b>	<b>7,0</b>	<b>7,5</b>	<b>0,8</b>	<b>4,3</b>
Cr	Réplicat 1	1,1	2,2	1,5	1,7	1,3
	Réplicat 2	1,1	2,3	1,5	1,4	1,2
	Réplicat 3	1,2	2,5	1,6	1,7	1,2
	Moyenne	<b>1,1</b>	<b>2,4</b>	<b>1,5</b>	<b>1,6</b>	<b>1,2</b>
	Ecart-type	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,0</b>
	CV%	<b>6,5</b>	<b>5,8</b>	<b>5,2</b>	<b>12,1</b>	<b>3,0</b>
Cu	Réplicat 1	5,1	5,8	5,4	6,6	6,4
	Réplicat 2	5,3	6,0	5,4	5,9	6,5
	Réplicat 3	5,4	6,0	5,4	7,0	6,6
	Moyenne	<b>5,3</b>	<b>6,0</b>	<b>5,4</b>	<b>6,5</b>	<b>6,5</b>
	Ecart-type	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>	<b>0,6</b>	<b>0,1</b>
	CV%	<b>2,1</b>	<b>1,9</b>	<b>0,1</b>	<b>8,5</b>	<b>1,8</b>
Fe	Réplicat 1	172,4	181,1	169,1	159,6	121,9
	Réplicat 2	185,0	187,3	162,3	140,4	118,2
	Réplicat 3	203,1	195,8	162,2	165,5	112,2
	Moyenne	<b>186,8</b>	<b>188,1</b>	<b>164,6</b>	<b>155,2</b>	<b>117,4</b>
	Ecart-type	<b>15,4</b>	<b>7,4</b>	<b>4,0</b>	<b>13,1</b>	<b>4,9</b>
	CV%	<b>8,2</b>	<b>3,9</b>	<b>2,4</b>	<b>8,4</b>	<b>4,2</b>
Mn	Réplicat 1	13,3	16,4	16,8	17,3	13,0
	Réplicat 2	13,9	15,8	17,0	19,0	12,5
	Réplicat 3	12,3	15,6	17,2	17,9	11,7
	Moyenne	<b>13,2</b>	<b>15,9</b>	<b>17,0</b>	<b>18,1</b>	<b>12,4</b>
	Ecart-type	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>
	CV%	<b>6,2</b>	<b>2,9</b>	<b>1,1</b>	<b>4,9</b>	<b>5,1</b>
Ni	Réplicat 1	2,1	2,3	1,8	2,1	1,3
	Réplicat 2	2,2	2,4	1,6	1,6	1,3
	Réplicat 3	2,5	2,4	1,8	2,0	1,2
	Moyenne	<b>2,2</b>	<b>2,4</b>	<b>1,7</b>	<b>1,9</b>	<b>1,3</b>
	Ecart-type	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>
	CV%	<b>9,4</b>	<b>3,9</b>	<b>5,6</b>	<b>13,8</b>	<b>5,1</b>
Zn	Réplicat 1	940	1197	1265	1305	560
	Réplicat 2	994	1197	1291	926	546
	Réplicat 3	1033	1204	1356	1197	506
	Moyenne	<b>989,1</b>	<b>1199,3</b>	<b>1304,2</b>	<b>1143,0</b>	<b>537,2</b>
	Ecart-type	<b>46,3</b>	<b>3,8</b>	<b>46,9</b>	<b>195,1</b>	<b>28,0</b>
	CV%	<b>4,7</b>	<b>0,3</b>	<b>3,6</b>	<b>17,1</b>	<b>5,2</b>

## I.6. PRISE EN COMPTE DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES

Les conditions météorologiques régnant dans la zone pendant les 5 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 (98817104 – Goro Usine), située sur l'ancienne usine pilote, en bordure de la Baie du Prony. Les données de vents (vitesse et direction) sont également obtenues par la station météorologique de AEL/IRD installée sur la balise du récif loro, dans le canal de la Havannah.

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. Lors de cette campagne, chaque cage, à l'exception de St16P et St31, a été équipée d'un capteur miniaturisé qui permis l'acquisition de la température de l'eau à une fréquence de 4 fois par jours, soit toutes les 6 heures, à partir de 30 avril 2014 jusqu'au 01 octobre 2014.

## I.7. MESURE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU DE MER

Les données environnementales constituent des facteurs qui peuvent également influencer et expliquer les évolutions spatiales ou temporelles constatées dans les réponses de bioaccumulation.

Ainsi, lors de cette campagne, en nouveauté, à chacune des 4 sorties (immersion, nettoyage et relevage des cages), les caractéristiques physico-chimiques *in situ* ont été acquises à l'aide d'une sonde CTD. L'oxygène (% de saturation), température (°C), fluorescence ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), turbidité (NTU) et salinité (PSU) ont ainsi été mesurées. Les données de CTD sont moyennées par station et par niveau typologique dans la tranche bathymétrique d'immersion des cages, soit entre 8 et 12 mètres.

## I.8. TRAITEMENT DES DONNEES

### I.8.1. DONNEES DE BIOACCUMULATION DU « CAGING 2014 »

#### I.8.1.1. DIFFERENCIATION DU CORTEGE METALLIQUE

La campagne de *caging* 2014 est étudiée en dissociant les métaux selon leurs origines. On différencie notamment le *Cr*, *Co*, *Fe*, *Ni* et *Mn* qui sont associés aux activités minières et/ou à la dégradation des sols nickélicifères, des métaux d'origines anthropiques ou tellurique *As*, *Cu* et *Zn*.

#### I.8.1.2. PONDERATION DES DONNEES

Les facteurs de concentration (FC), conformément au rapport de synthèse (Gilbert et Fernandez, 2014), ont été

pris en considération, de sorte à analyser les réponses des bioindicateurs en différenciant les FC>1 qui correspondent à de la bioaccumulation des FC<1 qui correspondent à de l'élimination.

Aussi pour chaque année, les concentrations ont été pondérées par la moyenne du lot de référence (lot Baie Maa). Cette nouvelle variable est appelée « Facteur de Concentration » et calculé par l'expression suivante :

$$\text{Facteur de concentration (FC)} = [\text{métal}] / [\text{métal lot initial moyenné}]$$

Il est noté arbitrairement sur l'ensemble des graphiques et tableaux en prenant le nom du métal suivi par «X/Ref» (Ex. : As/Ref, Ni/Ref, Cr/Ref,...)

Cette transformation permet de rendre les évolutions indépendantes des concentrations initiales et facilite les interprétations.

Aussi pour prendre en compte la variabilité naturelle des lots initiaux, l'écart type a également été calculé de manière à réaliser des statistiques sur cette variable qu'on appellera « Référence ».

Ainsi, un FC significativement inférieur à la Référence traduira la mise en place d'une phase d'élimination des métaux. A l'inverse un FC significativement supérieur à la Référence est synonyme d'accumulation.

### 1.8.1.3. METHODOLOGIE D'ANALYSE DES DONNEES

Les stations sont étudiées dans un premiers temps à l'aide d'analyses exploratoires MDS (Multi Dimensional Scaling) (Clarke et Warwick, 1994) sur la matrice normalisée des FC par métal et par station. Cette approche permet de cartographier les observations de telle façon que les distances entre deux échantillons reflètent leur similitude dans la composition en métaux étudiée à travers le FC. Les stations sont ensuite classées suivant leurs similarités dans les assemblages métalliques par une Classification Ascendante Hierarchique (CAH) basée sur les distances euclidiennes.

Les stations sont ensuite regroupées par typologie (Baie vs Océanique) de sorte à évaluer la significativité de ce facteur ( $\alpha=5\%$ ). Après vérification des exigences de normalité et d'homogénéité, des variances des Analyses de Variance paramétriques sont réalisées (ANOVA). Des analyses à posteriori sont réalisées pour identifier l'origine des différences (Test de Tukey) notamment si des évolutions significatives sont observées par rapport aux lots initiaux. Enfin, une série de graphiques est réalisée de sorte à illustrer les résultats.

## 1.8.2. DONNEES ENVIRONNEMENTALES

Les données environnementales constituent des facteurs qui peuvent influencer et expliquer les évolutions spatiales ou temporelles constatées dans les réponses de bioaccumulation. On présentera successivement les données correspondant à la campagne 2014 qu'on cherchera à comparer aux précédentes campagnes.

### 1.8.2.1. MESURES IN SITU

Les données *in situ* acquises à l'aide d'une sonde CTD : oxygène (% de saturation), température (°C), fluorescence ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), turbidité (NTU) et salinité (PSU) sont moyennées par station et par niveau typologique dans la tranche bathymétrique d'immersion des cages, soit entre 8 et 12 mètres.

La significativité de la structuration spatiale (effet de la typologie ou des stations) des données est testée à travers une ANOVA non paramétrique de Kruskal-Wallis (KW) au seuil  $\alpha=5\%$ .

---

### 1.8.2.2. PLUVIOMETRIE, VENTS ET TEMPERATURE

Les données pluviométriques et/ou les données de vents (vitesse et direction) de la station météorologique de Port Boisé (Goro Usine) et de la Balise Ioro (AEL/IRD) ont été compilées sur la période de *caging* de sorte à obtenir les données de cumul journalier et/ou la moyenne des cumuls journaliers sur la période. Les données de température de l'eau de mer au niveau des cages relevées par les capteurs miniaturisé ont été extraites et traitées.

Les données pluviométriques moyennes de cumul journalier sur la période de *caging* ont été comparées entre les années à travers une ANOVA paramétrique au seuil  $\alpha=5\%$ . Des analyses à posteriori ont été réalisées pour identifier les couples d'années qui présentent des différences significatives (Test de Tukey).

---

### 1.8.2.3. METAUX DISSOUS

Les données de certains métaux dissous dans l'eau ont été compilées et analysées en conservant les données de mi-profondeur. En effet, cette bathymétrie correspond le plus à la masse d'eau qui baigne les cages.

Les données inférieures aux limites de quantification (LQ) sont majorées à la LQ de sorte à obtenir une série de données complète. Cette manipulation est nécessaire aux traitements statistiques. Cette majoration engendre une surestimation des valeurs calculées qui dans l'objectif d'une comparaison entre les années reste acceptable.

Pour des raisons de cohérence entre les années, les deux campagnes semestrielles d'échantillonnage de la colonne d'eau par année (mars/avril et août de 2009 à 2014) ont été analysées, avec un sous échantillons de métaux. Ainsi, les métaux dissous *Co*, *Cu*, *Fe*, *Mn*, *Ni* et *Zn* analysées ont été retenus.

Les données moyennes de cumul journalier sur la période de *caging* ont été comparées entre les années à travers une ANOVA paramétrique au seuil  $\alpha=5\%$ . Des analyses à posteriori ont été réalisées pour identifier les couples d'années qui présentent des différences significatives (Test de Tukey).

---

## 1.8.3. DONNEES BIOMETRIQUES

Les données biométriques de taille de la coquille (mm) et de poids total humide (g) lors de la mise en cage et à la relève ont été analysées par station et par regroupement typologique ainsi que la croissance relative CR<sup>6</sup> en poids (g/j) et en longueur (mm/j).

L'indice AFNOR ou indice de qualité (IC) (norme [AFNOR NF V45056, 1985](#)) a également été calculé selon la formule suivante :

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

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

Enfin, à partir des variables biométriques pour les comparaisons interannuelles, le taux de croissance journalière (TCJ) en longueur et en poids frais total est calculé selon l'expression suivante :

---

<sup>6</sup> CR= Taille ou Poids final – Taille ou Poids initial / Durée d'immersion des cages

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

Ln V : logarithme népérien de la variable biométrique V (longueur ou poids frais total) mesurée à  $T_i$  ( $V_i$ ) et à  $T_f$  ( $V_f$ );  $T_i$ : début de transplantation ;  $T_f$ : fin de transplantation.

La significativité de la structuration spatiale et temporelle par niveau typologie des données de CR et TCJ ainsi que de l'IC a été testée à travers une ANOVA non paramétrique de Kruskal-Wallis (KW) au seuil  $\alpha=5\%$ .

Aucune analyse statistique des données de croissance à l'échelle des stations n'est réalisée. En effet, les mesures de taille et de poids réalisées sont faites aléatoirement au sein du pool d'huitres de chaque station et ne permettent pas de suivre la croissance individuelle. Seule une croissance moyenne par station est obtenue. En revanche, la significativité de la structuration spatiale par station de l'IC est testée suivant la même approche statistique que pour l'analyse de l'effet du niveau typologique.

#### 1.8.4. COMPARAISON DES DONNÉES DE BIOACCUMULATION AVEC LES CAMPAGNES PRÉCÉDENTES

##### 1.8.4.1. RAPPELS DES RESULTATS ESSENTIELS ISSUS DU RAPPORT DE SYNTHÈSE SUR LE CAGING

La campagne 2014 fait suite à une synthèse des données de *caging* depuis 2010 (Gilbert et Fernandez, 2014). Pour *I. isognomon*, les conclusions de cette étude montrent que bien que certaines évolutions temporelles apparaissent, seule l'année 2013 présente une réponse significative de bioaccumulation pour le groupe des stations dites de « Baie » pour l'As, le Cr et le Mn (Tableau 9).

Tableau 9 : Résultats du test de Tukey entre les différentes modalités des facteurs pour *Isognomon isognomon*. \* = effet significatif ; \*\* = effet hautement significatif ; \*\*\* = effet très hautement significatif ; NS = effet non significatif ; T0 = lot initial (Baie Maa). Extraits du rapport Gilbert et Fernandez (2014).

Facteur de concentration (FC)	2010			2011		
	Baie/T0	Océanique/T0	Baie/Océanique	Baie/T0	Océanique/T0	Baie/Océanique
As/Ref	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Cr/Ref	***	***	NS	***	***	NS
Mn/Ref	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ni/Ref	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Facteur de concentration (FC)	2012			2013		
	Baie/T0	Océanique/T0	Baie/Océanique	Baie/T0	Océanique/T0	Baie/Océanique
As/Ref	NS	NS	NS	*	NS	NS
Cr/Ref	NS	NS	NS	***	NS	***
Mn/Ref	NS	NS	NS	*	NS	*
Ni/Ref	NS	NS	*	NS	*	*

Bien que non significative, la bioaccumulation des stations dites « Océanique » présente pour ces métaux des niveaux moyens inférieurs à celle des stations dites de « Baie ». Enfin, concernant le Ni, les différences significatives mises en évidence sont liées à une phase d'élimination (stations Océanique) et non à une phase d'accumulation. L'année 2012 est celle qui n'a pas montré de tendance de bioaccumulation significative. Enfin, les années 2010 et 2011 montrent des différences significatives pour le Cr pour les deux typologies (Baie et Océanique) avec respectivement une phase d'élimination et d'accumulation.

La très faible significativité du FC pour *I. isognomon* suggère que le niveau de pression en métaux biodisponibles du milieu récepteur est faible et ne permet pas de réponse claire du bioindicateur dans les conditions expérimentales. Une réponse différenciée est toutefois observée pour les métaux d'origine latéritique (Co, Cr, Fe, Mn et Ni), correspondant dans la plus part des cas à des phases d'élimination. D'un point de vue strictement statistique, les traitements analytiques montrent que le bivalve ne présente pas d'évolutions significatives dans le contexte des études conduites, excepté en 2013.

Aussi certaines pistes d'optimisation ont été proposées de sorte à obtenir une réponse plus marquée de ce bioindicateur notamment l'augmentation de la durée de transplantation ainsi que l'ajout de nouvelles stations (St15 et St16P). Ces recommandations ont été appliquées lors de cette campagne 2014.

#### 1.8.4.2. COMPARAISON AVEC LES DONNEES DES CAMPAGNES PRECEDENTES

Une analyse exploratoire MDS (Clarke et Warwick, 1994) sur la matrice normalisée des FC par métal et par station pour toutes les années a été réalisée. Elle permet de resituer la réponse annuelle depuis 2010 des bioindicateurs en dissociant les métaux miniers, des non miniers. La significativité des évolutions temporelle a été analysée à travers une analyse de similarité (ANOSIM).

Enfin, les graphiques des séries temporelles de FC par métal de 2010 à 2014 suivant la typologie « Baie/Océanique/Référence » ont été réalisées de sorte à illustrer les évolutions mise en évidence entre la campagne 2014 et les précédentes.

# RESULTAT-DISCUSSION

## I.1. ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX ET BIOMETRIQUES

### I.1.1. ANALYSE DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX

#### I.1.1.1. DUREE DE CAGING

Cette campagne fait suite à un travail de réflexion et de synthèse qui avait conduit à proposer une augmentation de la durée de *caging*. Avec une durée de 155 jours, la durée de *caging* de cette campagne 2014 est beaucoup plus longue que celles réalisées précédemment (Figure 2). Cette durée correspond à une augmentation de l'exposition de l'ordre de 63%.

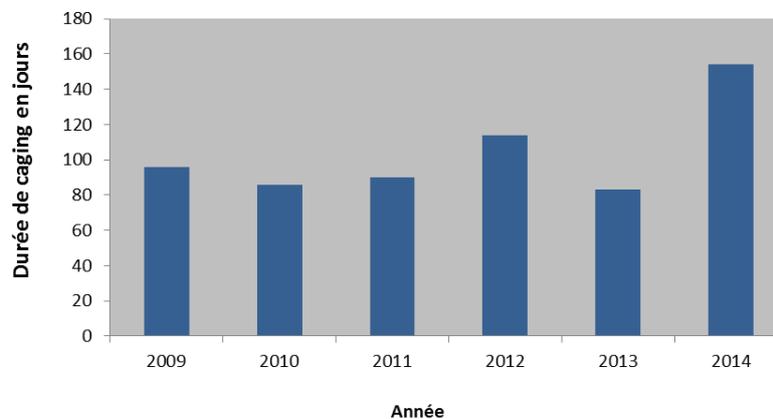


Figure 2 : Durée de *caging* de 2009 à 2014 en jours.

#### I.1.1.1. MESURES *IN SITU*

Lors de cette campagne des mesures *in situ* à l'aide de la sonde multi-paramètre ont été réalisées pour la première fois. Elles concernent la température, la turbidité, la salinité, la conductivité, la fluorescence et l'oxygène dissous. Elles sont présentées successivement par regroupement typologique puis par station.

La physico-chimie de l'eau dans la couche de mi-profondeur (8-10 m) ne présente pas de différence significative que ce soit entre typologies (Figure 3) ou entre les stations (Figure 4).

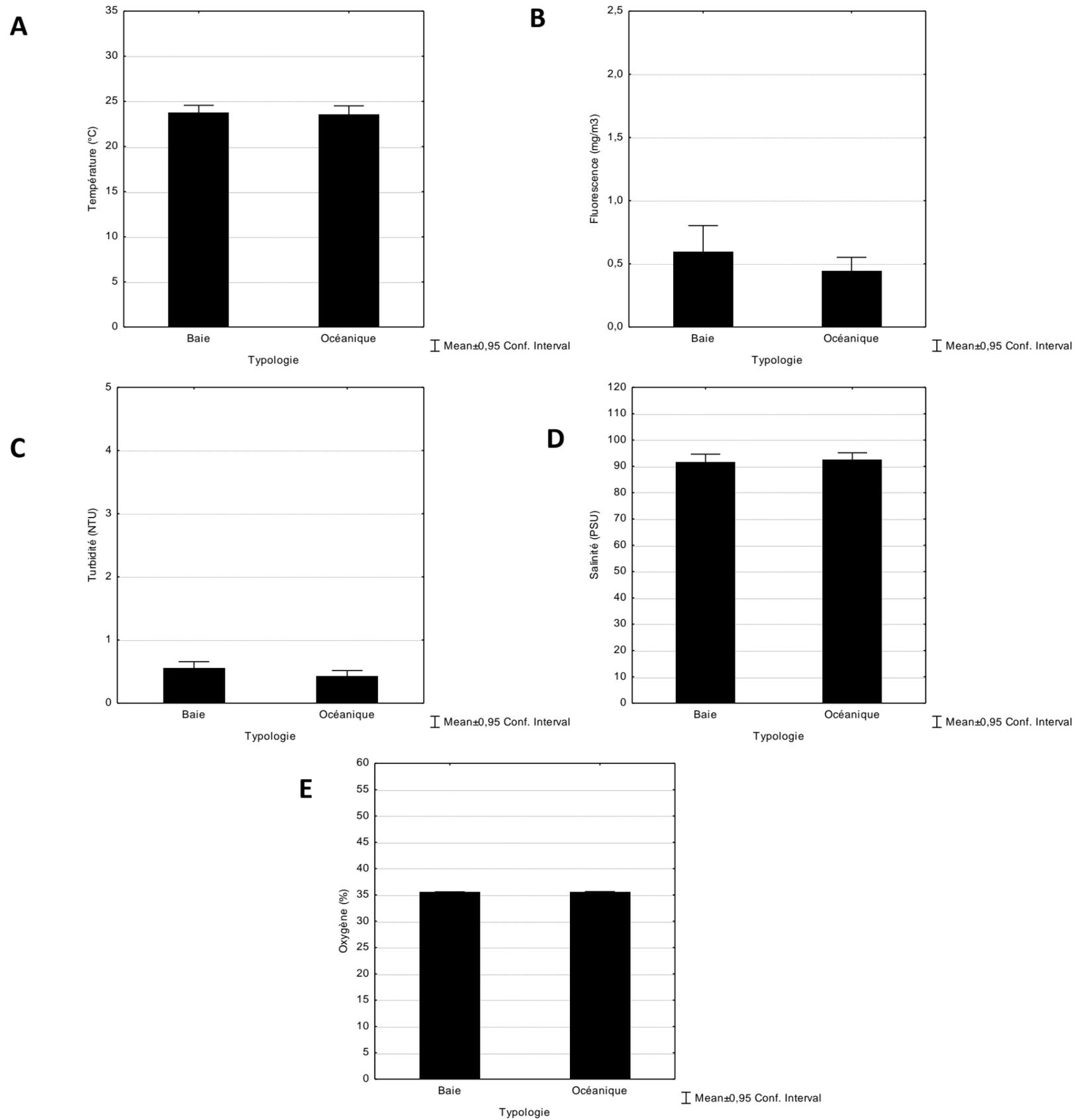


Figure 3 : Température (°C ; A), fluorescence (mg/m<sup>3</sup> ; B), turbidité (NTU ; C), salinité (PSU ; D) et oxygène (% de saturation ; E), par niveau typologique. Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes  $\pm$  l'intervalle de confiance pour la couche d'eau de mi-profondeur (8-10m).

