

IMPACT DE LA FUITE D'EFFLUENT ACIDE EN RADE NORD (BAIE DU PRONY)

Accident du 06-07 mai 2014



Rapport final

Date 26/06/14

Photos de couverture AEL : mise en place du filet pour la collecte des poissons du Creek de Rade Nord

CONTRAT DE CONSULTANCE

Convention(s)/Contrat(s)

001-VI-14-A

002-VI-14-A

003-VI-14-A

004-VI-14-A

006-VI-14-A

Impact de la fuite d'effluent acide en Rade Nord (Baie du Prony)

Accident du 06-07 mai 2014

Auteur (s)

JM Fernandez, Moreton B, Legrand H, Kaplan H, Pousse C, Haddad L

Nombre de pages : 72

	N/Ref	V/Ref
Identification	001-VI-14-A 002-VI-14-A 003-VI-14-A 004-VI-14-A 006-VI-14-A	E68842/001 E68859/001
Titre complet	Impact de la fuite d'effluent acide en Rade Nord (Baie du Prony). Accident du 06-07 mai 2014.	
Auteurs	Fernandez JM, Moreton B, Legrand H, Kaplan H, Pousse C, Haddad L	
Résumé	<p>Une fuite accidentelle d'effluents (96 m³) s'est produite du 06 au 07 mai 2014 provoquant une acidification très forte (pH=2,5) des eaux du Creek de la Rade Nord. Le 07 mai une intervention urgente a été conduite afin d'analyser les eaux de la Rade Nord et mesurer les conséquences de cet accident sur le milieu marin. Cette intervention a été suivie de 3 autres : les 12, 15 et 23 mai 2014. Il ressort des différentes analyses, mesures et calculs que :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'épisode pluvieux de forte intensité (95 mm, 06 mai 2014) a favorisé la dilution dans le Creek de la solution acide enrichie en métaux ; • Les eaux du lagon ne contenaient aucune trace mesurable d'acidité, ni le 07 mai, ni à fortiori, les 12, 15 et 23 mai, en raison du pouvoir tampon des eaux marines fortement carbonatées (2,30 ±0,07meq/L). L'acidité des eaux du Creek à l'embouchure ayant été estimée à 3,0 <pH< 3,5) ; • Le 7 mai, les concentrations de Ni, Co, Mn et Zn des eaux de surface étaient jusqu'à 300 fois plus élevées que les concentrations maximales typiquement observées en Rade Nord. Les valeurs pour Cr(VI) n'ayant été que sensiblement impactées, au niveau de l'embouchure ; • Les eaux de mi-profondeur n'ont pas été affectées par la présence anormale de métaux ; • A la 2^{ème} campagne de prélèvements (12 mai) le retour à des valeurs normales de concentrations était amorcé, confirmé par les 2 autres campagnes (15 et 23 mai) ; • La modélisation confirme, la distribution temporelle et spatiale des concentrations mesurées, avec toutefois, des divergences avec les résultats d'analyses ; <p>Pour l'Île Ouen, aux différentes stations échantillonnées, les concentrations sont toutes demeurées en dessous du niveau des valeurs maximales habituellement enregistrées.</p>	
APPROBATION		
FONCTION	NOMS	VISA
Rédacteur	Fernandez JM	19/06/2014
Vérificateur 1	Moreton B	20/06/2014
Vérificateur 2	Pousse C	23/06/2014
Approbateur(s)	Fernandez JM	23/06/2014
EVOLUTION		
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR	DATE
V2.0	Rapport final	26/06/2014
COPIE - DIFFUSION		
NOM	ORGANISME	
Casalis Céline	Département Environnement Vale-NC	

Ce rapport est cité comme suit :

Fernandez JM, Moreton B, Legrand H, Kaplan H, Pousse C, Haddad L, 2014. Impact de la fuite d'effluent acide en Rade Nord (Baie du Prony). Accident du 06-07 mai 2014. Contrat Vale-NC/AEL n°001-VI-14-A à 004-VI-14-A, 72p.

TABLE DES MATIERES

I.	INTRODUCTION	5
A.	Contexte	6
B.	Objectifs.....	6
II.	METHODOLOGIE.....	7
A.	Site d'études et conditions météorologiques	8
B.	Missions de prélèvement et de mesure	11
1.	Mission du 07 mai 2014	11
2.	Mission du 12 mai 2014	12
3.	Mission du 15 mai 2014	14
4.	Mission du 23 mai 2014	15
5.	Méthodes et matériels	16
III.	SYNTHESE DES RESULTATS.....	18
A.	Conditions météorologiques	19
B.	Etude de la Rade Nord	21
1.	Structure de la colonne d'eau	21
2.	Mesure du pH.....	27
3.	Métaux dissous	28
4.	Synthèse de l'évolution spatio-temporelle des métaux.....	38
5.	Modélisation hydrodynamique	40
C.	Etude de l'Ile Ouen	48
1.	Structure de la colonne d'eau	48
2.	Analyses de laboratoire	48
IV.	CONCLUSIONS.....	50
	REFERENCES	53
	LISTE DES FIGURES	54
	LISTE DES TABLEAUX	55
	Annexe 1	56
	Annexe 2	59
	Annexe 3	70



26/06/2014

Déversement accidentel du 06-07 mai 2014

I. INTRODUCTION

A. CONTEXTE

Une fuite accidentelle d'effluents s'est produite entre le 06 mai 2014 à 23h00 et le 07 mai à 13h50 (Figure 1), provoquant une acidification très forte ($\text{pH}=2,5$) des eaux aux stations U-7 et U-13 situées dans la partie haute du Creek de la Rade Nord.

Mercredi 07 mai, suite à ce déversement dans le Creek, le laboratoire AEL a été contacté par Vale-NC à 16h00 pour organiser une intervention urgente sur le terrain afin d'analyser les eaux de la Rade Nord et mesurer les conséquences de cet accident sur la composition physico-chimique du milieu marin.

Le volume déversé est estimé par Vale-NC à environ 96 m³.

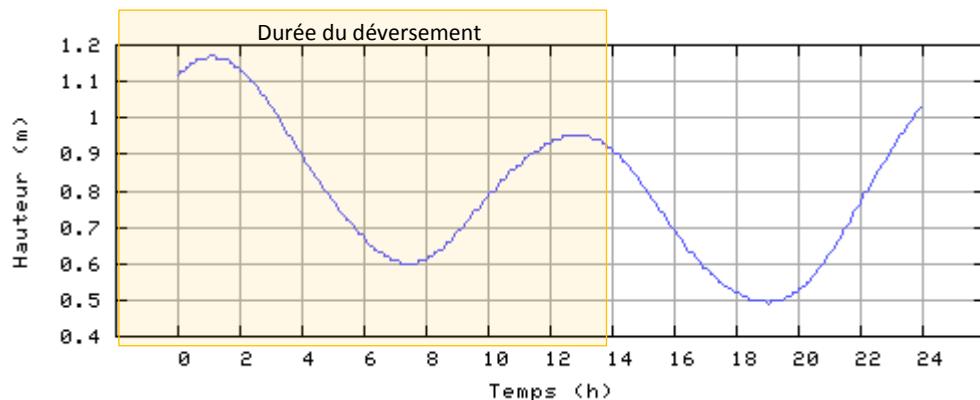


Figure 1 : Durée du rejet de solution acide dans le Creek de la Rade Nord (06 mai à 23h00 au 07 mai 13h50) et courbe des mouvements marégraphiques.

B. OBJECTIFS

Ce rapport synthétise l'information disponible après les 4 missions de terrain suivantes ;

- 07 mai entre 20h30 et 00h30 ;
- 12 mai entre 11h00 et 17h00 ;
- 15 mai entre 8h00 et 13h30 ;
- 23 mai entre 10h00 et 14h00.

L'objectif des interventions a été de :

- Mesurer in-situ les paramètres physico-chimiques de base permettant de caractériser la structure de toute la colonne d'eau in-situ au moment de chacun des prélèvements ;
- Collecter des échantillons d'eau de surface (voire en profondeur) pour procéder à des analyses approfondies en laboratoire en termes de concentrations en métaux dissous et d'acidité (pH) en fonction de la distance à l'embouchure.

II. METHODOLOGIE

A. SITE D'ETUDES ET CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Les stations échantillonnées lors de ces 4 missions sont listées dans le Tableau 1.

Les cartes de la Rade Nord et de l'Ile Ouen permettent la localisation des stations (Figure 2), elles sont complétées par une carte de situation géographique de la Baie du Prony délimitant la zone de simulation des phénomènes de dispersion du panache issus du Creek de la Rade Nord (Figure 3).

Tableau 1 : Liste des stations d'échantillonnage de la colonne d'eau de la mission 1 (07 mai), mission 2 (12 mai), mission 3 (15 mai) et mission 4 (23 mai). Deux à trois niveaux de prélèvement ont été réalisés : surface (S), mi-profondeur (M) et fond (F) selon la station.