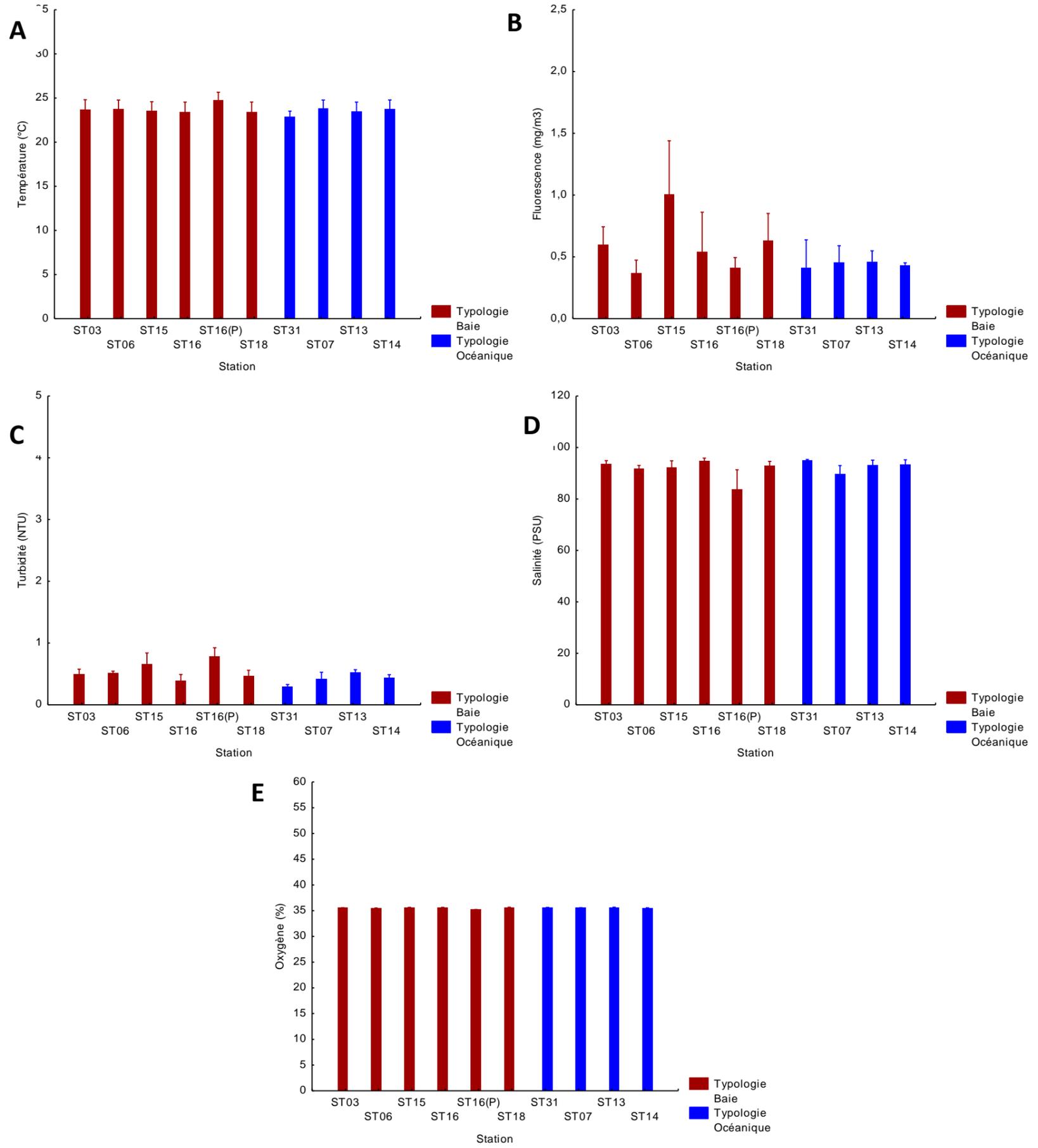


Figure 4 : Température (°C ; A), fluorescence (mg/m<sup>3</sup> ; B), turbidité (NTU ; C), salinité (PSU ; D) et oxygène (% de saturation ; E) par stations. Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes  $\pm$  l'intervalle de confiance pour la couche d'eau de mi-profondeur (8-10m).

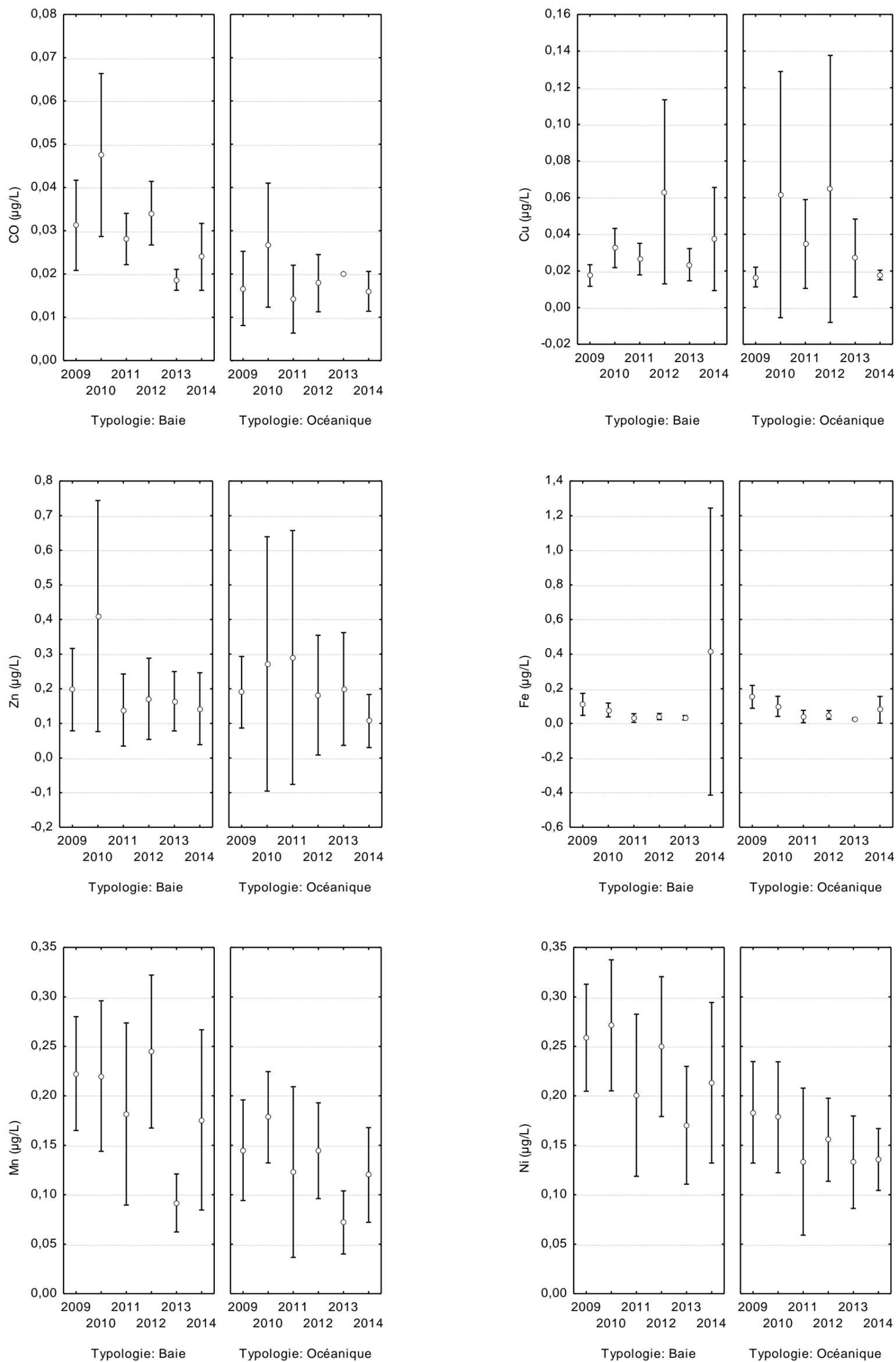


Figure 5 : Concentrations moyennes modifiées<sup>7</sup> (µg/L) à mi-profondeur par niveau typologique et par année en Co, Cu, Zn, Fe, Mn et Ni. Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes ± l'intervalle de confiance.

<sup>7</sup> Toutes les valeurs inférieures à LQ ont été majorées avec une valeur égale à la LQ afin de permettre les analyses statistiques

### I.1.1.1. METAUX DISSOUS

Les concentrations moyennes en métaux dissous par campagne (*Co*, *Cu*, *Zn*, *Fe*, *Mn* et *Ni*) pour la couche d'eau de mi-profondeur sont présentées à la Figure 5. Ainsi la campagne 2014 s'inscrit dans la gamme de valeurs usuellement mesurées lors des campagnes précédentes à l'exception du *Fe* dans la typologie de « Baie » où une concentration très élevée de 2,9 µg/L a été mesurée sur la station St18.

Aucune variation significative entre les années n'est mise en évidence pour le *Cu*, *Fe* et *Zn*. Des différences significatives entre les années apparaissent pour le *Co*, le *Mn* et le *Ni*. Toutefois, les analyses montrent, à posteriori, que les différences entre les couples d'années ne sont pas induites par des mesures avec l'année 2014 qui présente pour ces métaux des valeurs dans les moyennes historiques.

### I.1.1.2. PLUVIOMETRIE

Du 30 avril au 01 octobre (soit après 155 jours de transplantation), la pluviométrie totale mesurée par la station météorologique de météorologique de *Goro Usine* a été de 577 mm, avec une forte valeur du taux journalier de précipitations cumulées de 95 mm mesurée le 6 mai 2014 (

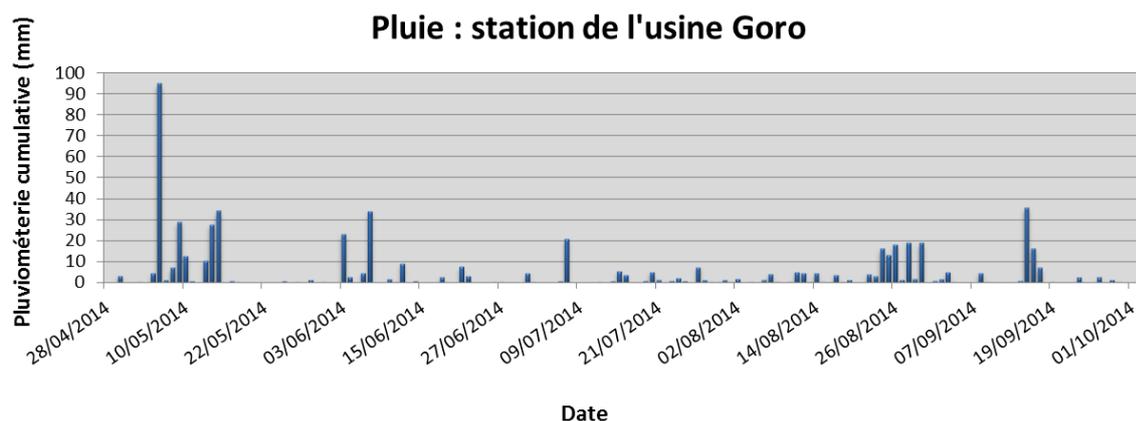


Figure 6).

A titre indicatif, les années précédentes, la pluviométrie totale a été de 1065 mm en 2013 sur 83 jours d'immersion, 411 mm en 2012 sur 114 jours d'immersion, 341 mm en 2011 sur 90 jours, 315 mm en 2010 sur 85 jours, et 245 mm en 2009 sur 83 jours.

Les données pluviométriques de cumul journalier (mm) de 2011 à 2014 sont présentées à la Figure 7. En moyenne, la campagne 2014 est caractérisée par une pluviométrie beaucoup moins importante qu'en 2013 (de plus 3,4 fois), mais semblable aux campagnes de 2012 et 2011. (Tableau 10 ; Figure 8).

Les données moyenne du cumul journalier présentent des différences significatives entre les années par rapport à 2013 qui présente un cumule moyen significativement supérieur. Hormis cette exception, les statistiques montrent qu'il n'y a pas de différences significatives de pluviométrie entre 2014 et 2012, ni entre 2014 et 2011 (Figure 8).

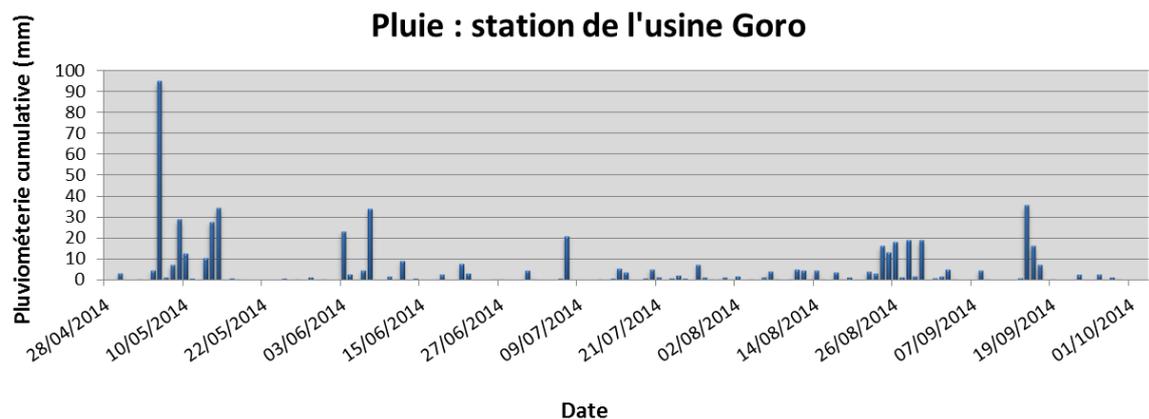


Figure 6 : Pluviométrie (cumulative journalière) mesurée en continue à la station météorologique de Vale-NC (Goro Usine) pendant toute la durée de la campagne de transplantation 2014 (155 jours d'immersion).

Tableau 10 : La pluviométrie journalière cumulée et moyenne globale des différentes campagnes de *caging* depuis 2011 et le nombre de jour d'immersions.

Année	Nb de jours	Pluviométrie cumulée (mm)	Pluviométrie moyenne (mm/j)
2014	155	577,0	3,7 ±10,1
2013	83	1064,6	12,8 ±43,3
2012	114	411,0	3,6 ±12,5
2011	90	341,7	3,8 ±8,3

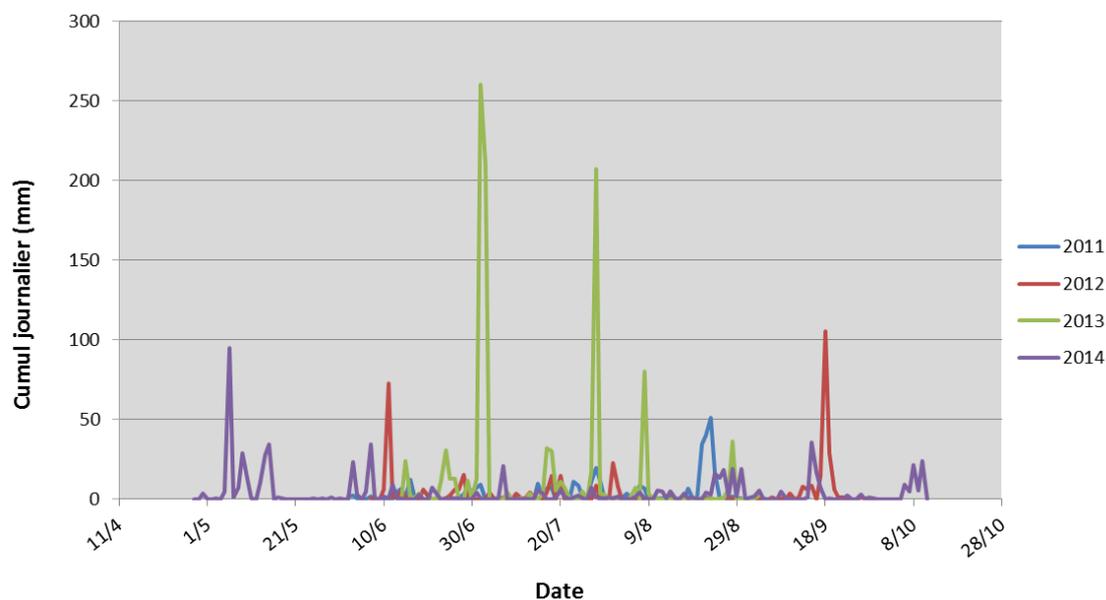


Figure 7 : Cumul journalier (mm) de pluie à la station météorologique de Port Boisé (Goro Usine) pour les campagnes de *caging* depuis 2011.

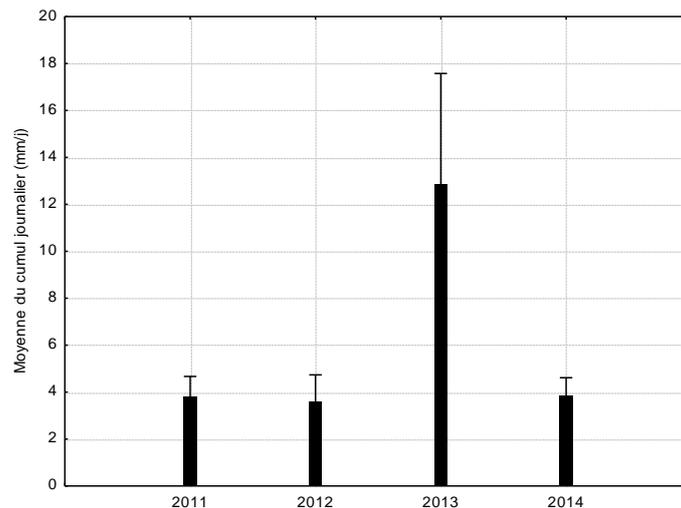


Figure 8 : Moyenne des cumuls journaliers de pluie pour la station météorologique de Port Boisé (Goro Usine) de 2011 à 2014 avec leurs écarts-types pour les périodes respectives d'immersion des cages.

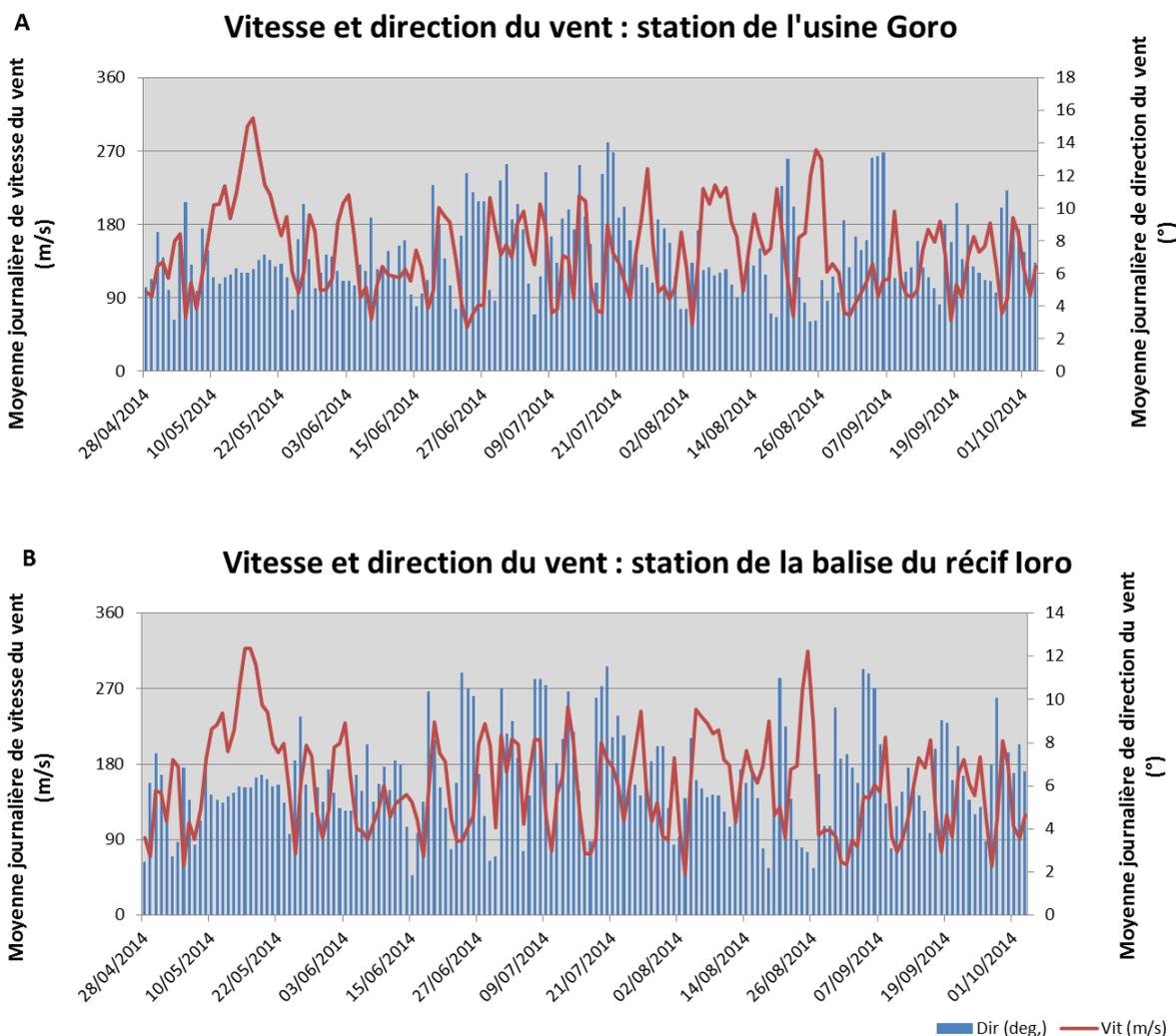


Figure 9 : Evolution de la vitesse et de la direction des vents (moyenne journalière) mesurée en continu à la station météorologique de Vale-NC (Usine Goro ; A) et de la balise du récif Ioro (AEL/IRD ; B) pendant toute la durée de la campagne de transplantation 2014 (155 jours d'immersion).

#### I.1.1.1. VITESSE ET DIRECTION DES VENTS

Du 30 avril au 01 octobre (soit après 155 jours de transplantation), la vitesse journalière moyenne du vent révélée par la station météorologique de Goro Usine sur l'ensemble de la campagne a été de 7,3 m/s, avec des valeurs minimales d'environ 2,7 m/s et une valeur maximale de 15,5 m/s (Figure 9). Cette amplitude de vitesse est moins enlevée à celle précédemment enregistrée lors de la campagne de 2013 (moyenne de 11,5 m/s, avec des valeurs minimales d'environ 6 m/s et une valeur maximale de 21,3 m/ et de 2012 (moyenne de 11,2 m/s ; valeurs minimales et maximales de 3,9 à 26,9 m/s, respectivement).

Pendant les périodes d'immersion, les vents ont été généralement de SE à SW (Figure 9). Avec les campagnes précédentes, 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, ni en 2014.

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

Malgré les différences de relief, les conditions météorologiques relevées en 2014 sont quasiment similaires, entre les stations météorologiques de Vale-NC et la balise du récif loro,

#### I.1.1.2. TEMPERATURE DE L'EAU DE MER

La température de l'eau de mer a été relevée au niveau de la plupart des cages par un capteur miniaturisé. Le nombre de valeurs nombre de valeurs enregistrées est de 620 sur 155 jours à chacune de 8 stations qui étaient équipées. Les températures moyennes, températures moyennes, minimales et maximales globales par station sont représentées dans le

Tableau 11.

La température moyenne globale est 22,9 ±1,2°C. La température moyenne globale relevée lors la campagne de 2014 reste stable de 2014 reste stable malgré une durée d'immersion plus longue d'exposition (

Tableau 11).

Au niveau des stations, en 2014, les trois stations dites « Océanique » (St13, St14 et St07) montrent une température moyenne plus élevées de 0,5 à 1,1°C qu'en 2013 tandis que les températures aux stations dites « Baie » (St03, St06, St16 et St18) demeurent stables entre ces deux campagnes.

Les profils des données montrent une tendance régulière à la baisse après la première semaine de mai (début de saison fraîche) sur toutes les stations. Contrairement aux stations St06, St07 voire St14, les quatre relevés journaliers restent notamment constantes au niveau des stations St16, St15, St13 et St18 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable. ; Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

En superposant ces profils de températures moyennées par jour, deux tendances principales s'observent. En effet, les stations qui se situent dans (St18, St16, St15) ou en face (St13) de la baie du Prony demeurent relativement plus fraîches que les stations qui se situent le long du canal de Havannah (St03, St06, St07 et St14). Cette différence est notamment marquante entre le début des mois de juin et de septembre (Figure 12).

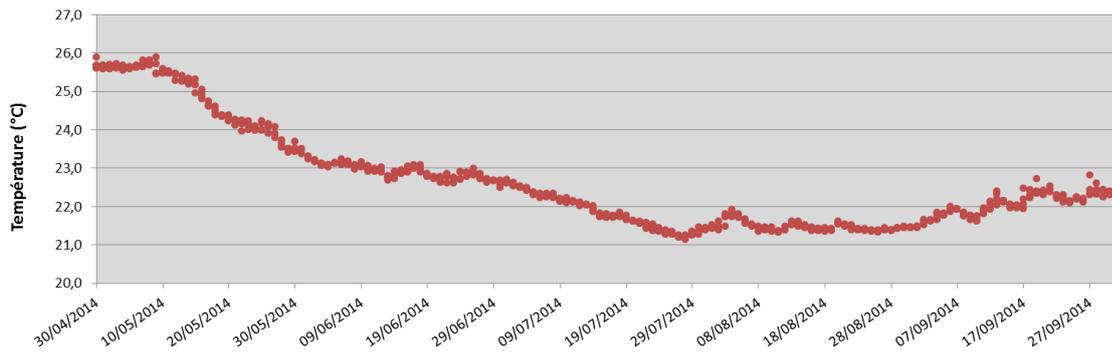
Par rapport la campagne de 2013, pour certaines stations les profils s'opposent. En effet, contrairement à 2013, en 2014 à partir de début juillet et jusqu'au début septembre, les températures de l'eau aux stations St07 et St14 (canal du Havannah) demeurent plus chaudes qu'aux stations St16 et St18 (baie du Prony) ([Kumar-](#)

Roiné *et al.*, 2013). Pour les stations St03, St06 et St13, aucune variation n'est observable en les deux années.