Station	Latitude	Longitude	Mission 1 (07 mai)	Mission 2 (12 mai)	Mission 3 (15 mai)	Mission 4 (23 mai)
RN01	S22° 19.931	E166° 52.630	S	S	S	S
RN02	S22° 19.973	E166° 52.631	S, M	S, M	S, M	S, M
RN03	S22° 20.010	E166° 52.619	S, M			
RN04	S22° 20.039	E166° 52.609	S, M	S, M	S, M	S, M
RN05	S22° 19.920	E166° 52.586	S, M	S, M	S, M	S, M
RN06	S22° 19.898	E166° 52.562	S, M			
RN07	S22° 19.883	E166° 52.545	S, M	S, M	S, M, F	S, M, F
RN08	S22° 19.949	E166° 52.600	S, M	S, M	S, M	S, M
RN09	S22° 19.966	E166° 52.580	S, M			
RN10	S22° 19.986	E166° 52.564	S, M	S, M	S, M	S, M
RN11	S22° 19.891	E166° 52.691		S		S
RN12	S22° 19.919	E166° 52.670		S	S	S
RN13	S22° 19.941	E166° 52.658		S		
RN14	S22° 19.994	E166° 52.696		S	S	S
RN15	S22° 19.893	E166° 52.622		S	S	S
RN16	S22° 19.855	E166° 52.496		S, M	S, M	S, M
RN17	S22° 20.029	E166° 52.506		S, M	S, M	S, M
RN18	S22° 20.307	E166° 52.522			S, M	S, M
RN19	S22° 20.175	E166° 52.343			S, M	S, M
RN20	S22° 19.757	E166° 52.342			S, M	S, M
RN21	S22° 19.751	E166° 52.578			S, M	S
RN22	S22° 19.941	E166° 52.328			S, M	S
RN23	S22° 19.865	E166° 52.749				S
Station	Latitude	Longitude	Mission 1 (07 mai)	Mission 2 (12 mai)	Mission 3 (15 mai)	Mission 4 (23 mai)
Ouen 02	S22° 24.054	E166° 50.629		S, M		
Ouen 03	S22° 24.425	E166° 50.713		S, M		
Ouen 04	S22° 24.727	E166° 50.950		S, M		
Ouen 05	S22° 25.370	E166° 50.678		S, M		
St15	S22° 24.914	E166° 51.354		S, M		

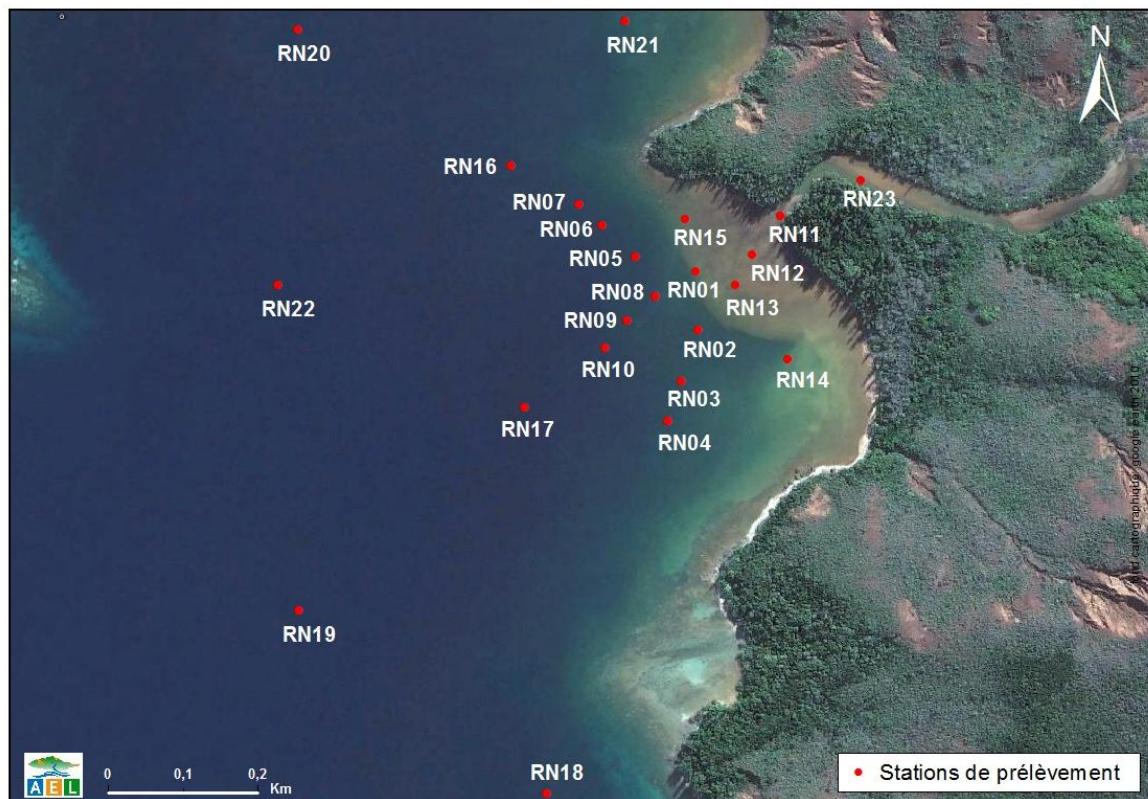


Figure 2 : Cartes des stations de prélèvements des 4 missions (07, 12, 15 et 23 mai) de suivi de l'impact en milieu marin consécutif à la fuite de solution acide dans le Creek de la Rade Nord. Carte des sites de prélèvements complémentaires de contrôle pour l'île Ouen.

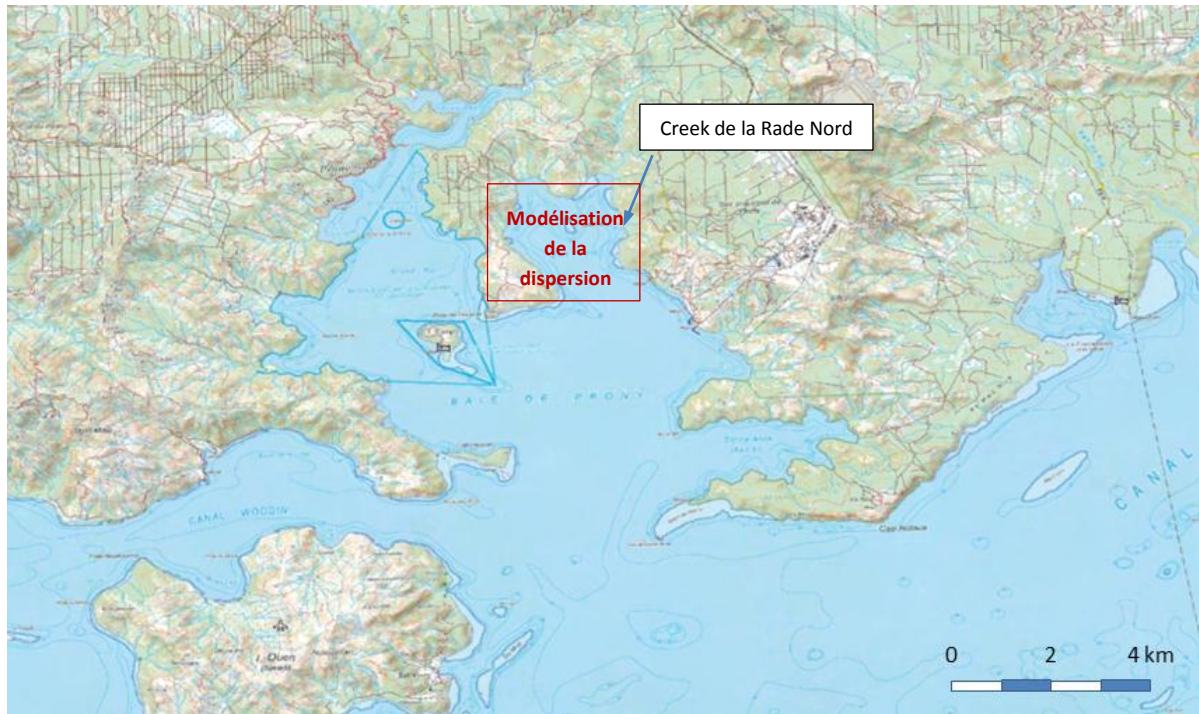


Figure 3 : Carte générale de situation géographique du Canal de la Havannah, de la Baie du Prony et de la Rade Nord. Le carré rouge délimite la zone sujette à la modélisation des phénomènes de dispersion du panache issus du Creek.

B. MISSIONS DE PRELEVEMENT ET DE MESURE

1. Mission du 07 mai 2014

a) Description de la mission effectuée

La mission du 07 mai 2014 a été réalisée quelques heures après l'arrêt du déversement accidentel de solution acide dans le Creek de la Rade Nord. L'équipe d'intervention a échantillonné l'eau du lagon dans la zone d'expansion du Creek selon des gradients « côte-large ». Les prélèvements effectués de nuit et à marée montante ont limité l'accessibilité à l'embouchure même du Creek.