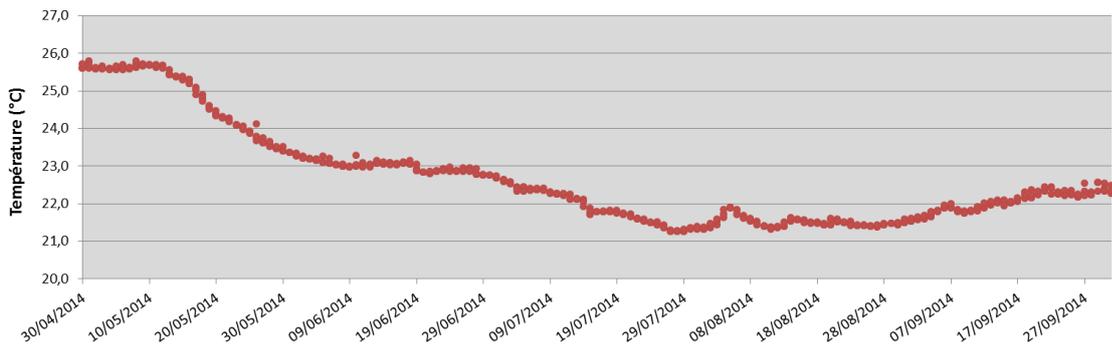
Tableau 11 : Les moyennes, écart-types, minimales et maximales de température de l'eau de mer par station (n=620). Les données ont été recueillies à chaque station par un capteur miniaturisé à la fréquence de 6 heures par jour, soit 4 relevés journaliers.

Campagne 2014								
Station	St16	St15	St18	St13	St03	St06	St14	St07
Moyenne (°C)	22,6	22,7	22,7	22,8	22,9	23,0	23,1	23,9
Ecart-type (°C)	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0	1,1
Min (°C)	21,2	21,3	21,3	21,6	21,5	21,5	21,8	21,7
Max (°C)	25,7	25,7	25,8	25,9	25,6	25,7	25,5	25,7
Campagne 2013								
Station	St16	St15	St18	St13	St03	St06	St14	St07
Moyenne (°C)	22,8	-	22,8	22,2	22,7	22,7	22,2	22,2
Ecart-type (°C)	0,4	-	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Min (°C)	21,7	-	21,7	21,4	21,7	21,4	20,3	21,4
Max (°C)	23,8	-	24,0	22,9	23,7	23,8	23,01	22,9

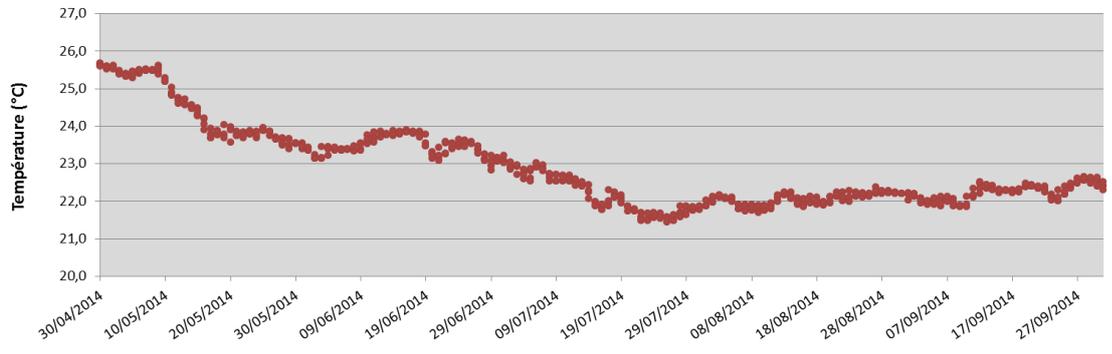
Température de l'eau à St 16



Température de l'eau à St 15



Température de l'eau à St 03



Température de l'eau à St 14

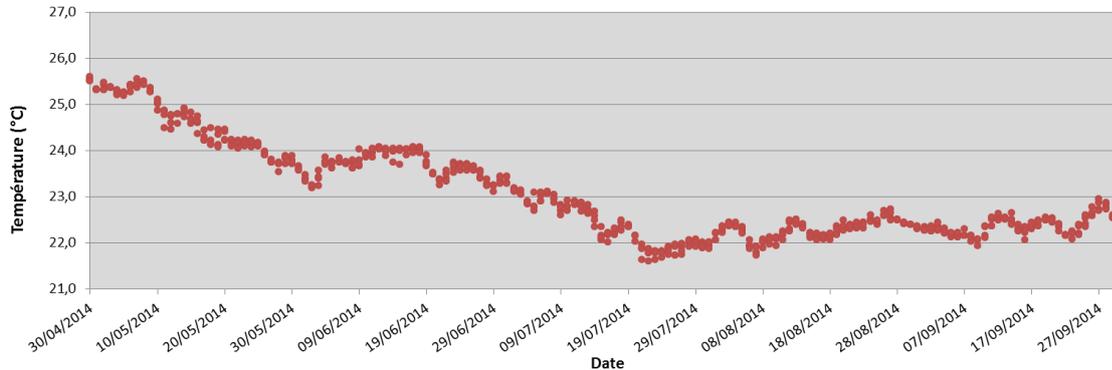


Figure 10 : Evolution de la température de l'eau de mer pendant la campagne de transplantation 2014. Les données ont été recueillies aux stations St03, St14, St15 et St16 toutes les 6 heures, entre le 30 avril 2014 et le 01 octobre 2014, soit durant les 155 jours de la campagne de transplantation par des capteurs miniaturisés. (●) = révélés journaliers à une fréquence de 6 heures.

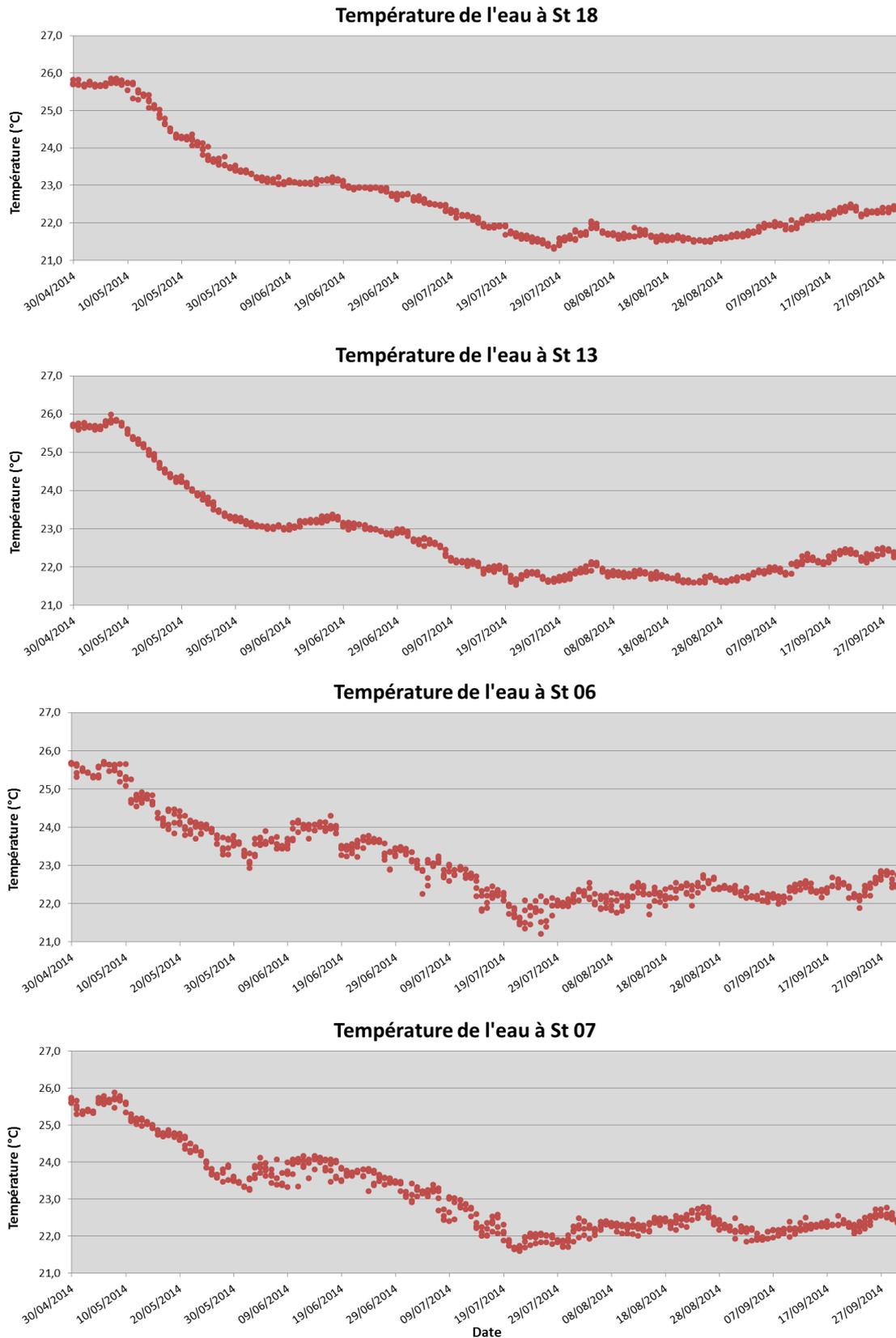


Figure 11 : Evolution de la température de l'eau de mer pendant la campagne de transplantation 2014. Les données ont été recueillies aux stations St06, St07, St13 et St18 toutes les 6 heures, entre le 30 avril 2014 et le 01 octobre 2014, soit durant les 155 jours de la campagne de transplantation par des capteurs miniaturisés. (●) = révélés journaliers à une fréquence de 6 heures.

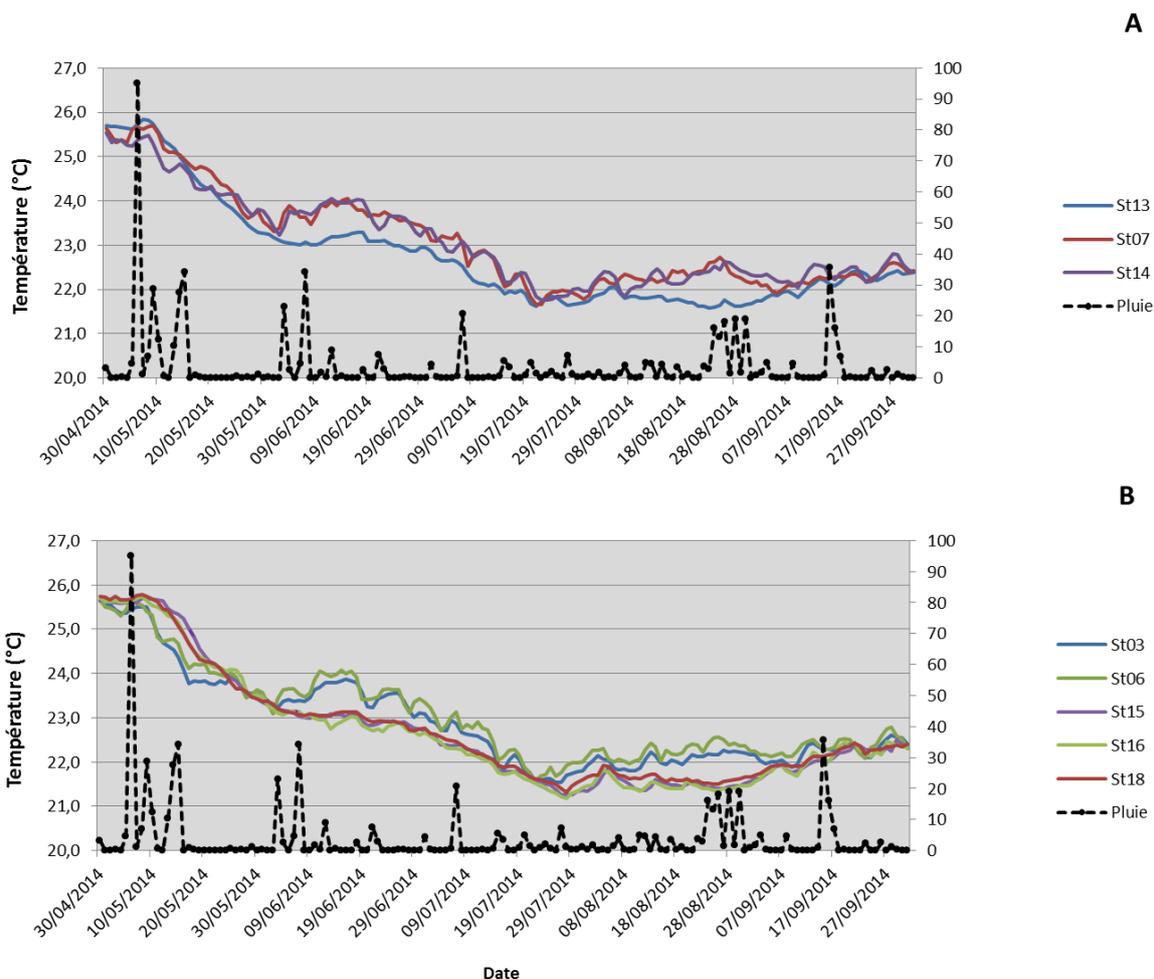


Figure 12 : Comparaison des profils de températures moyennes journalières de l'eau de mer au niveau des stations dites (A) « Océanique » et (B) « Baie » avec la pluviométrie pour la campagne de Transplantation 2014.

En 2013, les profils de température moyenne avaient nettement permis de mettre en évidence les typologies décrites : les stations de type « Océanique » (St13, St07 et St14) et les stations de type « Baie » qui sont sous l'influence directe des apports terrigènes (St06, St18, St16 et St03). En 2014, ces observations diffèrent pour les stations St03, St06 et St13. En effet, pour les deux premières, les profils sont similaires à ceux de St14 et St07 dont l'influence est plutôt océanique, alors qu'inversement, celui de la station St13 est comparable à ceux de St18 et St16, dont l'influence est terrigène.

### I.1.2. DONNEES BIOMETRIQUES ET DE CROISSANCE RELATIVE

Les données de biométries initiales et finales de poids et de longueur sont présentées à la Figure 13. Les cages ont ainsi été mise en place avec des lots homogènes sur l'ensemble des stations avec une taille moyenne de  $77,1 \pm 12,4$  mm pour un poids moyen de  $17,1 \pm 5,7$  g.

Les données présentées à la Figure 15 montrent qu'une certaine croissance en taille et en poids est observée à l'issue des 155 jours d'immersion, avec une taille moyenne finale de  $84,93 \pm 10,95$  mm pour un poids moyen final de  $19,74 \pm 5,65$  g. L'analyse des données de CR en poids et en longueur montre qu'il n'y a pas de

différences significatives (KW,  $\alpha=5\%$ ) entre les typologies, probablement du fait du niveau de variabilité observé entre les stations (Figure 15).

L'IC, rapport entre le poids frais des chairs sur le poids frais total après transplantation, présente une valeur moyenne de  $11,47 \pm 1,85 \%$ . Cet indice ne présente pas de variations significatives entre les typologies, ni entre les stations (KW,  $\alpha=5\%$ ). On notera par ailleurs que cet indice ne présente pas de variations significatives entre les années (Figure 14).

L'évolution temporelle de l'ensemble des données biométriques et celles de croissance qui en sont issues (TCJ et CR) sont présentées à la

Figure 16. Il apparaît que l'année 2013 est celle qui présente les conditions biométriques les plus différentes, en taille comme en poids. L'année 2014 présente des caractéristiques très similaires à l'année 2012. Pour autant l'ensemble des variables de CR et de TCJ ne présentent pas de différences significatives (KW,  $\alpha=5\%$ ). Ce constat apparaît malgré des moyennes différentes probablement du fait des niveaux élevés de variabilité.

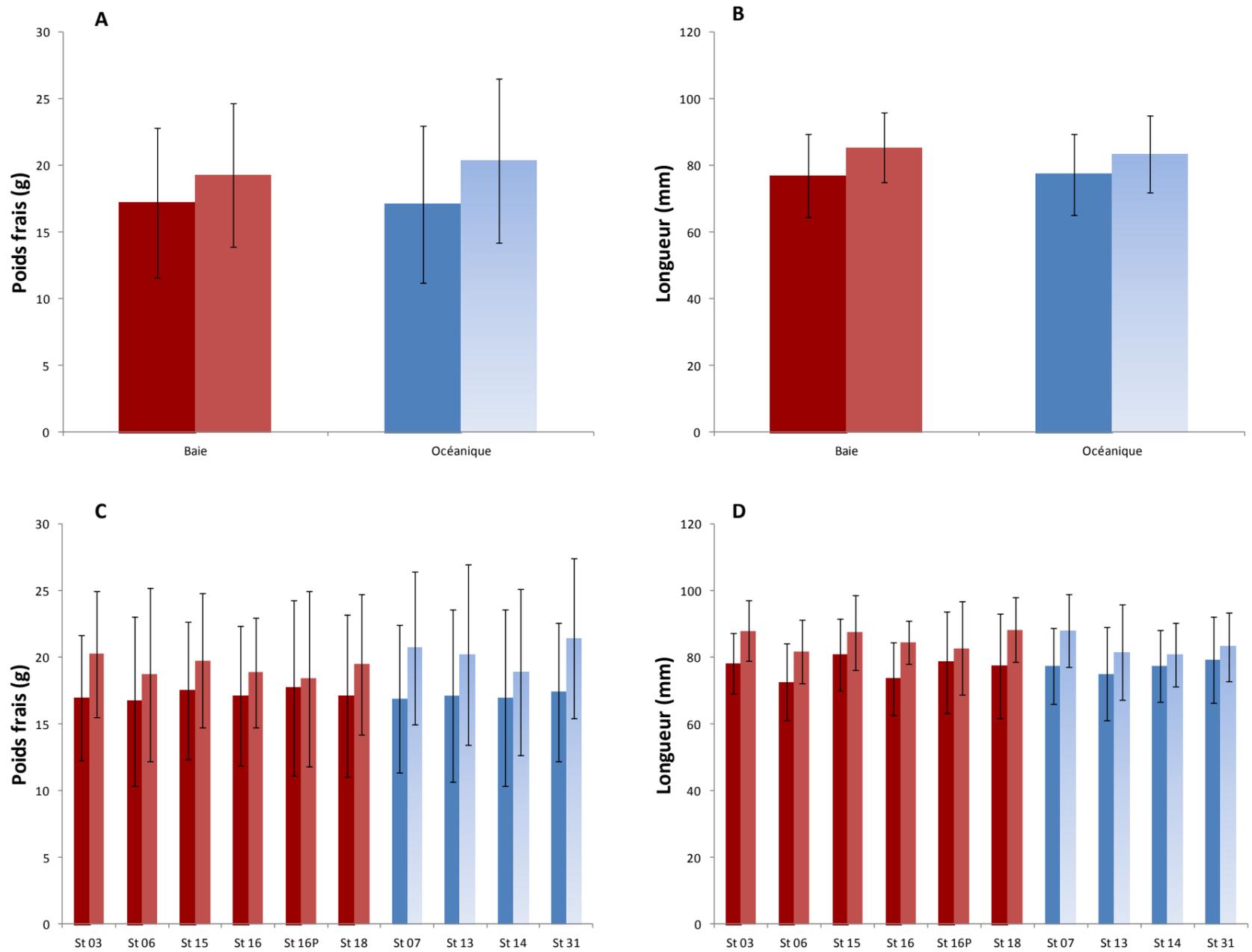


Figure 13 : Données de poids frais (g ; A et C) et de longueur (mm ; B et D) initiale (foncé) et finale (claire) par niveau typologique et par stations (océaniques en bleu et baie en rouge) de la campagne Transplantation 2014. Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes  $\pm$  l'écart-type.

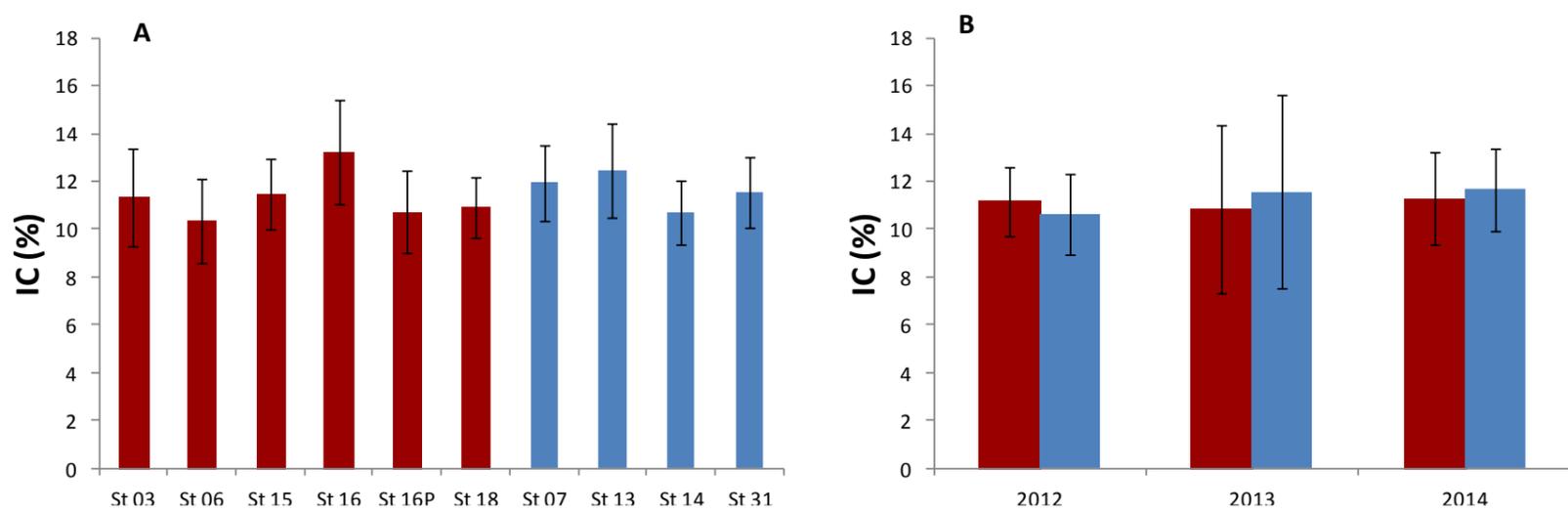


Figure 14 : L'indice de condition physiologique IC (%) par les stations océaniques (bleu) et de baie (rouge) (A) de la campagne Transplantation 2014 ainsi que par niveau typologique pour les années de 2012, 2013 et 2014 (B). Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes  $\pm$  l'écart-type.