La mise à l'eau s'est effectuée à la baie de Somme à 20h00. La mission de prélèvements s'est déroulée de 20h30 jusqu'à 00h30 (08 mai).

Les opérations suivantes ont été successivement effectuées :

- Mesures *in-situ* des paramètres physico-chimiques avec deux sondes multiparamétriques (CTD) en simultané à chaque station. Les deux premiers profils ont été réalisés à **20h42** et les deux derniers à **23h20**, d'après l'horloge interne de chacune des deux sondes ;
- Collecte des échantillons d'eau afin de procéder à des analyses de métaux dissous et de pH au laboratoire.

b) Echantillonnage

Durant cette 1^{ère} campagne il a été réalisé :

- 7 profils de sonde multiparamétrique conduits en double (T°C, S‰, Fluorescence, Turbidité et Oxygène dissous) ;
- 19 niveaux de prélèvement ;
- 57 échantillons d'eau pour la détermination du pH et l'analyse des concentrations en métaux dissous (Cd, Co, Cu, Cr(VI), Fe, Mn, Ni, Pb et Zn).

Au total **10 stations** de prélèvement (**RN1 à RN10** ; Figure 2) ont été positionnées selon 3 radiales : une radiale orientée vers le sud/sud-ouest, une deuxième vers l'ouest/sud-ouest et la troisième vers le nord-est. La première station a été localisée au plus près de l'embouchure du Creek de la Rade Nord, compte tenu des conditions bathymétriques de début de marée montante (Figure 4).

Sur chacune des 10 stations des profils multiparamétriques avec les deux sondes CTD (SBE 19+ V2) ont été réalisés.

Les échantillons d'eau de mer ont été prélevés en surface (50 cm) et à mi- profondeur, à l'exception de RN1 où un seul prélèvement a été effectué en surface en raison de la faible profondeur (3,8 m) de la station (Tableau 1.).

c) Conditions météorologiques et marégraphiques

La chronologie de l'échantillonnage de la colonne d'eau et des mesures est reportée sur le marégramme de la journée du 07 mai 2014 (Figure 4).

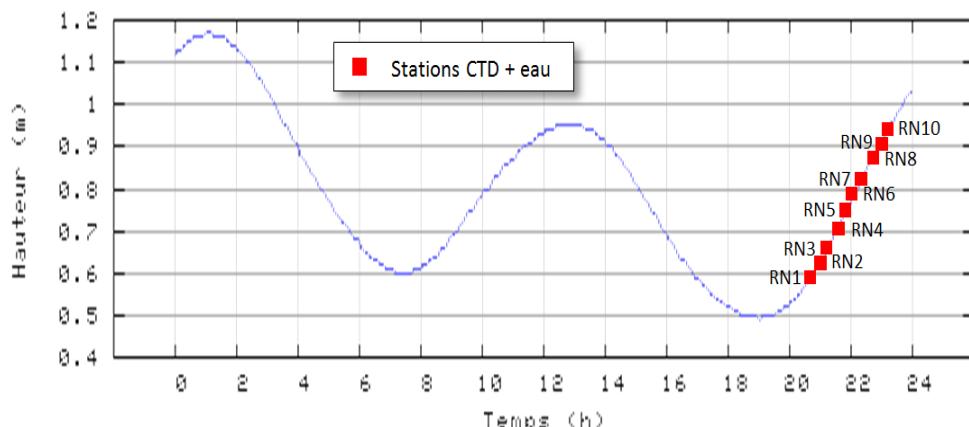


Figure 4 : Chronologie des prélèvements et mesures reportée sur le marégramme du 07/05/14.

Les conditions météorologiques ont été les suivantes :

Vent (direction, force):	Le vent calme (<5 Nds)
Conditions :	Ciel clair.

2. Mission du 12 mai 2014

a) Description de la mission effectuée

Les prélèvements d'eau ont été effectués de jour et l'échantillonnage dans la proche embouchure a été facilité par la marée haute (contrairement à la mission précédente), permettant également l'accès au lit du Creek de Rade Nord.

Des échantillons ont également été prélevés au niveau de la côte ouest de l'Île Ouen.

La mise à l'eau s'est effectuée à la baie de la Somme à 11h00.