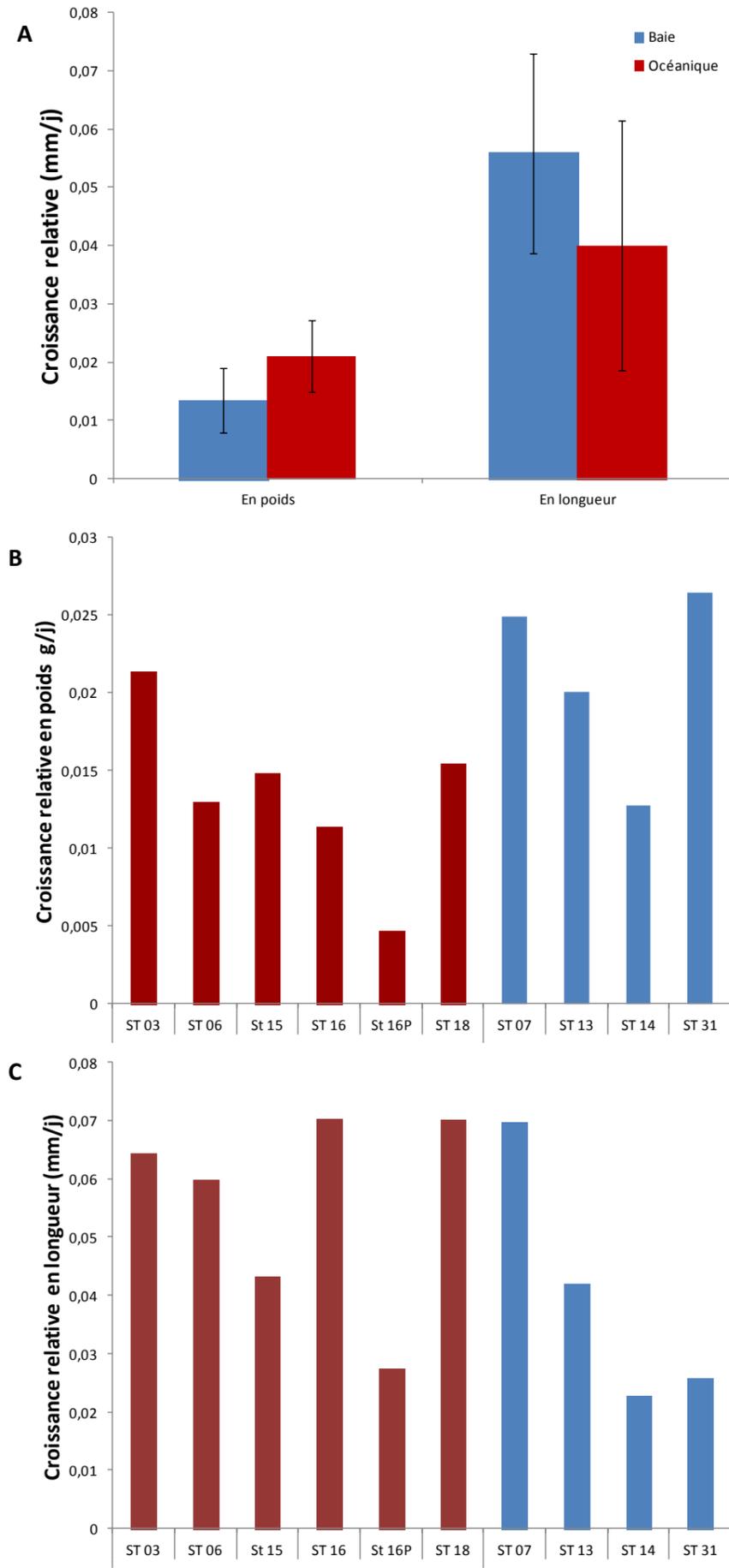


Figure 15 : Croissance relative en longueur (mm/j) et en poids (g/j) par niveau typologique (A) et par station (océanique en bleu et de baie en rouge ; B et C). Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes  $\pm$  l'écart-type.

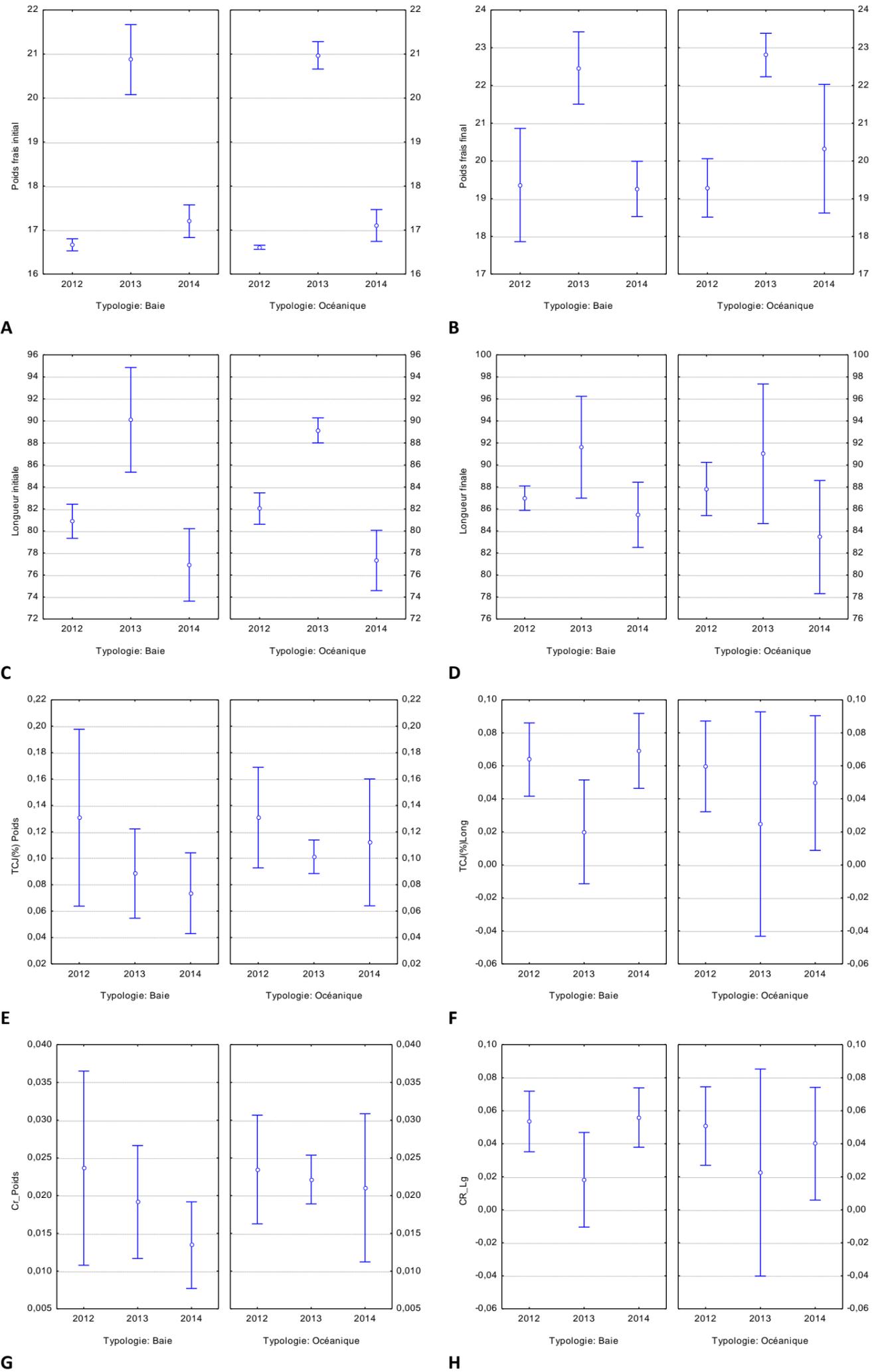


Figure 16 : Evolution entre 2012 et 2014 par niveau typologique des données biométriques et de croissance. Poids frais (g) initial (A) et final (B) ; Longueur (mm) initiale (C) et finale (D) ; taux de croissance journalière (TCJ ; %) en longueur (E) et en poids (F) ; Croissance relative (CR) en poids (g/j ; G) et en longueur (mm/j ; H).

## I.2. REPONSE SPATIALE DES BIOINDICATEURS

### I.2.1. ANALYSES EXPLORATOIRES DES STATIONS

Les analyses CAH et MDS sur le cortège des métaux d'origine minière (Figure 17) montre qu'il existe une réponse cohérente des bio-indicateurs en 2014 avec des FC supérieurs sur les stations de « Baie » que sur les stations dites « Océaniques ».

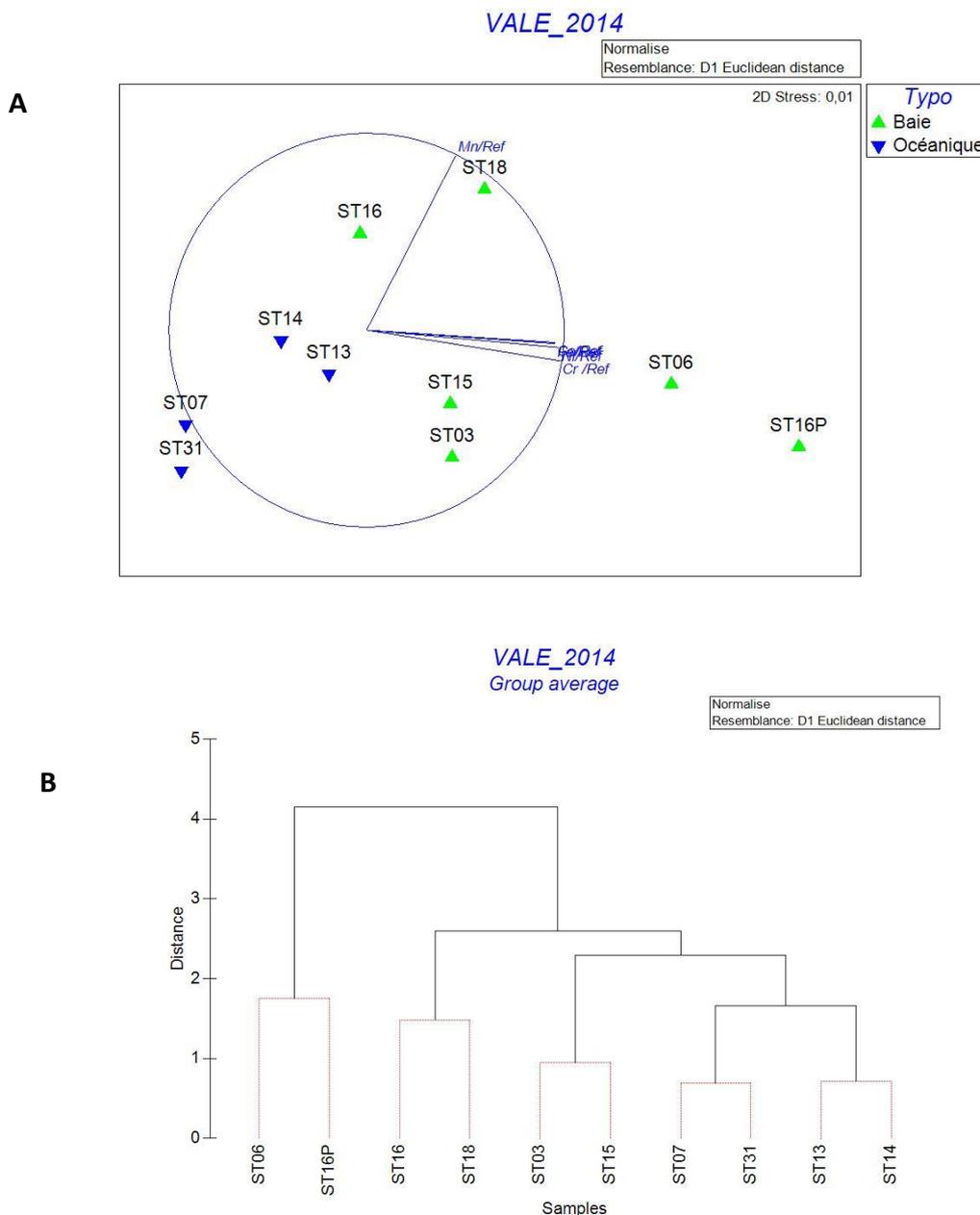


Figure 17 : Illustration la réponse de la bioaccumulation du cortège métallique d'origine minière (*Cr, Co, Fe, Ni et Mn*) par station par une analyse de type MDS (A) et par CAH (B).

L'ensemble des métaux tirent le nuage de points dans la même direction à l'exception du *Mn* qui tire les stations St 16 et St 18 de Prony vers le haut (Figure 17). On voit notamment que les stations du port (St16P) et

de baie Kwé (St06) présentent des réponses similaires qui sont différentes des autres stations. Elles présentent les FC les plus élevés. Ces stations s'opposent aux stations St07 et St31 (« Océaniques ») qui font offices de références.

Au niveau des métaux non miniers (Figure 18) on ne retrouve pas de séparation des stations suivant la typologie Baie/Océanique. L'ensemble des métaux non miniers sont tirés par la station St16P du port qui semble ainsi présenter des FC plus élevés.

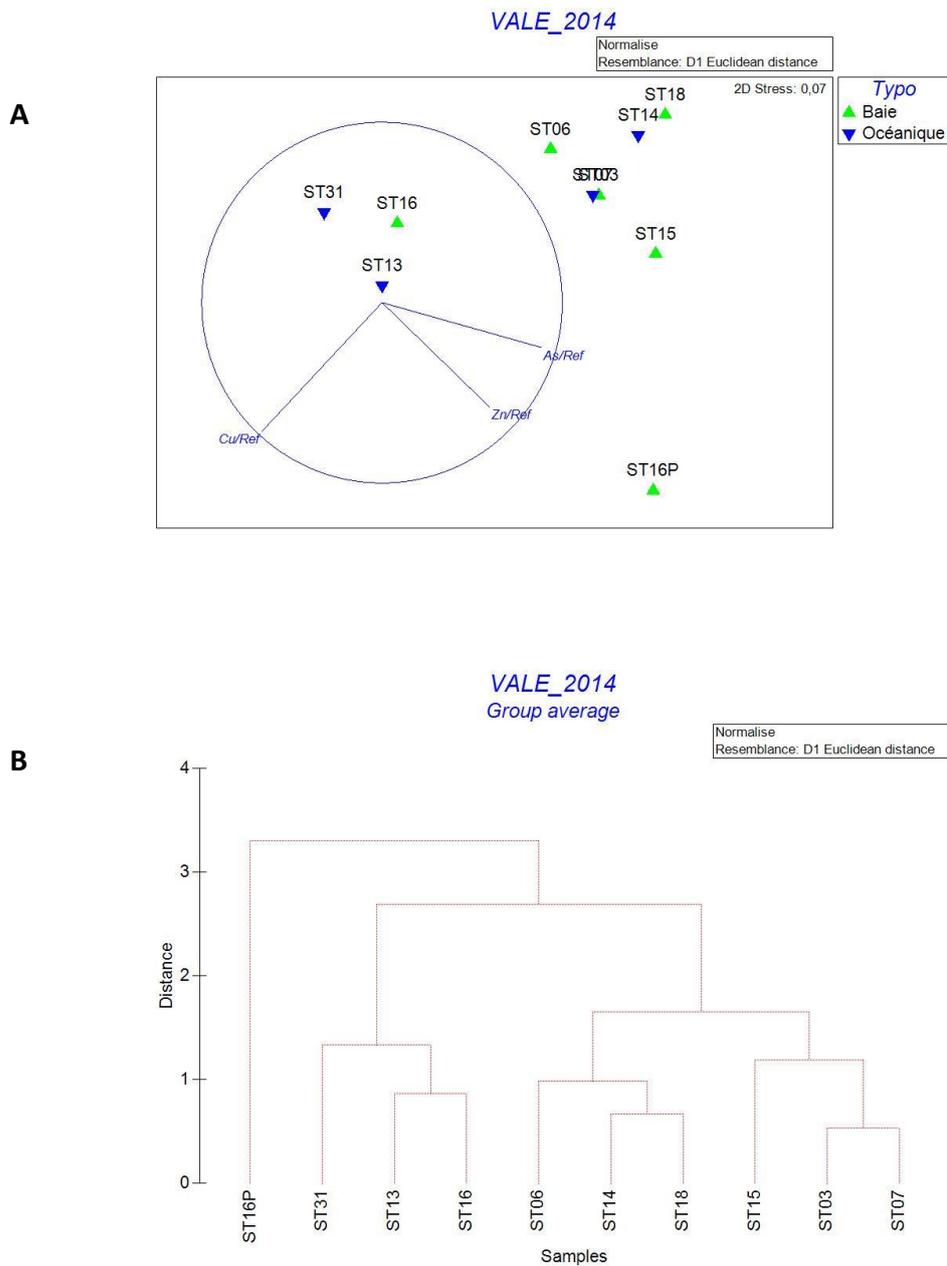


Figure 18 : Illustration la réponse de la bioaccumulation du cortège métallique non miniers (As, Zn et Cu) par station par une analyse de type MDS (A) et par CAH (B).

## I.2.2. COMPARAISONS PAR METAL DES STATIONS REGROUPEES PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE

Les données de FC regroupées suivant la classification typologique Baie/Océanique/Référence sont présentées à la Figure 19 pour les métaux miniers et à la Figure 20 pour les non miniers.

Cette typologie est un facteur de structuration significatif (ANOVA  $\alpha=5\%$ ) pour l'ensemble des métaux miniers et non miniers à l'exception du *Mn* et du *Cu* (Tableau 12).

Tableau 12 : Synthèse de la significativité de l'effet typologique (ANOVA) et des analyses pariées à posteriori (Tukey) au seuil  $\alpha$  de 5%. \* = effet significatif et NS = effet non significatif ; T0 = lot initial (Baie Maa).

	Effet Typo	Baie/T0	Océanique/T0	Baie/Océanique	Bioaccumulation	Elimination	Pas d'évolution
<b>As/Ref</b>	*	*	NS	*	Baie	-	Océanique
<b>Zn/Ref</b>	*	NS	NS	*			Baie et Océanique
<b>Cu/Ref</b>	NS	-	-	-	-	-	Baie et Océanique
<b>Cr/Ref</b>	*	*	NS	*	Baie	-	Océanique
<b>Co/Ref</b>	*	NS	*	*		Océanique	Baie
<b>Fe/Ref</b>	*	NS	*	*	-	Océanique	Baie
<b>Ni/Ref</b>	*	*	*	*	-	Baie et Océanique	-
<b>Mn/Ref</b>	NS	-	-	-	-	-	Baie et Océanique

Exception faite du *Mn*, pour l'ensemble des métaux miniers (Figure 19), une évolution différentielle est observée avec des niveaux moyens de FC significativement supérieurs sur la typologie de « Baie » par rapport à ceux de la typologie « Océanique » (Tukey  $\alpha=5\%$ ). On constate qu'une phase d'élimination différentielle est observée pour le *Ni* et le *Fe* sur les deux typologies. Pour le *Co*, une élimination est observée sur les stations de type « Océanique » alors qu'une bioaccumulation est mesurée sur celles de « Baie ». Pour le *Cr*, la typologie de « Baie » présente une phase de bioaccumulation alors qu'aucune évolution n'est observée sur la typologie « Océanique ».

La significativité statistique de ces tendances d'évolutions de bioaccumulation/élimination de chaque typologie est présentée au Tableau 12. Aussi les évolutions constatées ne sont pas systématiquement significatives en comparaison avec les lots initiaux (T0). Seule le *Ni* est significativement éliminé sur les deux typologies. Le *Co* et le *Fe* ne présentent d'évolution significative que sur la typologie « Océanique » où il est éliminé. Enfin pour le *Cr*, la typologie de « Baie » présente une phase de bioaccumulation significative.

A l'exception du *Cu*, les autres métaux non-miniers (Figure 20) présentent une évolution différentielle avec des niveaux moyens de FC significativement différents entre la typologie de « Baie » et la typologie « Océanique » (Tukey  $\alpha=5\%$ ). Le *Zn* présente une évolution différentielle similaire aux métaux miniers avec des niveaux moyens de FC significativement supérieurs sur la typologie de « Baie » par rapport à ceux de la typologie « Océanique » (Tukey  $\alpha=5\%$ ). La tendance à la bioaccumulation de ce métal dans la typologie « Baie » n'est pas statistiquement confirmée, alors que sont élimination en typologie « Océanique » l'est. Enfin l'*As* est bioaccumulé sur les deux typologies mais uniquement de façon significative sur les stations de « Baie ».

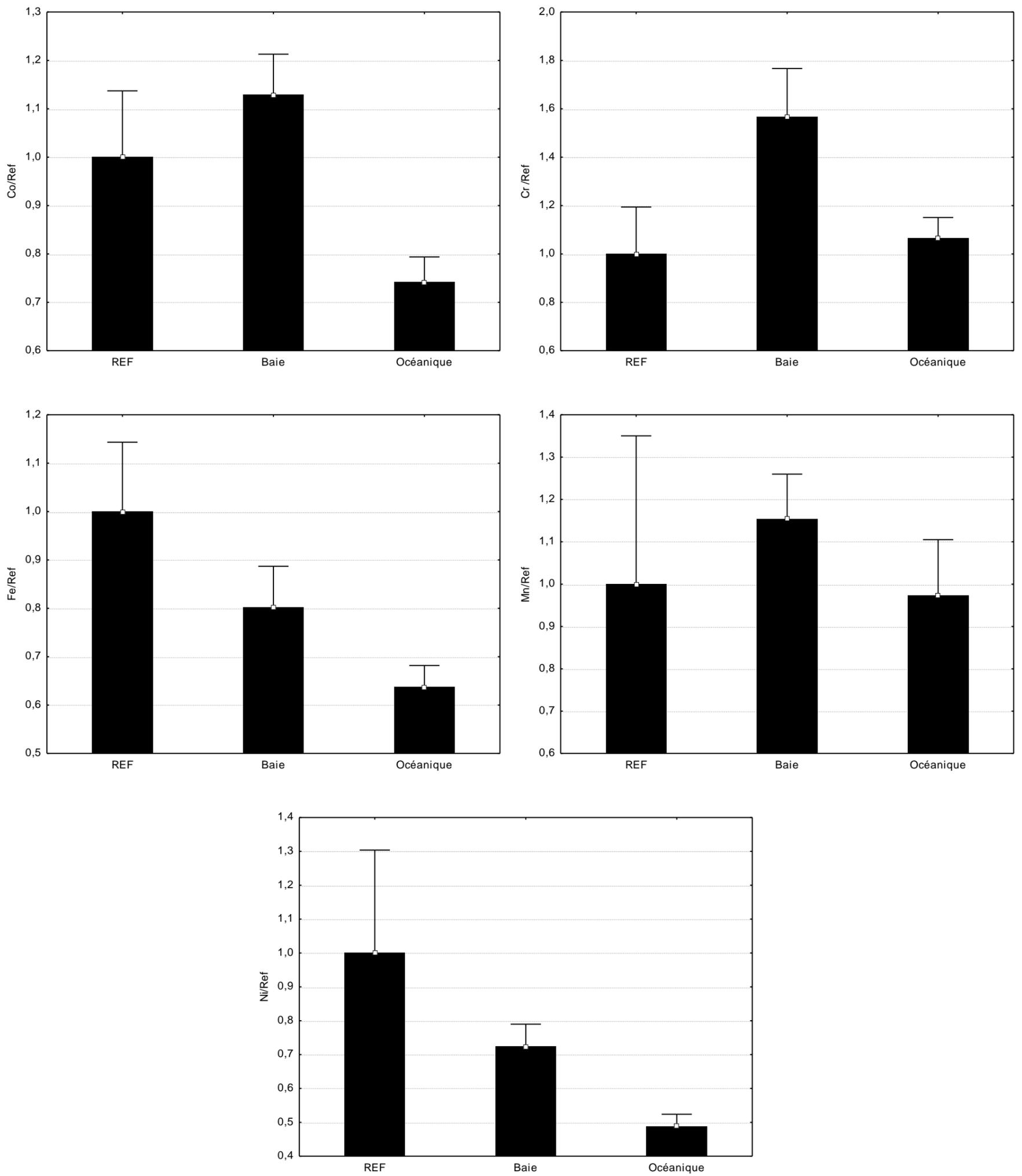


Figure 19 : Facteur de concentration pour les métaux miniers (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) et par niveau typologique pour la campagne Transplantation de 2014. Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes  $\pm$  l'intervalle de confiance.

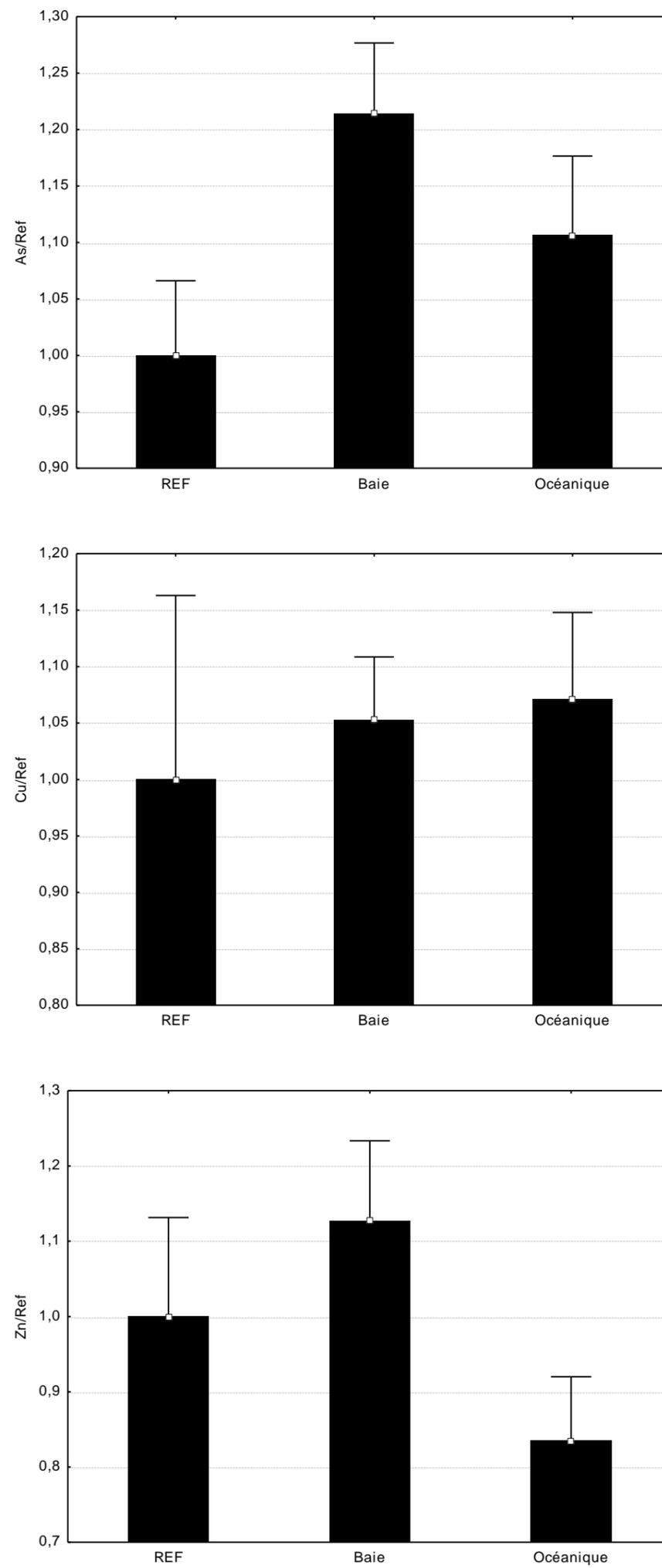


Figure 20 : Facteur de concentration pour les métaux non miniers (As, Cu et Zn) et par niveau typologique pour la campagne Transplantation de 2014. Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes  $\pm$  l'intervalle de confiance.

### I.2.3. COMPARAISONS PAR METAL AU NIVEAU DES STATIONS

Les réponses différentielles des bioindicateurs observées entre les typologies proviennent naturellement des stations qui la composent. Aussi, le détail des données de FC par station et par métal (Figure 21 et Figure 22) confirme les tendances mise en évidence à travers les analyses MDS.

Au niveau des métaux miniers, on retrouve globalement une séparation entre les niveaux de FC des stations de « Baie » de celles présentes en zone plus « Océanique ». De plus, pour la plupart de ces métaux (*Mn*, *Ni*, *Cr* et *Fe*), les niveaux de FC sont systématiquement plus élevés en St06 (Baie Kwé) qu'en St03 (Baie de Port Boisé).

Dans la baie de Prony le gradient inshore/offshore *ST15-ST16-ST13* fait apparaître un gradient décroissant de FC pour le Cr, Co, Ni et Fe, voire pour le Zn.

Enfin, la station St16P est celle qui présente les niveaux de FC les plus élevés à contrario de la station St31 qui présente elle les plus faibles et qui fait office de référence.

Pour les métaux non miniers (*As* et *Cu*), cette séparation Baie/Océanique est moins systématique en fonction des FC supérieurs dans l'une ou dans l'autre des typologies. Pour le *Zn*, on retrouve la séparation des niveaux de FC entre ces deux typologies, Comme la plupart des métaux miniers, le *Zn* présente un niveau de FC supérieur dans les stations de « Baie », plus spécifiquement entre la station St16P, où le FC est maximal, et les quatre stations « Océaniques » (St07, St14, St13 et St 31) où le FC atteint un minimum en St31.

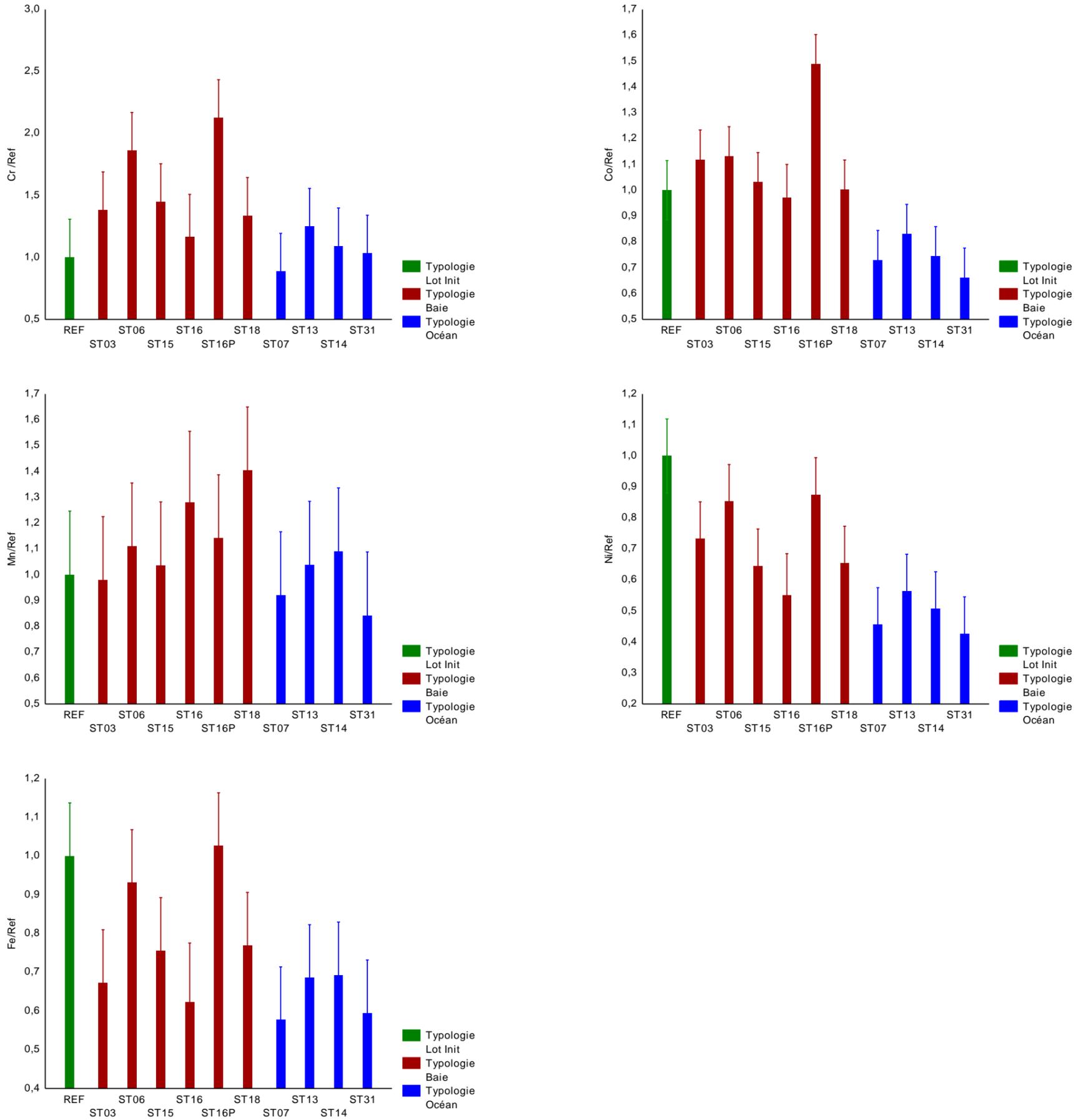


Figure 21 : Facteur de concentration pour les métaux miniers et par station<sup>8</sup> pour la campagne Transplantation de 2014. Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes  $\pm$  l'intervalle de confiance.

<sup>8</sup> La station REF correspond au FC du lot initial.

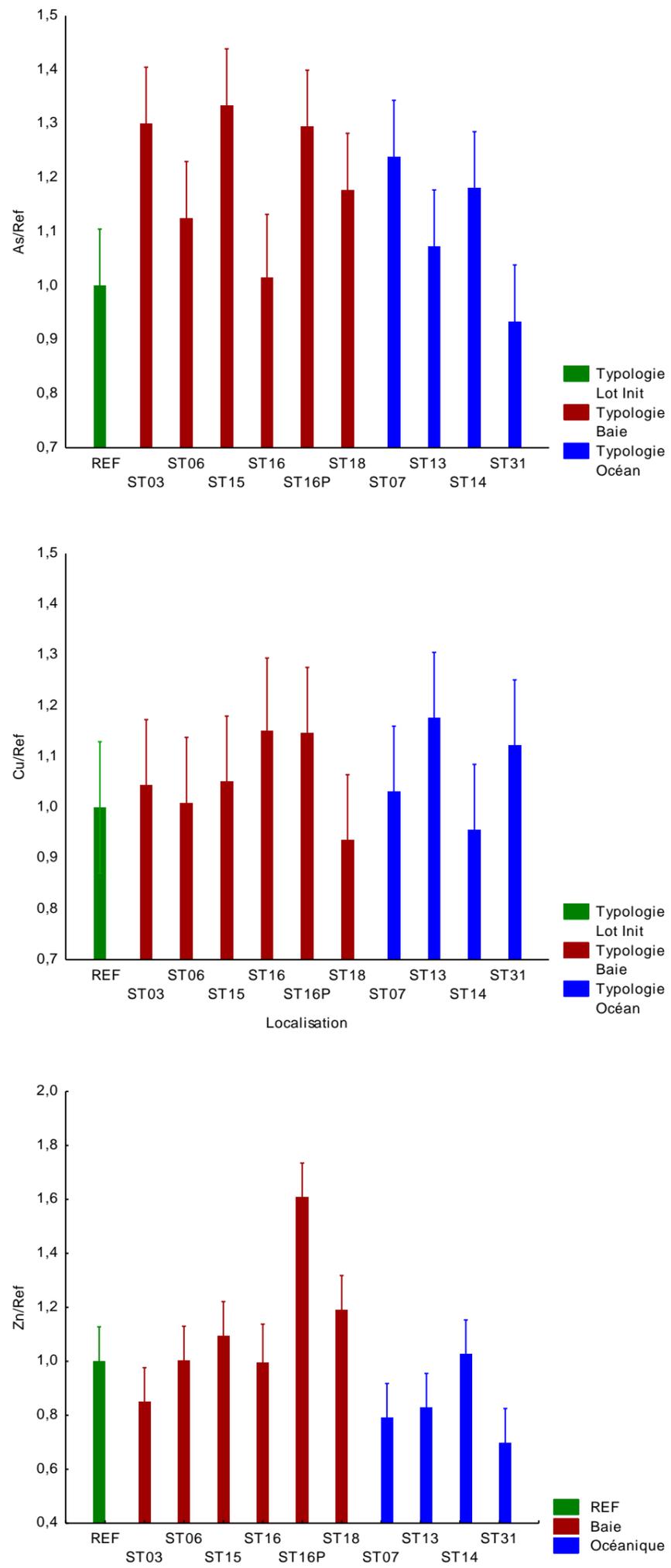


Figure 22 : Facteur de concentration pour les métaux non miniers et par station<sup>9</sup> pour la campagne Transplantation de 2014. Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes  $\pm$  intervalle de confiance.

<sup>9</sup> La station REF correspond au FC du lot initial.

### I.3. REPONSE DE LA BIOACCUMULATION AVEC LES CAMPAGNES PRECEDENTES

Les résultats de la synthèse réalisée (Gilbert et Fernandez, 2014) montrent que le bivalve ne présentait pas d'évolutions significatives dans le contexte des études conduites, excepté en 2013. En effet, en 2013, la réponse du bioindicateur avait fait apparaître un gradient Baie/Océanique cohérent qui n'avait pas été observé les années précédentes. Ce constat est d'ailleurs illustré à la Figure 23.

Effectivement, hormis 2013 et 2014, l'ordination des stations selon un gradient décroissant Baie/Océanique n'est pas observée. Ainsi, la comparaison temporelle est uniquement réalisée avec cette campagne 2013.

Ainsi comme présenté à la Figure 24 (A) et confirmé à la Figure 25 pour les métaux miniers, l'année 2013 montre globalement des niveaux de FC plus élevés qu'2014. En effet, les niveaux observés sur les stations de type « Océanique » de 2013 sont situées dans le nuage de point des stations de type « Baie » de 2014. Ainsi, en 2013, les stations « Océanique » présentent des teneurs, pour ces métaux miniers, comparables à celles mesurées sur les stations de « Baie » en 2014. Cette évolution est par ailleurs confirmée statistiquement (ANOSIM).

Enfin concernant les métaux non miniers, la Figure 24(B) et la Figure 26 montrent qu'il y a globalement peu d'évolutions, celles-ci ne sont pas significatives (ANOSIM). On constate toutefois, une évolution à la hausse du FC des stations de « Baie » entre 2013 et 2014 pour le Zn, par exemple St18 en 2014.

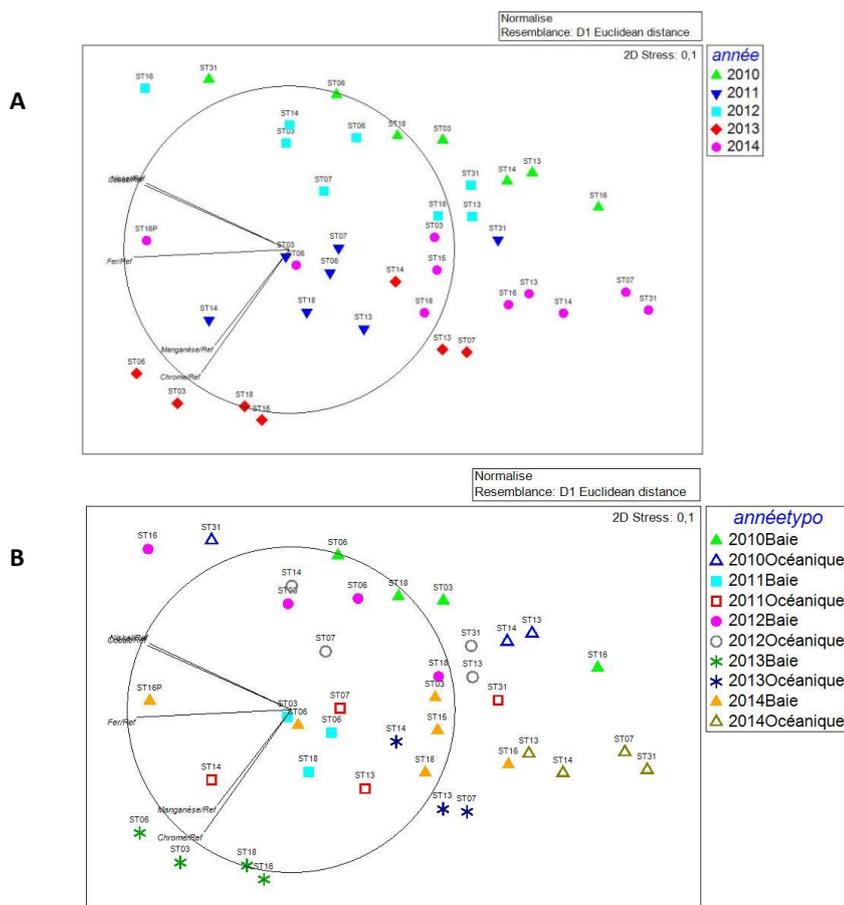


Figure 23 : Illustration de la répartition du FC par station pour les métaux miniers (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) de 2010 à 2014 à travers une analyse MDS avec un code couleur suivant les années (A) et suivant les années et la typologie (B).

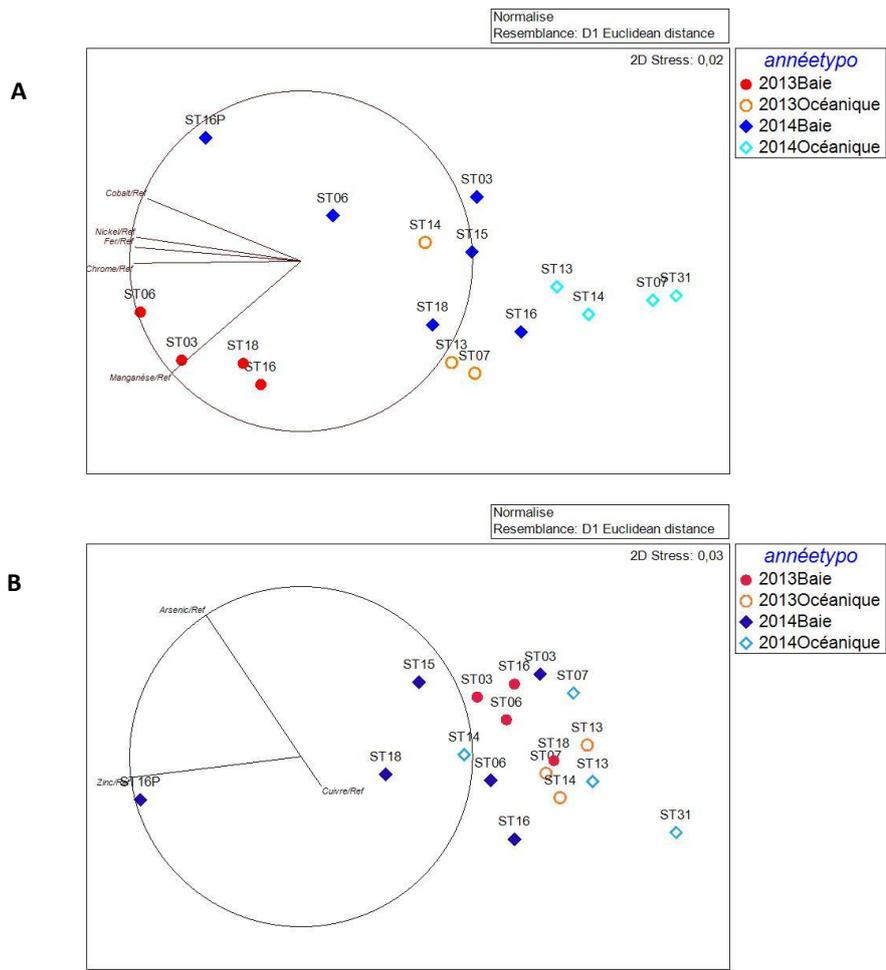


Figure 24 : Illustration de la répartition du FC par station pour les métaux miniers (A ; Co, Cr, Fe, Mn et Ni) et non miniers (B ; As, Cu et Zn) en 2013 et 2014 à travers une analyse MDS avec un code couleur suivant les années et la typologie.

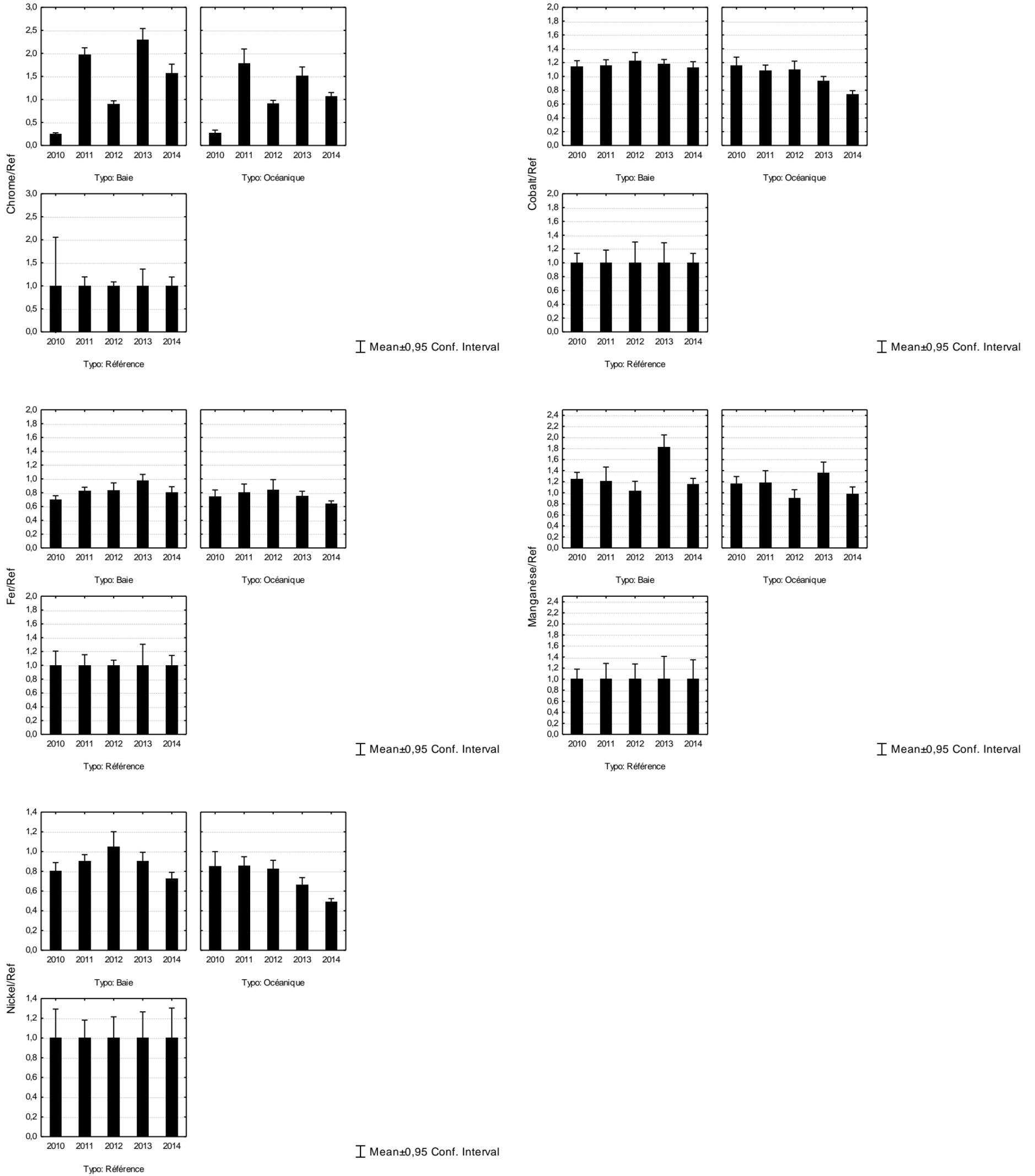


Figure 25 : Evolution temporelle du facteur de concentration par année et par niveau typologique pour les métaux miniers (Co, Cr, Fe, Mn et Ni).

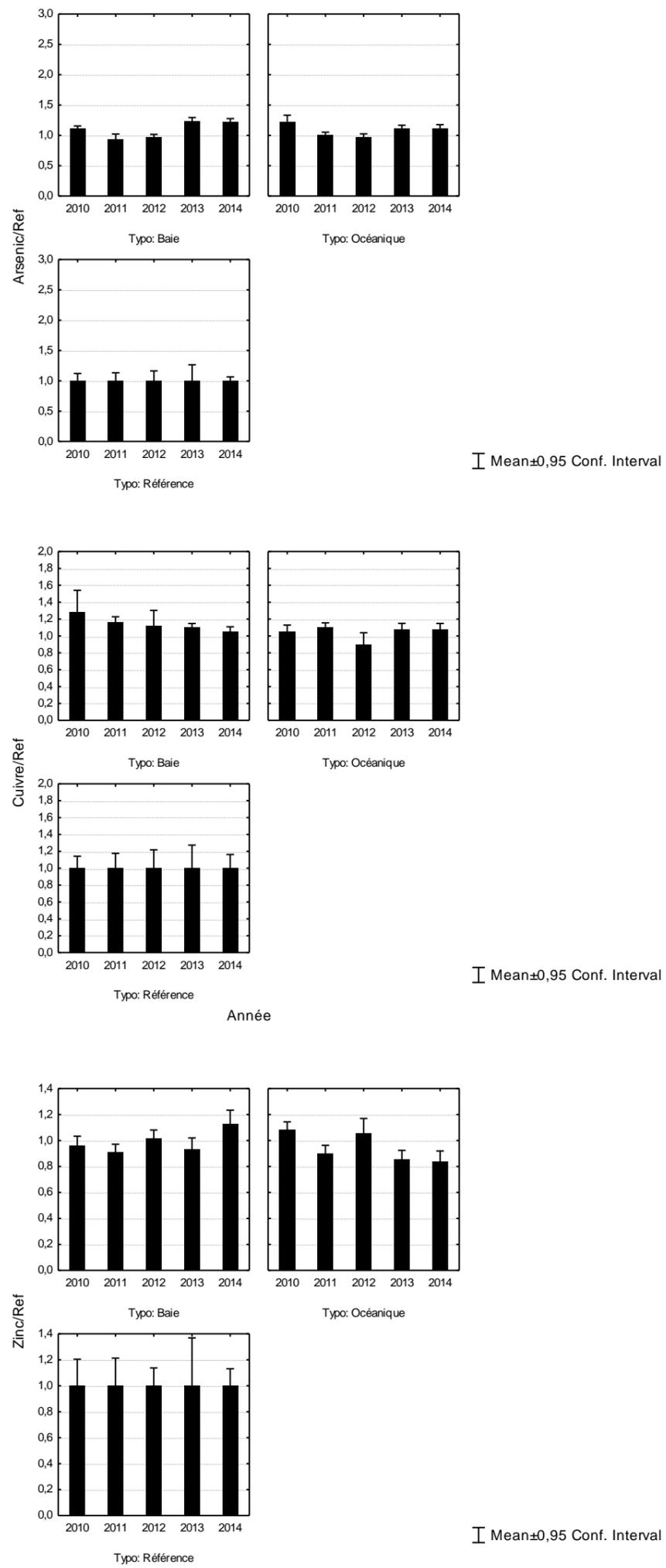


Figure 26 : Evolution temporelle du facteur de concentration par année et par niveau typologique pour les métaux non miniers (As, Cu et Zn).