Les opérations suivantes ont été effectuées :

- Mesures *in-situ* des paramètres physico-chimiques à chaque station ;
- Collecte des échantillons d'eau afin de procéder à des analyses de métaux dissous et pH au laboratoire ;
- Pose d'un filet dans le Creek de la Rade Nord, près de son embouchure afin de récupérer les organismes affectés encore présents dans les eaux du creek.

b) Echantillonnage

Durant cette 2^{ème} campagne, il a été réalisé :

- 15 profils de sonde multiparamétrique (T°C, S‰, Fluorescence, Turbidité et Oxygène dissous) ;
- 34 niveaux de prélèvement ;
- 102 échantillons d'eau pour la détermination du pH et l'analyse des concentrations en métaux dissous (Cd, Co, Cu, Cr(VI), Fe, Mn, Ni, Pb et Zn).

(1) Echantillonnage dans la Rade Nord

Le nombre de prélèvements dans la Rade Nord a été augmenté à **15 stations** dont 2 ont été réalisés, respectivement, dans les eaux du Creek (**RN11**) et dans la zone intertidale (**RN12**). A chaque station les échantillons d'eau de mer ont été prélevés en surface (50 cm) et à mi- profondeur, à l'exception de certaines stations où un seul prélèvement a été effectué en surface en raison de la faible profondeur de celles-ci (Tableau 1, Figure 2).

(2) Echantillonnage à l'Ile Ouen

Le long de l'Ile Ouen, **5 stations** supplémentaires ont été échantillonnées, dont la station St13 du suivi réglementaire semestriel (Figure 2).

Des échantillonnages ont été effectués en surface (50 cm) et en profondeur (Tableau 1 ; Figure 1).

c) Conditions météorologiques et marégraphiques

La chronologie de l'échantillonnage de la colonne d'eau et des mesures est reportée sur le marégramme de la journée du 12 mai 2014 (Figure 5).

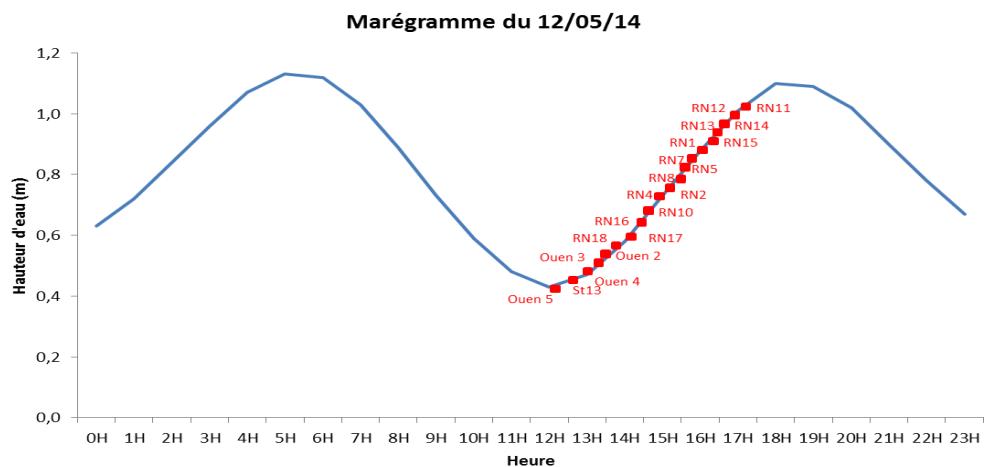


Figure 5 : Chronologie des prélèvements et mesures reportée sur le marégramme du 12 mai 2014.

Les conditions météorologiques ont été les suivantes :

Vent (direction, force):	Le vent était de sud-est et soufflait à environ 20-25 Nds
Conditions générales :	Le temps était nuageux et ponctué d'averses et mer agitée dans le Canal de la Havannah jusqu'à l'Ile Ouen. Présence de courant. Mer calme en Baie du Prony et Baie Nord. Les prélèvements ont été effectués en marée montante (Figure 5).

3. Mission du 15 mai 2014

a) Description de la mission effectuée

Les prélèvements de cette 3^{ème} mission ont été effectués au droit du Creek de la Rade Nord mais dans une zone d'études élargie vers le large correspondant à l'aire d'expansion des eaux douces.

Remarque : la station St16 (Port de commerce) a également fait l'objet d'un prélèvement d'eau, dans le cadre du suivi réglementaire.

La mise à l'eau a eu lieu à la baie de la Somme à 07h40.