## I.4. CONCENTRATIONS EN METAUX DANS LES ALGUES

Après les 155 jours d'immersion, une perte quasi totale de matériel biologique a été constatée sur toutes les stations. Cette diminution du nombre de frondes se révèle être trop importante pour appliquer un quelconque traitement statistique.

**Rappel :** *L'origine de cette perte semblait être le broutage des frondes d'algues par les poissons. En effet, en 2012, lors des phases de brossage 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 aux filets contenant les frondes.*

*En 2014, malgré des modifications importantes encore apportées (pose de frondes avec leurs substrats afin de réduire le stress de transplantation), les nouvelles pertes 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 (Gilbert et Fernandez, 2014), elle ne peut être utilisée, dans les conditions d'exposition actuelles.*

# CONCLUSION

## I.1. TRANSPLANTATION 2014

La campagne 2014 réalisée montre des réponses différentielles, en adéquation avec les pressions métalliques minières attendues, entre des systèmes ouverts (stations dites « Océanique ») et fermés (stations dites de « Baie »). Les réponses des bivalves ne sont pas nécessairement liées à des phases de bioaccumulation puisque des phases d'élimination sont souvent constatées, par exemple pour le *Cr* et *Ni*.

D'un point de vue général, les métaux miniers (*Co*, *Cr*, *Fe*, *Mn* et *Ni*) montrent une réponse plus systématique que les métaux non miniers (*As*, *Cu* et *Zn*) avec un différentiel en faveur des stations de « Baie » qui présentent un FC supérieur à celles de type « Océaniques ». Certaines stations montrent des réponses marquées et cohérentes avec les pressions existantes, comme le cas de la station du port St16P qui présentent les concentrations les plus élevés en *Cr*, *Co*, *Mn*, *Ni* et *Fe*, voire en *Zn*. A l'inverse, la station située à proximité de l'îlot Nouaré (St31), qui fait office de référence, présente les valeurs de FC les plus faibles en *Co*, *Mn*, *Ni*, *As* et *Zn*. En effet, les stations côtières, enclavées dans les baies et/ou à proximité des aires d'influence minière et portuaire (St16P) seraient plus enclins à être impactées par les apports terrigènes et activités anthropiques, elles présenteraient donc des teneurs en métaux latéritiques/anthropiques supérieures à celles qui sont distantes de la côte (St31).

Par ailleurs, pour les métaux miniers, les stations St06 et St16P semblent se comporter de la même manière. Ce comportement similaire (également observé pour les couples de stations St16 et St18, St03 et St15, St13 et St14) est en accord avec le positionnement géographique de ces stations et les influences respectives qu'elles subissent.

Cette campagne 2014 présente ainsi une réponse cohérente qui n'avait été observée que rarement depuis la mise en place du *caging* dans le périmètre de VALE. La campagne 2013 avait ainsi offert une réponse différentielle Baie/Océanique probablement du fait de conditions hydro-climatiques très particulières du mois de juillet (très forte pluviométrie). En effet, l'ordination des stations selon un gradient métallique décroissant Baie/Océanique n'était pas observé les années antérieures.

Pour les métaux miniers, l'année 2013 montre globalement des niveaux de FC plus élevés qu'en 2014. Les niveaux de FC observés sur les stations de type « Océanique » de l'année 2013 sont ainsi situés à des valeurs que l'on retrouve en 2014 sur les stations de « Baie ».

Enfin concernant les métaux non miniers, il est constaté globalement peu d'évolutions entre 2013 et 2014.

L'analyse spatiale et temporelle des facteurs biologiques et environnementaux laisse penser que cette réponse différentielle de la campagne 2014 serait induite par la durée de *caging*, nettement supérieure aux autres durées d'exposition. En effet, l'ensemble des conditions biométriques et environnementales que nous avons pu analyser ne présentent pas de différences temporelles significatives notamment avec la campagne de 2012 où aucune tendance n'avait été mis en évidence.

La prochaine campagne 2015 devra être réalisée en maintenant, à minima, une durée d'immersion similaire et devrait permettre de confirmer que ce nouveau paramétrage est bien déterminant dans la réponse différentielle observée du bioindicateur. Toutefois, compte tenu de la mortalité de quelques bivalves constatée, il est sera recommandé de d'augmenter au moins à 25, voire 30, le nombre d'individus au lieu de seulement 20.

En ce qui concerne l'algue *L. variegata*, une perte quasi totale du matériel biologique a été constatée sur toutes les stations ; cette diminution critique du nombre de frondes se révélant trop importante pour effectuer les traitements statistiques et obtenir des résultats significatifs.

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

## I.2. PERSPECTIVES

Afin de remplacer l'algue *L. variegata* comme bioindicateurs, trois espèces de mollusques ont fait l'objet d'études ([Pluchino et Fernandez, 2014](#)). Ces recherches requièrent encore un certain nombre de compléments, les organismes visés sont les bivalves :

- *Gafrarium tumidum* (autrement connue comme la grisette en Nouvelle-Calédonie) ;
- *Pinctada maculata* ou « huitre perlière » ; et
- *Modiolus auriculatus* ou modiole

En effet, parmi les espèces étudiées en Nouvelle-Calédonie, le clam *G. tumidum* montre des aptitudes intéressantes puisqu'il accumule large gamme de contaminants métalliques et présente le plus grand nombre de critères pour la sélection d'un bioindicateur. Toutefois, la principale limite reste liée à sa petite taille rendant plus difficile l'échantillonnage et les manipulations en laboratoire. Vivant enfoui dans les sédiments, sa récolte est moins aisée et sa résistance pour des transplantations dans la colonne d'eau reste à tester. Ce bioindicateur n'a jamais été utilisé dans des programmes de suivis environnementaux.

Le *P. maculata* et *M. auriculatus* quant à eux, ils ont montré des capacités de bioaccumulation sur des gammes plus ou moins étendues en fonction de l'espèce et/ou du métal, mais essentiellement en fonction des sites dont la contamination a déjà atteint un certain niveau. En effet, les différentes expériences conduites *in-situ* ont montré que

sur des sites faiblement contaminées par rapport à leur site de résidence, l'accumulation restait difficile à observer (de même pour *G. tumidum* et *I. isognomon*).

Les limites, propres à chacun d'eux, étant principalement :

- Pour *I. isognomon* ; son utilisation régulière pour les suivis du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie, entraînant une diminution des foyers sur le site de référence (Baie Maa) et de certaines cohortes. L'approvisionnement de cette espèce dans le futur peut constituer un facteur limitant. Cette diminution des effectifs ajoutée à sa forme coquillière très particulière (indépendante de son âge) rend plus difficile les caractérisations biométriques et par conséquent la sélection d'organismes homogènes ;
- La modiole, de par sa faible abondance supposée, et sa récolte assez fastidieuse ne permet pas à ce stade d'envisager des suivis à grande échelle, en Nouvelle-Calédonie. De plus, la méthode de transplantation semble limitée par la prédation, responsable d'une grande mortalité, tant que des expérimentations complémentaires, notamment en saison fraîche n'auront été conduites.
- Les premiers essais réalisés sur l'huître perlière *P. maculata* ont montré que l'interprétation des résultats de contamination chimique devait impérativement tenir compte de leur taux de croissance. Sa capacité à accumuler une large gamme de contaminants n'a pas été vérifiée et nécessite également d'autres expériences de confirmation pour certains d'entre eux. En revanche, elle présente les plus grands avantages en termes de récoltes (facilement identifiable et largement distribuée dans le lagon, de la côte au récif), de manipulation en laboratoire (résistante, grande taille qui facilite les manipulations et les analyses), et sa transplantation est aisée (caractérisation biométrique facile, très faible mortalité).

Le Tableau 13 montre qu'aucune des espèces ne présente 100% des critères attendus, d'où la pertinence de sélectionner plusieurs indicateurs répondant aux différentes contraintes des suivis environnementaux.

Tableau 13 : Synthèse des avantages et limites des bivalves identifiés comme bioindicateurs de la contamination métallique du lagon de Nouvelle-Calédonie

Espèce	Abondance	Echantillonnage simple	Protocole analytique simple	Transplantation simple	Capacités de bioaccumulation	Adaptabilité en colonne d'eau
<i>Isognomon isognomon</i>	***	***	**	***	***	***
<i>Gafrarium tumidum</i>	****	**	**	***	****	?
<i>Pinctada maculata</i>	****	****	****	****	**	***
<i>Modiolus auriculatus</i>	*	**	***	**	***	*

D'après ce tableau, le clam *G. tumidum* (à condition de tester son adaptabilité en colonne d'eau à mi-profondeur) et l'huître *P. maculata* présenterait deux potentiels organismes bioindicateurs à étudier afin de remplacer l'algue *L. variegata* de ce suivi.

## REFERENCE

AFNOR NF V45056, 1985 AFNOR, 1985. Nonne française huîtres creuses. Dénomination et classification. NF V 45056,5p.

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 J.M., 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<sup>ème</sup> 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.*

Clarke K.R., Warwick R.M., 1994. Similarity-based testing for community pattern: the 2-way layout with no replication. *Marine Biology*, 118, 167-176.

Derex P., Douillet P., Le Gendre R., 2008. Modélisation et transport du transport des formes dissoutes. Modèle de Transport, Simulation annuelle de rejet. Convention IRD/Goro-Ni 1124, 183p.

Douillet P. et Fernandez J.M., 2009. Modélisation et simulation du transport des formes particulières d'origine naturelle (Canal de la Havannah et Kwé). Modèle de Transport. Simulation annuelle de la sédimentation des particules en contact avec l'effluent. Rapport final. Convention IRD/Goro-Ni, 1124,

Fichez R., Adjerond 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 in coral lagoon systems. *Aquatic Living Resource*, 18: 125-147.

Gilbert A., Fernandez, J.M., 2014. Synthèse des variations spatio-temporelles de l'absorption des métaux chez *Isognomon isognomon* et *Lobophora variegata*. *Soproner & Ael (2014) Synthèse des variations spatio-temporelles de l'absorption des métaux chez Isognomon isognomon et Lobophora variegata*. Rapport final. Convention Soproner/Ael/Vale. 31p.

Hédouin L., Pringault O., Métian M., Bustamante P., Warnau M., 2007. Nickel bioaccumulation in bivalves from the New Caledonia lagoon: Seawater and food exposure. *Chemosphere*, 666: 1449-1457.

Hédouin L., Bustamante P., Fichez R., Warnau M., 2008. The tropical brown alga *Lobophora variegata* as a bioindicator of mining contamination in the New Caledonia lagoon: A field transplantation study. *Marine Environmental Research* 66: 438-444.

Hédouin L., Bustamante P., Churlaud C., Pringault O., Fichez R., Warnau M., 2009. Trends in concentrations of selected metalloid and metals in two bivalves from the coral reefs in the SW lagoon of New Caledonia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72: 372-381.

Hédouin L., Gomez Batista M., Métian M., Buschaizzo E., Warnau M., 2010. Metal and metalloid bioconcentration capacity of two tropical bivalves for monitoring the impact of land-based mining activities in the New Caledonia lagoon. *Marine Pollution Bulletin* 61: 554-567.

Hédouin L., Pringault O., Bustamante P., Fichez R., Warnau M., 2011. Validation of of two tropical marine bivalves as bioindicators of mining contamination in the New Caledonia lagoon: Field transplantation experiments. *Water Research* 45: 483-496.

Pluchino S., Fernandez J.M., 2014. Caractérisation de la pression par transplantation in-situ du bivalve bioaccumulateur *Modiolus auriculatus*. Programme ADIIP, CNRT « Le nickel et son environnement (2009) », 37p

# LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES DIX STATIONS DE SUIVI ECOTOXICOLOGIQUE DU MILIEU MARIN PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIO-ACCUMULATRICES. ....	12
FIGURE 2 : DUREE DE CAGING DE 2009 A 2014 EN JOURS. ....	24
FIGURE 3 : TEMPERATURE (°C ; A), FLUORESCENCE (MG/M <sup>3</sup> ; B), TURBIDITE (NTU ; C), SALINITE (PSU ; D) ET OXYGENE (% DE SATURATION ; E), PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE. LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES $\pm$ L'INTERVALLE DE CONFIANCE POUR LA COUCHE D'EAU DE MI-PROFONDEUR (8-10M). ....	25
FIGURE 4 : TEMPERATURE (°C ; A), FLUORESCENCE (MG/M <sup>3</sup> ; B), TURBIDITE (NTU ; C), SALINITE (PSU ; D) ET OXYGENE (% DE SATURATION ; E) PAR STATIONS. LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES $\pm$ L'INTERVALLE DE CONFIANCE POUR LA COUCHE D'EAU DE MI-PROFONDEUR (8-10M). ....	26
FIGURE 5 : CONCENTRATIONS MOYENNES MODIFIEES ( $\mu$ G/L) A MI-PROFONDEUR PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE ET PAR ANNEE EN Co, Cu, Zn, Fe, Mn ET Ni. LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES $\pm$ L'INTERVALLE DE CONFIANCE. ....	27
FIGURE 6 : PLUVIOMETRIE (CUMULATIVE JOURNALIERE) MESUREE EN CONTINUE A LA STATION METEOROLOGIQUE DE VALE-NC (GORO USINE) PENDANT TOUTE LA DUREE DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2014 (155 JOURS D'IMMERSION). ....	29
FIGURE 7 : CUMUL JOURNALIER (MM) DE PLUIE A LA STATION METEOROLOGIQUE DE PORT BOISE (GORO USINE) POUR LES CAMPAGNES DE CAGING DEPUIS 2011. ....	29
FIGURE 8 : MOYENNE DES CUMULS JOURNALIERS DE PLUIE POUR LA STATION METEOROLOGIQUE DE PORT BOISE (GORO USINE) DE 2011 A 2014 AVEC LEURS ECART-TYPES POUR LES PERIODES RESPECTIVES D'IMMERSION DES CAGES. ....	30
FIGURE 9 : EVOLUTION DE LA VITESSE ET DE LA DIRECTION DES VENTS (MOYENNE JOURNALIERE) MESUREE EN CONTINU A LA STATION METEOROLOGIQUE DE VALE-NC (USINE GORO) PENDANT TOUTE LA DUREE DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2014 (155 JOURS D'IMMERSION). ....	30
FIGURE 10 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU DE MER PENDANT LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2014. LES DONNEES ONT ETE RECUEILLIES AUX STATIONS St03, St14, St15 ET St16 TOUTES LES 6 HEURES, ENTRE LE 30 AVRIL 2014 ET LE 01 OCTOBRE 2014, SOIT DURANT LES 155 JOURS DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION PAR DES CAPTEURS MINIATURISES. (●) = REVELES JOURNALIERS A UNE FREQUENCE DE 6 HEURES. ....	33
FIGURE 11 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU DE MER PENDANT LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2014. LES DONNEES ONT ETE RECUEILLIES AUX STATIONS St06, St07, St13 ET St18 TOUTES LES 6 HEURES, ENTRE LE 30 AVRIL 2014 ET LE 01 OCTOBRE 2014, SOIT DURANT LES 155 JOURS DE LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION PAR DES CAPTEURS MINIATURISES. (●) = REVELES JOURNALIERS A UNE FREQUENCE DE 6 HEURES. ....	34
FIGURE 12 : COMPARAISON DES PROFILS DE TEMPERATURES MOYENNES JOURNALIERES DE L'EAU DE MER AU NIVEAU DES STATIONS DITES (A) « OCEANIQUE » ET (B) « BAIE » AVEC LA PLUVIOMETRIE POUR LA LA CAMPAGNE DE TRANSPLANTATION 2014. ....	35
FIGURE 13 : DONNEES DE POIDS FRAIS (G ; A ET C) ET DE LONGUEUR (MM ; B ET D) INITIALE (FONCE) ET FINALE (CLAIRE) PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE ET PAR STATIONS (OCEANIQUES EN BLEU ET BAIE EN ROUGE) DE LA CAMPAGNE TRANSPLANTATION 2014. LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES $\pm$ L'ECART-TYPE. ....	37
FIGURE 14 : L'INDICE DE CONDITION PHYSIOLOGIQUE IC (%) PAR LES STATIONS OCEANIQUES (BLEU) ET DE BAIE (ROUGE) (A) DE LA CAMPAGNE TRANSPLANTATION 2014 AINSI QUE PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE POUR LES ANNEES DE 2012, 2013 ET 2014 (B). LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES $\pm$ L'ECART-TYPE. ....	37
FIGURE 15 : CROISSANCE RELATIVE EN LONGUEUR (MM/j) ET EN POIDS (G/j) PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE (A) ET PAR STATION (OCEANIQUE EN BLEU ET DE BAIE EN ROUGE ; B ET C). LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES $\pm$ L'ECART-TYPE. ....	38

FIGURE 16 : EVOLUTION ENTRE 2012 ET 2014 PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE DES DONNEES BIOMETRIQUES ET DE CROISSANCE. POIDS FRAIS (G) INITIAL (A) ET FINAL (B) ; LONGUEUR (MM) INITIALE (C) ET FINALE (D) ; TAUX DE CROISSANCE JOURNALIERE (TCJ ; %) EN LONGUEUR (E) ET EN POIDS (F) ; CROISSANCE RELATIVE (CR) EN POIDS (G/J ; G) ET EN LONGUEUR (MM/J ; H).....	39
FIGURE 17 : ILLUSTRATION LA REPONSE DE LA BIOACCUMULATION DU CORTEGE METALLIQUE D'ORIGINE MINIERE (Cr, Co, Fe, Ni ET Mn) PAR STATION PAR UNE ANALYSE DE TYPE MDS (A) ET PAR CAH (B).....	40
FIGURE 18 : ILLUSTRATION LA REPONSE DE LA BIOACCUMULATION DU CORTEGE METALLIQUE NON MINIERES (As, Zn ET Cu) PAR STATION PAR UNE ANALYSE DE TYPE MDS (A) ET PAR CAH (B).....	41
FIGURE 19 : FACTEUR DE CONCENTRATION POUR LES METAUX MINIERES (Co, Cr, Fe, Mn ET Ni) ET PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE POUR LA CAMPAGNE TRANSPLANTATION DE 2014. LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES $\pm$ L'INTERVALLE DE CONFIANCE. ....	43
FIGURE 20 : FACTEUR DE CONCENTRATION POUR LES METAUX NON MINIERES (As, Cu ET Zn) ET PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE POUR LA CAMPAGNE TRANSPLANTATION DE 2014. LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES $\pm$ L'INTERVALLE DE CONFIANCE. ....	44
FIGURE 21 : FACTEUR DE CONCENTRATION POUR LES METAUX MINIERES ET PAR STATION POUR LA CAMPAGNE TRANSPLANTATION DE 2014. LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES $\pm$ L'INTERVALLE DE CONFIANCE.....	46
FIGURE 22 : FACTEUR DE CONCENTRATION POUR LES METAUX NON MINIERES ET PAR STATION POUR LA CAMPAGNE TRANSPLANTATION DE 2014. LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES $\pm$ L'INTERVALLE DE CONFIANCE.....	47
FIGURE 23 : ILLUSTRATION DE LA REPARTITION DU FC PAR STATION POUR LES METAUX MINIERES (Co, Cr, Fe, Mn ET Ni) DE 2010 A 2014 A TRAVERS UNE ANALYSE MDS AVEC UN CODE COULEUR SUIVANT LES ANNEES (A) ET SUIVANT LES ANNEES ET LA TYPOLOGIE (B).....	48
FIGURE 24 : ILLUSTRATION DE LA REPARTITION DU FC PAR STATION POUR LES METAUX MINIERES (A ; Co, Cr, Fe, Mn ET Ni) ET NON MINIERES (B ; As, Cu ET Zn) EN 2013 ET 2014 A TRAVERS UNE ANALYSE MDS AVEC UN CODE COULEUR SUIVANT LES ANNEES ET LA TYPOLOGIE. ....	49
FIGURE 25 : EVOLUTION TEMPORELLE DU FACTEUR DE CONCENTRATION PAR ANNEE ET PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE POUR LES METAUX MINIERES (Co, Cr, Fe, Mn ET Ni). ....	50
FIGURE 26 : EVOLUTION TEMPORELLE DU FACTEUR DE CONCENTRATION PAR ANNEE ET PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE POUR LES METAUX NON MINIERES (As, Cu ET Zn).....	51

# LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : DESCRIPTION DES DIX STATIONS DE SUIVI ECOTOXICOLOGIQUE PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIO-ACCUMULATRICES.....	11
TABLEAU 2 : TYPOLOGIE SIMPLIFIEE DES STATIONS.....	12
TABLEAU 3 : LIMITE DE QUANTIFICATION DE LA METHODE DE DOSAGE DES METAUX DANS LES TISSUS BIOLOGIQUE PAR ICP-OES. ....	15
TABLEAU 4 : RESULTATS DES MESURES DES METAUX DANS 0,5 G DE MATERIEL BIOLOGIQUE DE REFERENCE CERTIFIE MINERALISE ET ANALYSE DANS LE CADRE DE LA CAMPAGNE TRANSPLANTATION DE 2014.....	16
TABLEAU 5 : COMPARAISON INTER LABORATOIRE DES RESULTATS D'ANALYSE DES METAUX POUR LA CAMPAGNE TRANSPLANTATION DE 2014 PAR ICP-MS (UT2A) ET ICP-OES (AEL).....	17
TABLEAU 6 : ECARTS MOYENNES (%) DE LA MESURE POUR CHAQUE ELEMENT ANALYSE DE L'EXERCICE INTER LABORATOIRE, TOUTES STATIONS CONFONDUES. ....	17
TABLEAU 7 : CONCENTRATION ET ECART MOYEN POUR LA CAMPAGNE TRANSPLANTATION 2014 ET PRECISION MOYENNE GLOBALE (%) DE LA MESURE EN TRIPLICATAS POUR CHAQUE ELEMENT ANALYSE, TOUTES STATIONS CONFONDUES.....	17
TABLEAU 8 : PRECISION DES MESURES EN TRIPLICATAS DES METAUX POUR LA CAMPAGNE TRANSPLANTATION DE 2014. ....	18
TABLEAU 9 : RESULTATS DU TEST DE TUKEY ENTRE LES DIFFERENTES MODALITES DES FACTEURS POUR <i>ISOGNOMON ISOGNOMON</i> . * = EFFET SIGNIFICATIF ; ** = EFFET HAUTEMENT SIGNIFICATIF ; *** = EFFET TRES HAUTEMENT SIGNIFICATIF ; NS = EFFET NON SIGNIFICATIF ; T0 = LOT INITIAL (BAIE MAA). EXTRAITS DU RAPPORT GILBERT ET FERNANDEZ (2014). ....	22
TABLEAU 10 : LA PLUVIOMETRIE JOURNALIERE CUMULEE ET MOYENNE GLOBALE DES DIFFERENTES CAMPAGNES DE CAGING DEPUIS 2011 ET LE NOMBRE DE JOUR D'IMMERSIONS. ....	29
TABLEAU 11 : LES MOYENNES, ECART-TYPES, MINIMALES ET MAXIMALES DE TEMPERATURE DE L'EAU DE MER PAR STATION (N=620). LES DONNEES ONT ETE RECUEILLIES A CHAQUE STATION PAR UN CAPTEUR MINIATURISE A LA FREQUENCE DE 6 HEURES PAR JOUR, SOIT 4 RELEVES JOURNALIERS.....	32
TABLEAU 12 : SYNTHESE DE LA SIGNIFICATIVITE DE L'EFFET TYPOLOGIQUE (ANOVA) ET DES ANALYSES PAREES A POSTERIORI (TUKEY) AU SEUIL A DE 5%. * = EFFET SIGNIFICATIF ET NS = EFFET NON SIGNIFICATIF ; T0 = LOT INITIAL (BAIE MAA). ....	42
TABLEAU 13 : SYNTHESE DES AVANTAGES ET LIMITES DES BIVALVES IDENTIFIES COMME BIOINDICATEURS DE LA CONTAMINATION METALLIQUE DU LAGON DE NOUVELLE-CALEDONIE .....	55

# 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 : Profils de CTD

## ANNEXE 1

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

Station	St 03	St 06	St 07	St 13	St 14	St 15	St 16	St 16P	St 18	St 31	lot initial
N° individus	Poids frais total (g)										
1	19,41	21,20	26,51	26,90	25,22	15,86	23,28	25,11	10,23	16,02	13,21
2	11,9	7,89	24,62	24,65	25,78	24,93	15,63	26,83	26,7	22,28	21,66
3	22,22	23,46	17,89	15,89	17,76	10,51	16,49	8,1	19,23	6,85	21,85
4	12,74	24,99	19,51	26,08	10,49	16,16	13,72	16,57	17,01	16,98	21,28
5	14,46	11,94	24,52	22,59	17,85	19,84	16,84	22,42	19,07	15,07	21,58
6	23,16	21,74	19,13	11,44	22,57	19,37	13,83	17,12	16,75	18,25	23,40
7	11,55	23,42	13,74	25,78	12,51	16,72	10,88	24,22	15,34	23,30	10,79
8	13,52	11,86	19,58	23,03	11,38	9,64	9,75	14,12	12,76	22,07	24,95
9	15,39	17,11	21,02	13,29	21,31	13,17	13,63	17,91	18,41	16,29	10,13
10	26,96	10,08	10,57	9,84	21,53	12,97	24,54	9,45	9,51	22,48	13,55
11	14,23	14,66	13,59	20,02	9,62	24,46	9,33	13,09	26,05	21,05	11,00
12	13,45	21,11	10,44	13,56	25,07	16,50	22,20	15,04	16,22	16,47	13,53
13	16,44	24,43	15,41	8,39	14,15	24,56	16,63	8,44	24,93	20,16	21,13
14	16,61	19,68	16,25	22,46	16,99	22,25	20,62	7,74	18,78	15,07	15,57
15	14,13	23,42	11,44	11,51	24,18	13,32	18,80	8,54	24,58	22,96	23,70
16	12,61	20,96	11,86	13,30	11,35	23,69	15,46	21,07	24,84	20,07	18,87
17	21,04	19,77	11,07	9,97	24,7	21,37	23,56	15,43	14,43	20,05	13,68
18	18,98	8,01	21,5	13,22	12,88	15,32	10,14	19,65	12,32	6,91	8,91
19	20,43	8,87	21,97	10,91	7,86	15,20	23,33	26,66	10,16	8,15	27,11
20	25,91	6,86	8,49	18,60	6,90	7,25	23,48	27,16	7,2	7,23	7,66
Moyenne (g)	17,26	17,07	16,96	17,07	17,01	17,15	17,11	17,23	17,23	16,89	17,18
Ecart-type	4,7	6,4	5,4	6,3	6,4	5,3	5,1	6,7	5,9	5,6	6,0

Station	St 03	St 06	St 07	St 13	St 14	St 15	St 16	St 16P	St 18	St 31	lot initial
N° individus	Longueur max de coquille (mm)										
1	70,30	74,22	79,41	82,10	95,55	78,28	65,76	94,84	74,78	65,78	72,65
2	69,08	57,89	74,99	98,44	88,98	97,05	53,93	93,73	88,7	93,62	84,05
3	82,07	94,13	85,34	82,81	75,8	75,50	71,69	53,9	96,16	54,69	85,86
4	81,88	70,95	77,37	81,75	65,57	81,15	75,19	61,02	66,05	86,18	83,40
5	70,71	66,56	101,81	97,78	75,81	78,65	85,90	86,16	77,26	82,31	82,27
6	86,23	84,25	81,79	60,58	76,74	87,41	62,63	73,83	72,93	101,10	86,68
7	61,09	90,64	82,81	89,23	66,52	89,38	72,04	88,2	80,9	80,26	62,28
8	75,22	68,44	80,73	93,19	64,66	69,62	62,50	104,51	49,07	82,50	87,96
9	90,24	70,52	75,87	67,59	83,09	67,91	56,37	74,73	70,55	88,42	68,92
10	90,53	78,69	64,25	61,27	79,98	77,89	69,64	56,51	62,32	72,72	64,81
11	75,15	83,08	75,76	87,28	68,45	86,15	63,32	74,39	79,22	90,39	62,71
12	74,00	81,25	54,65	65,20	87,77	66,79	79,80	79,37	72,04	76,93	78,76
13	93,61	86,75	68,12	68,00	77,49	92,54	86,57	49,28	110,26	70,58	85,53
14	79,08	69,85	89,3	89,79	73,27	87,05	76,99	66,07	82,01	69,77	97,03
15	78,16	74,42	73,81	62,83	99,94	73,02	88,46	60,55	100,45	89,68	74,56
16	75,92	78,01	77,52	60,95	73,13	97,97	74,80	86,12	96,88	80,85	78,44
17	83,57	81,80	69,82	65,33	87,3	87,00	84,46	77,76	96,68	96,73	73,56
18	73,28	54,40	98,14	60,24	76,67	72,64	70,04	77,12	70,92	59,94	53,80
19	66,54	60,53	83,11	60,65	71,51	88,38	86,81	100,78	57,3	56,13	106,12
20	90,68	47,91	61,50	74,76	59,28	58,08	84,90	88,09	64,33	62,89	55,57
Moyenne (g)	78,37	73,71	77,81	75,49	77,38	80,62	73,59	77,35	78,44	78,07	77,25
Ecart-type	8,91	12,17	11,32	13,73	10,57	10,65	10,62	15,78	15,79	13,62	13,39

## ANNEXE 2

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

Station	St 03	St 06	St 07	St 13	St 14	St 15	St 16	St 16P	St 18	St 31	lot initial
N° individus	Poids frais total (g)										
1	17,67	24,43	23,01	23,81	26,98	26,60	17,26	26,16	19,39	24,46	13,21
2	29,16	22,37	25,95	25,76	27,38	19,91	21,07	14,36	13,93	10,82	21,66
3	20,25	14,21	22,54	19,83	14,32	14,91	25,67	26,06	25,96	22,96	21,85
4	29,78	26,36	15,19	29,19	19,70	23,91	20,02	24,74	19,91	13,44	21,28
5	18,65	10,99	18,14	24,65	10,85	14,24	15,72	9,82	21,36	25,48	21,58
6	26,04	14,12	13,76	12,72	29,69	9,24	25,16	28,76	14,98	24,70	23,40
7	21,06	9,98	13,54	14,93	12,36	19,62	15,39	15,25	28,06	30,42	10,79
8	22,17	17,45	24,00	12,88	23,19	16,08	14,32	10,42	12,82	28,66	24,95
9	16,62	21,43	31,52	27,76	13,31	25,69	18,79	17,81	18,70	18,23	10,13
10	15,99	22,13	17,30	28,42	22,49	12,98	16,64	23,12	29,19	21,41	13,55
11	17,93	25,95	15,50	14,89	18,74	18,52	21,38	17,77	19,08	18,49	11,00
12	12,84	9,39	16,81	13,62	20,14	25,84	14,81	21,45	13,86	12,53	13,53
13	24,13	11,07	28,00	13,99	13,89	17,81	21,35	10,74	15,91	21,71	21,13
14	17,84	27,48	25,11	24,18	16,28	25,46	12,51	10,58	26,27	26,21	15,57
15	15,61	24,60	21,92	14,91	9,89	19,51	26,47	17,90	26,69	26,16	23,70
16	16,77	18,02	29,00	27,26	26,24	23,24	22,33	17,24	20,84	27,00	18,87
17	22,74	8,35	17,82	11,55	14,94	18,33	Mort	10,09	16,99	18,25	13,68
18	16,82	21,39	15,73	30,58	15,52	13,28	Mort	17,69	21,51	25,84	8,91
19	24,77	21,54	Mort	16,85	Mort	20,97	Mort	28,26	10,91	22,27	27,11
20	18,37	Mort	Mort	15,81	Mort	24,42	Mort	27,93	19,71	11,65	7,66
Moyenne (g)	<b>20,26</b>	<b>18,49</b>	<b>20,82</b>	<b>20,18</b>	<b>18,66</b>	<b>19,53</b>	<b>19,31</b>	<b>18,81</b>	<b>19,80</b>	<b>21,53</b>	<b>17,18</b>
Ecart-type	<b>4,62</b>	<b>6,38</b>	<b>5,58</b>	<b>6,58</b>	<b>6,14</b>	<b>5,01</b>	<b>4,31</b>	<b>6,64</b>	<b>5,31</b>	<b>5,84</b>	<b>6,0</b>

Station	St 03	St 06	St 07	St 13	St 14	St 15	St 16	St 16P	St 18	St 31	lot initial
N° individus	Longueur max de coquille (mm)										
1	84,37	82,49	88,75	86,66	82,55	101,98	79,85	101,48	91,05	90,26	72,65
2	97,18	81,40	104,38	93,75	90,11	91,91	96,88	102,28	72,37	54,90	84,05
3	92,38	75,39	92,37	77,66	79,89	88,41	89,08	99,63	104,43	101,18	85,86
4	97,64	100,96	79,06	90,41	80,91	88,41	94,46	90,62	93,04	82,45	83,40
5	88,22	70,91	88,10	99,75	77,10	77,29	80,82	68,09	84,12	95,26	82,27
6	98,68	82,79	69,62	78,54	99,77	67,93	90,75	90,50	77,82	98,46	86,68
7	100,36	74,50	73,50	63,42	72,03	96,78	71,06	86,01	89,67	74,54	62,28
8	89,58	84,31	78,72	72,64	91,99	69,62	82,74	77,17	68,15	88,85	87,96
9	80,92	74,83	98,36	90,36	79,29	92,48	83,18	79,95	77,04	85,86	68,92
10	87,00	83,24	81,56	88,40	91,27	72,26	81,94	87,68	100,28	92,06	64,81
11	69,37	99,88	90,36	64,70	71,71	92,23	83,07	69,93	88,57	84,70	62,71
12	67,23	74,56	85,42	80,46	84,61	100,08	84,77	77,45	84,81	73,14	78,76
13	85,45	78,44	109,26	61,42	71,09	77,67	82,92	60,92	89,37	87,53	85,53
14	86,42	84,90	99,64	93,46	76,71	102,88	80,77	71,22	100,39	84,89	97,03
15	88,48	90,08	96,68	65,30	63,39	82,81	91,88	87,27	101,68	76,95	74,56
16	89,48	73,70	80,74	96,26	92,18	93,36	81,84	83,10	84,55	93,88	78,44
17	82,49	64,45	84,19	66,26	76,34	90,98	Mort	60,97	103,03	77,05	73,56
18	98,45	90,85	88,72	110,63	75,02	73,75	Mort	69,99	93,18	82,84	53,80
19	93,96	80,32	Mort	74,94	Mort	90,30	Mort	109,27	86,43	88,01	106,12
20	86,86	Mort	Mort	71,39	Mort	99,86	Mort	98,88	90,90	70,16	55,57
Moyenne (g)	<b>88,23</b>	<b>81,47</b>	<b>88,30</b>	<b>81,32</b>	<b>80,89</b>	<b>87,55</b>	<b>84,75</b>	<b>83,62</b>	<b>89,04</b>	<b>84,15</b>	<b>77,25</b>
Ecart-type	<b>8,87</b>	<b>9,30</b>	<b>10,55</b>	<b>13,92</b>	<b>9,31</b>	<b>11,03</b>	<b>6,42</b>	<b>14,21</b>	<b>10,11</b>	<b>10,85</b>	<b>13,39</b>

Station	St 03	St 06	St 07	St 13	St 14	St 15	St 16	St 16P	St 18	St 31	lot initial
N° individus	Poids frais de chair sans byssus (g)										
1	2,63	2,05	2,40	3,04	2,89	3,14	2,65	3,00	2,02	3,18	1,24
2	2,78	3,19	2,93	2,50	2,47	2,37	2,40	0,94	1,56	1,27	1,44
3	2,19	1,72	2,21	2,27	1,68	1,95	4,03	2,65	2,38	3,22	1,50
4	3,16	2,63	2,50	3,11	2,36	2,54	1,94	2,67	1,71	1,54	0,99
5	2,75	1,13	2,31	3,21	1,29	2,06	2,57	1,23	2,35	3,00	1,93
6	2,88	1,38	1,98	1,74	2,77	0,92	2,67	3,19	1,61	2,75	2,00
7	2,48	0,77	1,71	1,60	0,97	2,11	2,07	1,52	2,79	2,32	1,15
8	2,23	1,50	2,83	1,87	2,64	1,64	1,83	1,05	1,26	3,69	1,26
9	1,60	2,65	3,65	3,33	1,55	2,46	2,72	2,09	2,32	1,90	1,17
10	2,03	1,99	1,81	3,60	2,32	1,46	2,50	1,90	3,01	2,07	2,56
11	1,17	2,28	1,71	2,35	1,79	2,24	2,32	1,62	2,11	2,17	1,77
12	1,39	1,00	1,98	2,26	2,33	3,36	2,17	2,32	1,58	1,59	2,76
13	2,70	1,30	3,21	1,92	1,38	1,86	3,16	1,30	1,72	2,78	1,32
14	2,14	2,23	2,81	2,79	2,00	2,37	1,72	1,54	3,20	2,85	1,11
15	1,76	2,29	2,75	1,86	1,10	2,11	2,59	2,31	2,48	3,14	2,22
16	2,14	2,17	3,38	3,01	2,42	2,56	3,00	1,95	2,44	3,21	1,25
17	1,89	0,90	2,34	1,43	1,93	2,65	Mort	1,17	1,82	2,15	2,60
18	2,20	2,36	1,71	4,17	1,57	1,37	Mort	1,74	3,05	3,15	1,52
19	2,80	2,48	Mort	1,37	Mort	2,54	Mort	2,82	1,26	2,59	
20	2,53	Mort	Mort	2,06	Mort	3,11	Mort	2,78	2,22	1,05	
<b>Moyenne (g)</b>	<b>2,27</b>	<b>1,90</b>	<b>2,46</b>	<b>2,47</b>	<b>1,97</b>	<b>2,24</b>	<b>2,52</b>	<b>1,99</b>	<b>2,14</b>	<b>2,48</b>	1,66
<b>Ecart-type</b>	<b>0,53</b>	<b>0,68</b>	<b>0,60</b>	<b>0,78</b>	<b>0,59</b>	<b>0,61</b>	<b>0,57</b>	<b>0,70</b>	<b>0,58</b>	<b>0,74</b>	0,56

## ANNEXE 3

Concentrations en métaux chez les bivalves *Isognomon isognomon*  
( $\mu\text{g/g}$  de poids sec)

Pool	Lot initial							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	42,61	0,42	1,50	7,11	205,4	25,43	2,46	1014
2	46,13	0,41	1,47	6,10	215,3	19,68	3,73	937
3	48,79	0,39	1,07	5,40	198,5	13,49	3,95	960
4	46,78	0,32	1,11	5,26	186,8	13,16	2,24	989
5	48,51	0,43	1,39	5,45	250,8	17,66	3,02	1208
<b>Médiane</b>	<b>46,78</b>	<b>0,41</b>	<b>1,39</b>	<b>5,45</b>	<b>205,4</b>	<b>17,66</b>	<b>3,02</b>	<b>989</b>
<b>Moyenne</b>	<b>46,57</b>	<b>0,39</b>	<b>1,31</b>	<b>5,86</b>	<b>211,4</b>	<b>17,88</b>	<b>3,08</b>	<b>1021</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>2,48</b>	<b>0,04</b>	<b>0,20</b>	<b>0,77</b>	<b>24,4</b>	<b>5,04</b>	<b>0,75</b>	<b>108</b>
<b>Intervalle de confiance</b>	<b>2,17</b>	<b>0,04</b>	<b>0,18</b>	<b>0,67</b>	<b>21,4</b>	<b>4,42</b>	<b>0,66</b>	<b>95</b>

Pool	St03							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	52,43	0,43	3,03	5,80	199,4	15,22	2,89	870
2	55,10	0,42	1,78	5,74	140,1	19,13	2,15	805
3	73,67	0,50	2,17	5,52	199,9	19,29	2,30	870
4	62,14	0,41	0,33	6,74	10,6	17,21	2,04	803
5	59,24	0,44	1,72	6,79	160,9	16,71	1,90	986
<b>Médiane</b>	<b>59,24</b>	<b>0,43</b>	<b>1,78</b>	<b>5,80</b>	<b>160,9</b>	<b>17,21</b>	<b>2,15</b>	<b>870</b>
<b>Moyenne</b>	<b>60,52</b>	<b>0,44</b>	<b>1,81</b>	<b>6,12</b>	<b>142,2</b>	<b>17,51</b>	<b>2,26</b>	<b>867</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>8,25</b>	<b>0,03</b>	<b>0,98</b>	<b>0,60</b>	<b>77,9</b>	<b>1,72</b>	<b>0,38</b>	<b>74</b>
<b>Intervalle de confiance</b>	<b>7,23</b>	<b>0,03</b>	<b>0,86</b>	<b>0,53</b>	<b>68,3</b>	<b>1,50</b>	<b>0,34</b>	<b>65</b>

Pool	St06							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	40,44	0,37	2,13	7,71	188,2	28,91	2,00	1003
2	57,22	0,45	1,93	5,81	165,5	16,97	2,34	929
3	58,31	0,45	2,35	5,96	188,1	15,93	2,37	1199
4	56,69	0,55	3,62	4,94	263,3	14,70	3,57	1111
5	49,29	0,41	2,13	5,15	178,7	22,68	2,85	875
<b>Médiane</b>	<b>56,69</b>	<b>0,45</b>	<b>2,13</b>	<b>5,81</b>	<b>188,1</b>	<b>16,97</b>	<b>2,37</b>	<b>1003</b>
<b>Moyenne</b>	<b>52,39</b>	<b>0,44</b>	<b>2,43</b>	<b>5,91</b>	<b>196,8</b>	<b>19,84</b>	<b>2,63</b>	<b>1024</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>7,57</b>	<b>0,07</b>	<b>0,68</b>	<b>1,09</b>	<b>38,3</b>	<b>5,92</b>	<b>0,61</b>	<b>132</b>
<b>Intervalle de confiance</b>	<b>6,64</b>	<b>0,06</b>	<b>0,60</b>	<b>0,96</b>	<b>33,6</b>	<b>5,19</b>	<b>0,53</b>	<b>116</b>

Pool	St07							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	58,62	0,31	1,34	6,44	125,4	13,02	1,80	876
2	57,76	0,22	1,01	5,91	113,1	25,08	1,25	699
3	55,81	0,30	1,09	5,38	108,6	11,86	1,37	900
4	61,23	0,27	1,13	6,38	142,9	15,37	1,27	847
5	54,91	0,34	1,21	6,12	119,7	16,95	1,32	713
<b>Médiane</b>	<b>57,76</b>	<b>0,30</b>	<b>1,13</b>	<b>6,12</b>	<b>119,7</b>	<b>15,37</b>	<b>1,32</b>	<b>847</b>
<b>Moyenne</b>	<b>57,66</b>	<b>0,29</b>	<b>1,16</b>	<b>6,04</b>	<b>121,9</b>	<b>16,46</b>	<b>1,40</b>	<b>807</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>2,48</b>	<b>0,04</b>	<b>0,12</b>	<b>0,43</b>	<b>13,3</b>	<b>5,21</b>	<b>0,22</b>	<b>94</b>
<b>Intervalle de confiance</b>	<b>2,18</b>	<b>0,04</b>	<b>0,11</b>	<b>0,37</b>	<b>11,7</b>	<b>4,57</b>	<b>0,20</b>	<b>83</b>

Pool	St13							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	52,09	0,35	2,01	5,16	163,0	12,19	2,04	1008
2	52,36	0,26	1,43	6,73	127,9	15,04	1,60	698
3	52,32	0,29	1,53	7,89	145,1	27,48	1,54	852
4	40,51	0,37	1,48	8,43	134,8	25,34	1,59	822
5	52,44	0,36	1,71	6,28	153,7	12,75	1,91	845
<b>Médiane</b>	<b>52,32</b>	<b>0,35</b>	<b>1,53</b>	<b>6,73</b>	<b>145,1</b>	<b>15,04</b>	<b>1,60</b>	<b>845</b>
<b>Moyenne</b>	<b>49,94</b>	<b>0,33</b>	<b>1,63</b>	<b>6,90</b>	<b>144,9</b>	<b>18,56</b>	<b>1,74</b>	<b>845</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>5,28</b>	<b>0,05</b>	<b>0,24</b>	<b>1,30</b>	<b>14,1</b>	<b>7,28</b>	<b>0,22</b>	<b>110</b>
<b>Intervalle de confiance</b>	<b>4,63</b>	<b>0,04</b>	<b>0,21</b>	<b>1,14</b>	<b>12,4</b>	<b>6,38</b>	<b>0,20</b>	<b>97</b>

Pool	St14							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	60,02	0,30	1,53	5,38	164,6	17,00	1,72	1304
2	50,15	0,30	1,26	5,53	112,5	26,76	1,40	929
3	48,96	0,30	1,69	6,88	181,6	15,59	1,68	1292
4	60,75	0,28	1,25	5,19	127,8	19,52	1,47	859
5	54,92	0,28	1,40	5,03	145,6	18,60	1,54	853
<b>Médiane</b>	<b>54,92</b>	<b>0,30</b>	<b>1,40</b>	<b>5,38</b>	<b>145,6</b>	<b>18,60</b>	<b>1,54</b>	<b>929</b>
<b>Moyenne</b>	<b>54,96</b>	<b>0,29</b>	<b>1,43</b>	<b>5,60</b>	<b>146,4</b>	<b>19,49</b>	<b>1,56</b>	<b>1048</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>5,44</b>	<b>0,01</b>	<b>0,19</b>	<b>0,74</b>	<b>27,7</b>	<b>4,33</b>	<b>0,14</b>	<b>231</b>
<b>Intervalle de confiance</b>	<b>4,77</b>	<b>0,01</b>	<b>0,17</b>	<b>0,65</b>	<b>24,3</b>	<b>3,79</b>	<b>0,12</b>	<b>202</b>

Pool	St15							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	57,73	0,36	1,88	5,58	169,6	16,51	1,86	1193
2	65,57	0,35	1,62	5,34	131,4	19,55	1,64	926
3	65,83	0,41	1,61	6,53	155,2	18,08	1,93	1143
4	58,26	0,38	1,73	5,67	147,3	12,67	1,84	1046
5	63,16	0,52	2,61	7,69	195,0	25,79	2,66	1275
<b>Médiane</b>	<b>63,16</b>	<b>0,38</b>	<b>1,73</b>	<b>5,67</b>	<b>155,2</b>	<b>18,08</b>	<b>1,86</b>	<b>1143</b>
<b>Moyenne</b>	<b>62,11</b>	<b>0,41</b>	<b>1,89</b>	<b>6,16</b>	<b>159,7</b>	<b>18,52</b>	<b>1,99</b>	<b>1117</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>3,90</b>	<b>0,07</b>	<b>0,41</b>	<b>0,97</b>	<b>24,1</b>	<b>4,80</b>	<b>0,39</b>	<b>135</b>
<b>Intervalle de confiance</b>	<b>3,42</b>	<b>0,06</b>	<b>0,36</b>	<b>0,85</b>	<b>21,1</b>	<b>4,21</b>	<b>0,34</b>	<b>118</b>