Les opérations suivantes ont été effectuées :

- Mesures *in-situ* des paramètres physico-chimiques à chaque station ;
- Collecte des échantillons d'eau afin de procéder à des analyses de métaux dissous et pH au laboratoire.

b) Echantillonnage

Durant cette 3^{ème} campagne, il a été réalisé :

- 15 profils de sonde multiparamétrique (T°C, S‰, Fluorescence, Turbidité et Oxygène dissous) ;
- 29 niveaux de prélèvement ;
- 87 échantillons d'eau pour la détermination du pH et l'analyse des concentrations en métaux dissous (Cd, Co, Cu, Cr(VI), Fe, Mn, Ni, Pb et Zn).

Le nombre de prélèvements dans la Rade Nord a été augmenté à **17 stations** (Tableau 1 et Figure 2). Aucun prélèvement n'a été réalisé près de l'Île Ouen.

Un profil multiparamétrique est réalisé avec la sonde CTD SBE 19 sur chacune des 17 stations retenues.

A chaque station les échantillons d'eau de mer ont été prélevés en surface (50 cm) et à mi-profondeur, à l'exception des stations RN1, RN12, RN14, RN15, RN21, RN22 où un seul prélèvement a été effectué en surface en raison de la faible profondeur de leur localisation (Tableau 1 ; Figure 1). Seule la station RN7 a été échantillonnée en surface, mi-profondeur et fond.

c) Conditions météorologiques et marégraphiques

La chronologie de l'échantillonnage de la colonne d'eau et des mesures est reportée sur le marégramme de la journée du 15 mai 2014 (Figure 6).

Les conditions météorologiques ont été les suivantes :

Vent (direction, force):	Le vent était de sud-est et soufflait entre 18 et 20 Nds.
Conditions :	Le temps était nuageux avec de fréquentes averses. La mer était légèrement agitée avec des courants faibles. Les prélèvements ont été effectués en marée descendante (Figure 6).

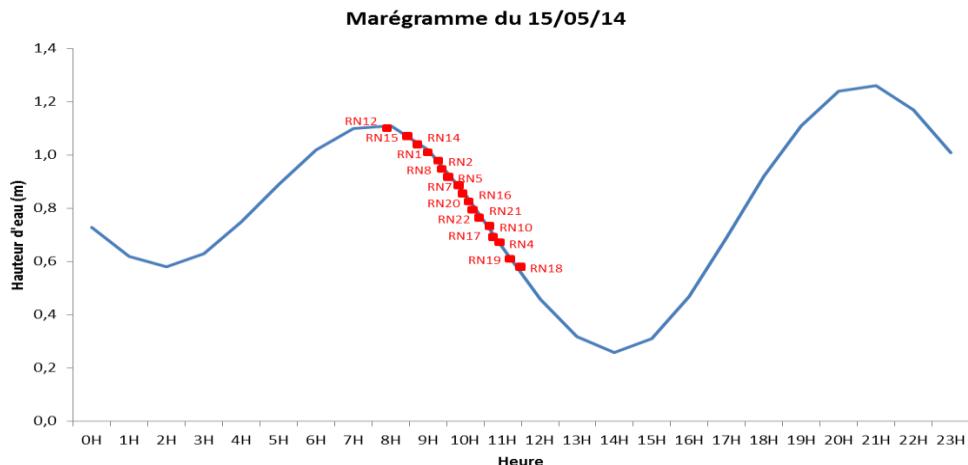


Figure 6 : Chronologie des prélevements et mesures reportée sur le marégramme du 15/05/14 (Prony).

4. Mission du 23 mai 2014

a) Description de la mission effectuée

La mission du 23 mai 2014 est la 4^{ième} mission réalisée après le déversement accidentel d'acide dans le Creek de la Rade Nord. Cette mission cible la plupart des stations à proximité du Creek déjà échantillonnées lors des 3 missions précédentes.

La mise à l'eau s'est effectuée à la Baie de la Somme à 9h30.

Les opérations suivantes ont été effectuées :

- Mesures *in-situ* des paramètres physico-chimiques à chaque station ;
- Collecte des échantillons d'eau afin de procéder à des analyses de métaux dissous et pH au laboratoire.

b) Echantillonnage

Durant cette 4^{ième} campagne, il a été réalisé :

- 16 profils de sonde multiparamétrique (T°C, S‰, Fluorescence, Turbidité et Oxygène dissous) ;
- 32 niveaux de prélèvement ;
- 96 échantillons d'eau pour la détermination du pH et l'analyse des concentrations en métaux dissous (Cd, Co, Cu, Cr(VI), Fe, Mn, Ni, Pb et Zn).