Pool	St16							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	44,76	0,34	1,21	5,89	108,3	20,02	1,24	887
2	52,99	0,42	1,60	7,58	130,7	23,10	1,58	1053
3	47,24	0,37	1,35	6,29	123,2	24,32	1,44	942
4	44,03	0,40	1,92	7,20	163,9	24,14	2,52	1183
5								
<b>Médiane</b>	<b>46,00</b>	<b>0,39</b>	<b>1,48</b>	<b>6,75</b>	<b>126,9</b>	<b>23,62</b>	<b>1,51</b>	<b>997</b>
<b>Moyenne</b>	<b>47,26</b>	<b>0,38</b>	<b>1,52</b>	<b>6,74</b>	<b>131,5</b>	<b>22,89</b>	<b>1,70</b>	<b>1016</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>4,06</b>	<b>0,04</b>	<b>0,31</b>	<b>0,78</b>	<b>23,5</b>	<b>1,99</b>	<b>0,57</b>	<b>131</b>
<b>Intervalle de confiance</b>	<b>3,98</b>	<b>0,04</b>	<b>0,31</b>	<b>0,77</b>	<b>23,1</b>	<b>1,95</b>	<b>0,56</b>	<b>128</b>

Pool	St16P							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	60,06	0,64	2,95	6,73	230,0	26,80	2,99	1618
2	61,33	0,55	2,10	6,18	183,7	21,07	2,29	1352
3	66,90	0,65	3,47	6,38	234,7	14,22	3,05	1989
4	60,42	0,56	2,40	6,84	208,4	19,59	2,41	1513
5	52,61	0,53	2,95	7,48	227,8	20,34	2,74	1733
<b>Médiane</b>	<b>60,42</b>	<b>0,56</b>	<b>2,95</b>	<b>6,73</b>	<b>227,8</b>	<b>20,34</b>	<b>2,74</b>	<b>1618</b>
<b>Moyenne</b>	<b>60,26</b>	<b>0,59</b>	<b>2,78</b>	<b>6,72</b>	<b>216,9</b>	<b>20,41</b>	<b>2,69</b>	<b>1641</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>5,10</b>	<b>0,05</b>	<b>0,53</b>	<b>0,50</b>	<b>21,1</b>	<b>4,48</b>	<b>0,34</b>	<b>240</b>
<b>Intervalle de confiance</b>	<b>4,47</b>	<b>0,05</b>	<b>0,47</b>	<b>0,44</b>	<b>18,5</b>	<b>3,93</b>	<b>0,29</b>	<b>210</b>

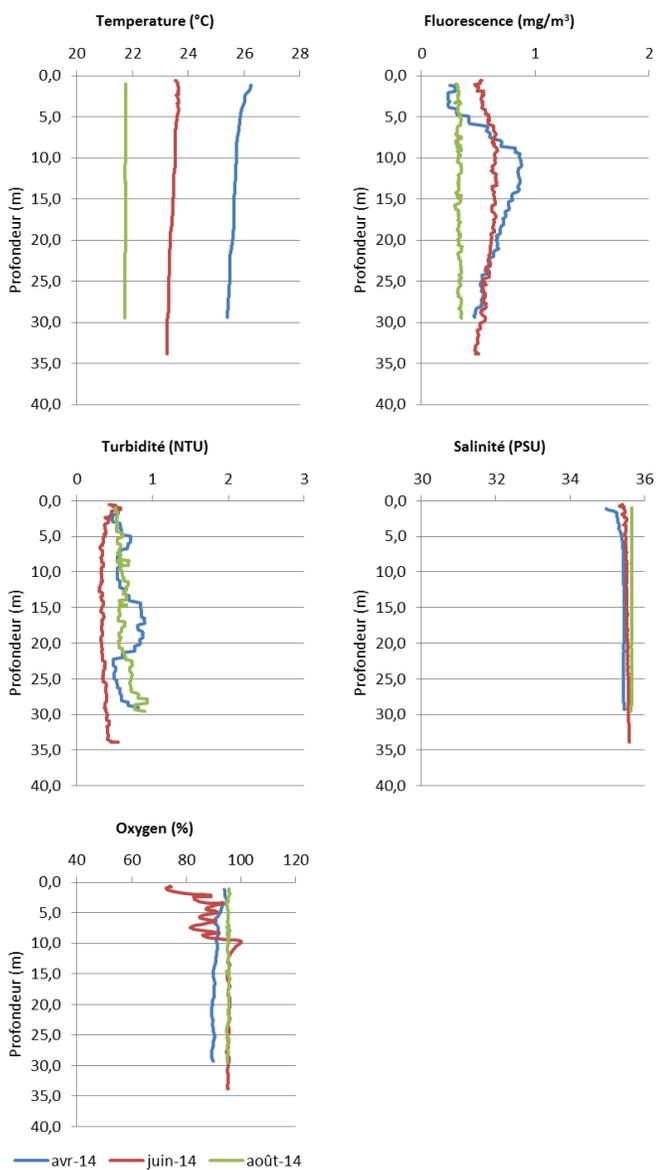
Pool	St18							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	50,38	0,47	1,83	5,91	176,1	24,73	2,24	1339
2	62,44	0,32	1,53	4,49	137,7	33,86	1,65	1181
3	61,13	0,45	1,86	6,45	169,1	28,56	2,26	1260
4	47,41	0,41	1,80	4,86	171,4	20,56	1,99	1269
5	52,76	0,32	1,71	5,70	158,6	17,76	1,92	1030
<b>Médiane</b>	<b>52,76</b>	<b>0,41</b>	<b>1,80</b>	<b>5,70</b>	<b>169,1</b>	<b>24,73</b>	<b>1,99</b>	<b>1260</b>
<b>Moyenne</b>	<b>54,83</b>	<b>0,39</b>	<b>1,75</b>	<b>5,48</b>	<b>162,6</b>	<b>25,10</b>	<b>2,01</b>	<b>1216</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>6,65</b>	<b>0,07</b>	<b>0,14</b>	<b>0,80</b>	<b>15,3</b>	<b>6,39</b>	<b>0,25</b>	<b>118</b>
<b>Intervalle de confiance</b>	<b>5,83</b>	<b>0,06</b>	<b>0,12</b>	<b>0,70</b>	<b>13,4</b>	<b>5,60</b>	<b>0,22</b>	<b>103</b>

Pool	St31							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	36,64	0,26	1,22	6,50	117,4	12,41	1,30	537
2	48,98	0,20	1,32	6,17	120,5	17,31	1,28	743
3	46,30	0,25	1,29	5,82	128,0	18,29	1,22	757
4	40,82	0,33	1,61	8,04	146,8	12,27	1,50	854
5	44,63	0,27	1,31	6,37	115,8	15,00	1,26	670
<b>Médiane</b>	<b>44,63</b>	<b>0,26</b>	<b>1,31</b>	<b>6,37</b>	<b>120,5</b>	<b>15,00</b>	<b>1,28</b>	<b>743</b>
<b>Moyenne</b>	<b>43,47</b>	<b>0,26</b>	<b>1,35</b>	<b>6,58</b>	<b>125,7</b>	<b>15,06</b>	<b>1,31</b>	<b>712</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>4,83</b>	<b>0,04</b>	<b>0,15</b>	<b>0,86</b>	<b>12,7</b>	<b>2,75</b>	<b>0,11</b>	<b>118</b>
<b>Intervalle de confiance</b>	<b>4,24</b>	<b>0,04</b>	<b>0,13</b>	<b>0,75</b>	<b>11,1</b>	<b>2,41</b>	<b>0,10</b>	<b>103</b>

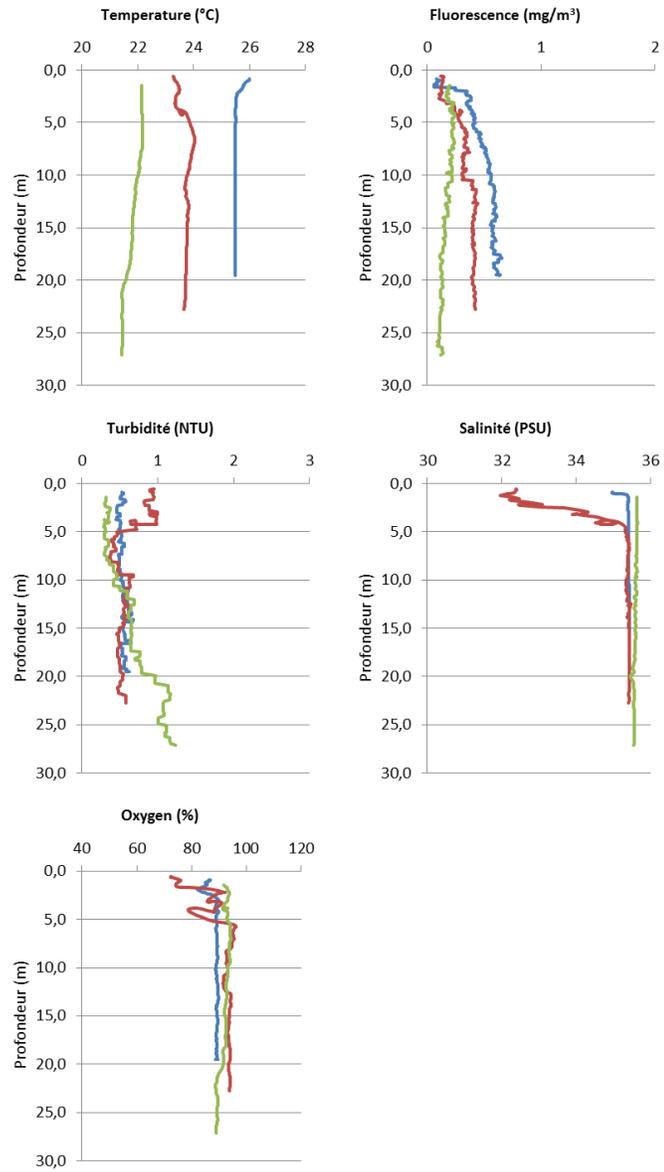
# ANNEXE 4

## Profil CTD

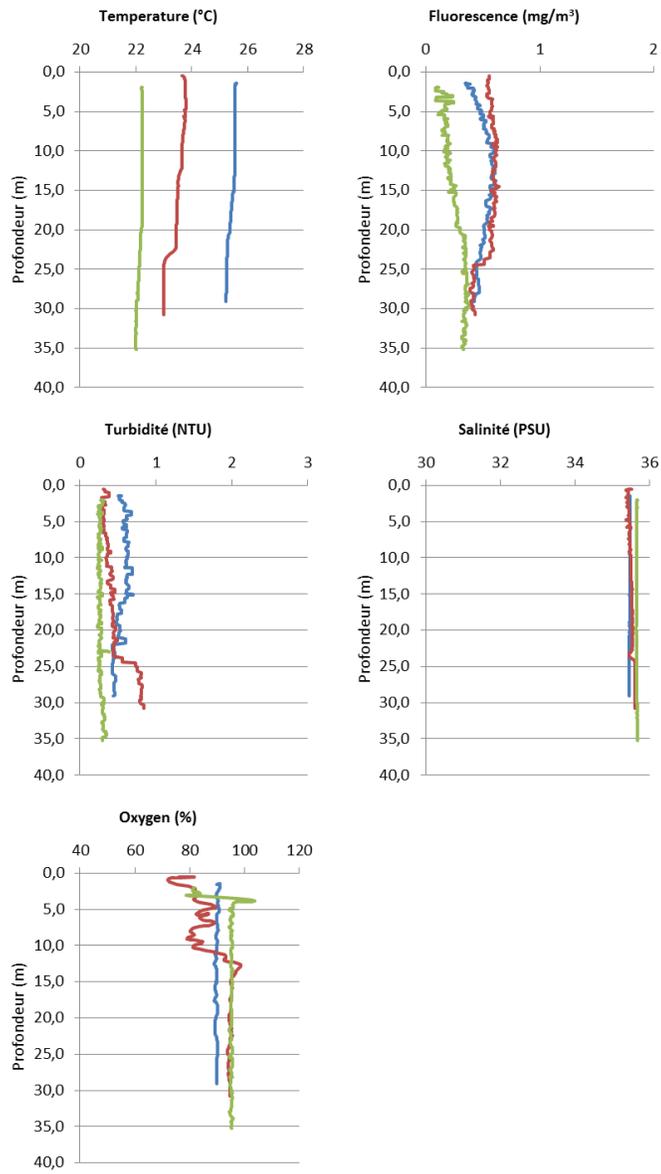
St 03 Port Boisé



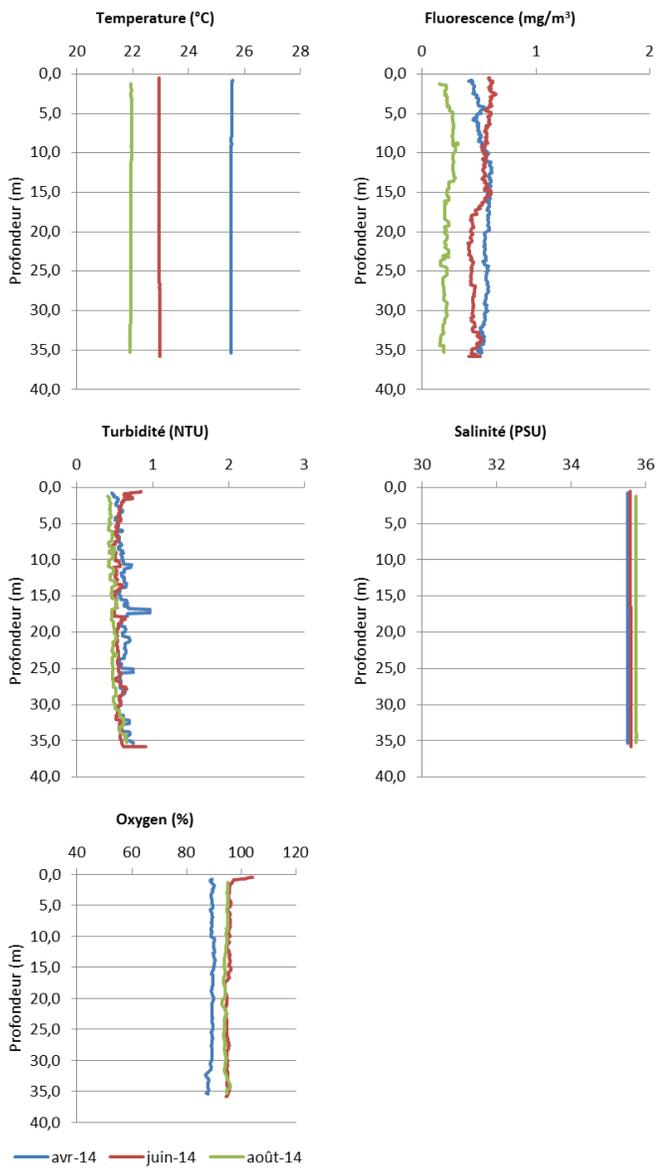
## St 06 Baie Kwé



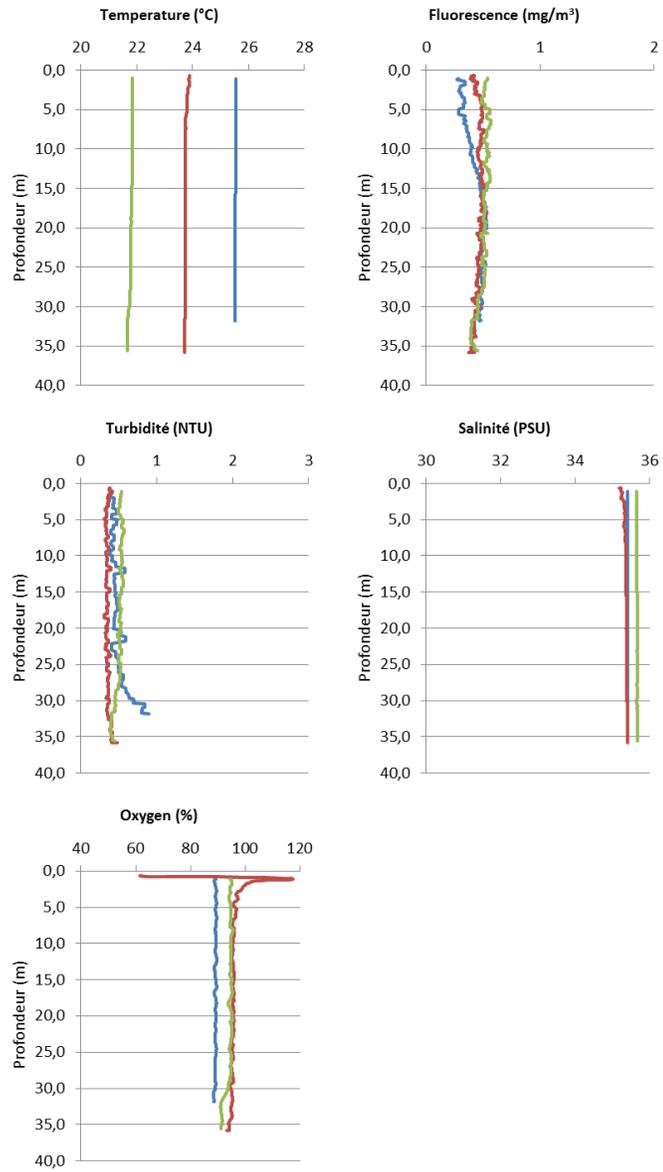
St 07 Récif Ioro



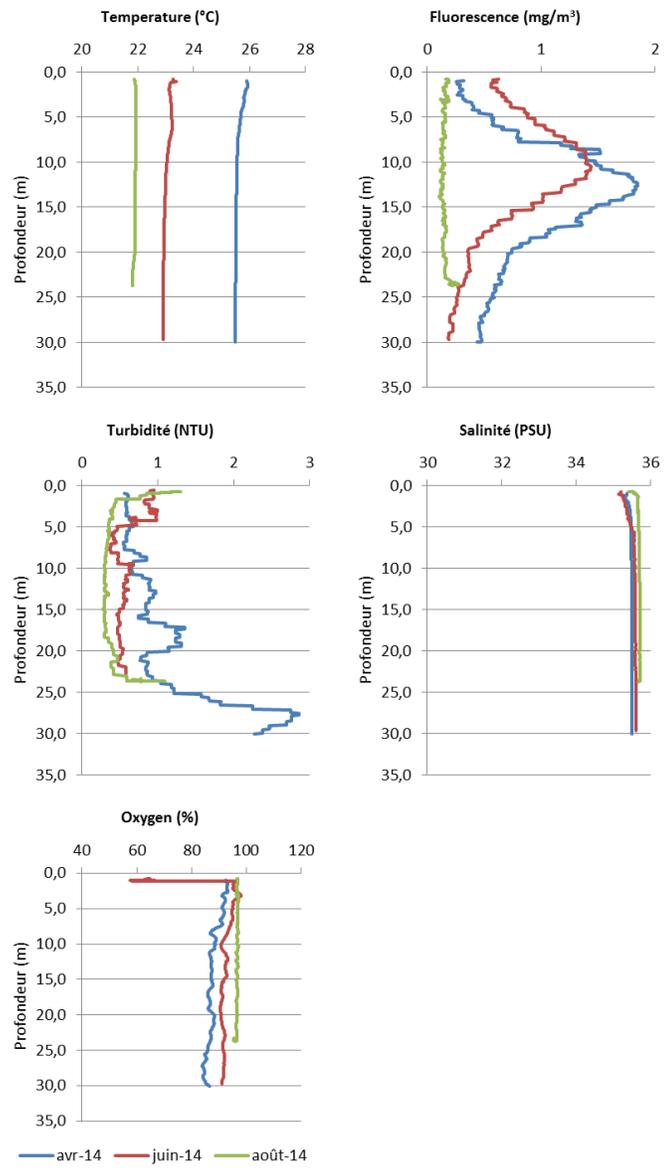
## St 13 Ile Ouen (Récif Ma)



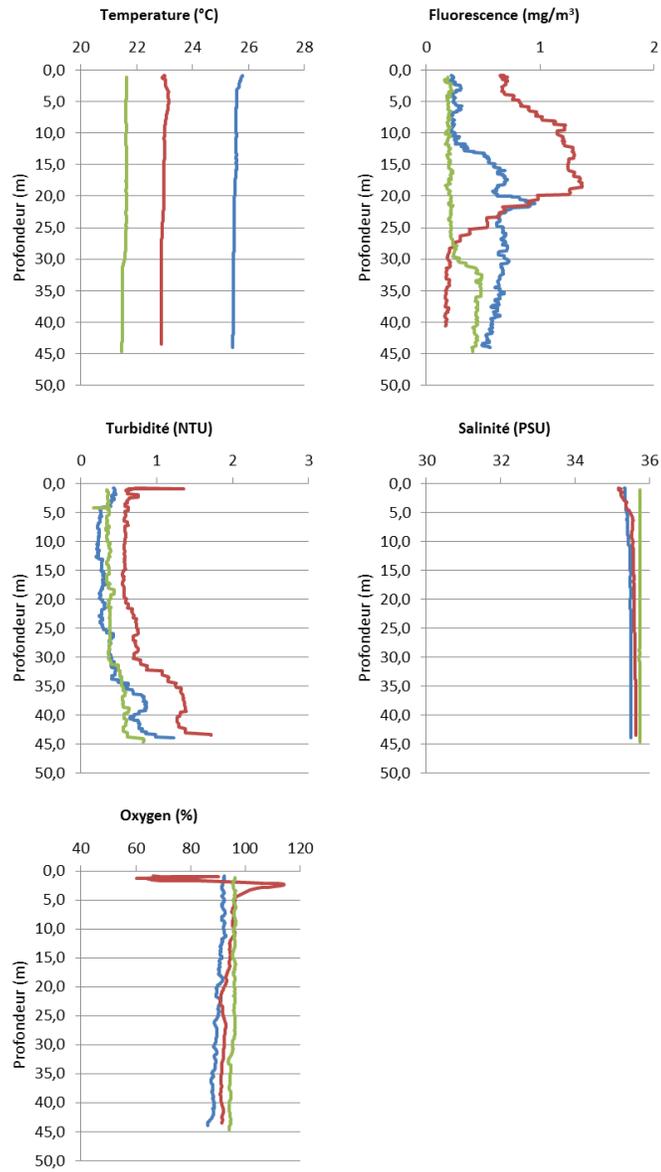
St 14 Port de Goro



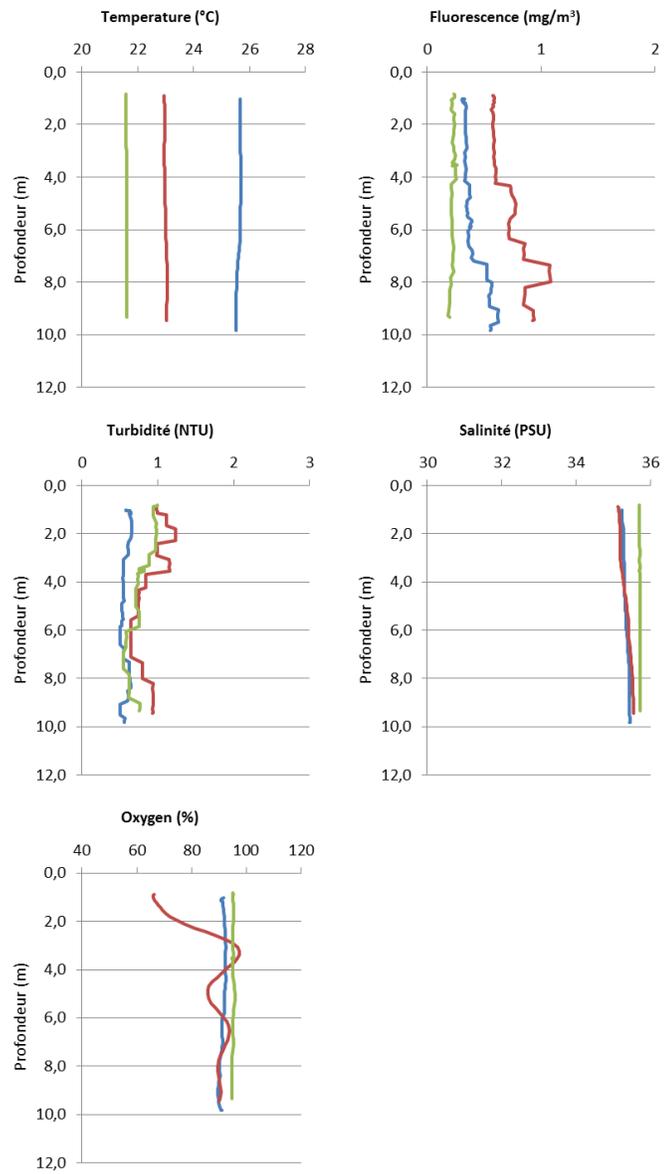
## St 15 Rade du Nord



St 16 Port de Prony



## St 16 Quai du Port de Prony



St 18 Ilot Casy