Le nombre de prélèvements dans la Rade Nord a été de **17 stations** (Tableau 1 et Figure 2) auxquelles il a été rajouté un prélèvement supplémentaire (**RN23**) dans le cours du Creek en amont de l'embouchure. Aucun prélèvement n'a été réalisé près de l'Île Ouen.

Un profil multiparamétrique est réalisé avec la sonde CTD SBE 19 sur chacune des 17 stations retenues. Un profil supplémentaire a été réalisé dans le cours du Creek (**RN24**), les eaux n'ayant pas été échantillonnées pour les analyses de métaux dissous, ni pour la mesure du pH.

A chaque station les échantillons d'eau de mer ont été prélevés en surface (50 cm) et à mi-profondeur, à l'exception des stations RN1, RN12, RN14, RN15, RN21, RN22 et RN23 où un seul

prélèvement a été effectué en surface en raison de la faible profondeur de leurs localisations respectives (Tableau 1; Figure 1). Seule la station RN7 a été échantillonnée en surface, mi-profondeur et fond.

Un profil multiparamétrique est réalisé avec la sonde CTD SBE 19 sur chaque station à l'exception des stations RN11, RN12, RN15 et RN23 car la profondeur est inférieure ou égale à 1m.

c) Conditions météorologiques et marégraphiques

La chronologie de l'échantillonnage de la colonne d'eau et des mesures est reportée sur le marégramme de la journée du 23 mai 2014 (Figure 7).

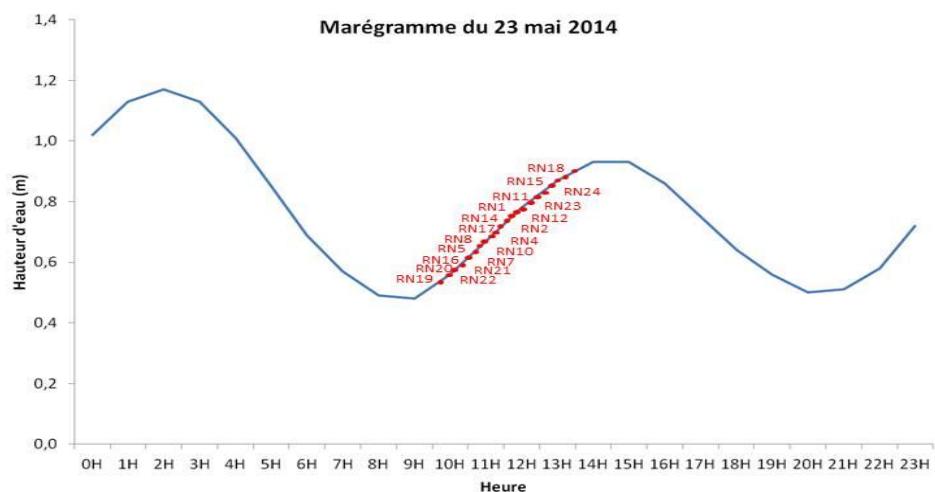


Figure 7 : Chronologie des prélèvements et mesures reportée sur le marégramme du 23/05/14 (Prony).

Les conditions météorologiques ont été les suivantes :

Vent (direction, force):	Le vent était de sud-est et soufflait entre 12 et 14 Nds.
Conditions :	Le temps était nuageux avec quelques éclaircies. La mer était calme. Les prélèvements ont été effectués à marée montante (Figure 3).

5. Méthodes et matériels

Les prélèvements d'eau ont été effectués par bouteilles « GoFlo®, Metal-Free » pour le dosage des métaux dissous.

Pour les 4 campagnes de prélèvement, l'analyse des métaux dissous a été réalisée par :

- Spectrométrie d'émission optique couplée à une torche à plasma (ICP-OES) pour le dosage des éléments métalliques cadmium (Cd), cobalt (Co), cuivre (Cu), fer (Fe), manganèse (Mn), nickel (Ni) et zinc (Zn). Cette analyse a été réalisée après préconcentration des eaux de mer filtrées à 0,45 µm sur lit de résine échangeuse d'ions ;

- Electrochimie (Voltammetrie) pour le dosage du chrome hexavalent (Cr(VI)).

Une brève description de la méthodologie suivie pour l'analyse des métaux dissous est fournie en Annexe 1.

III. SYNTHESE DES RESULTATS

A. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Hormis un épisode pluvieux notable, le mois de mai a été relativement sec. En effet, des précipitations importantes et de forte intensité ont été enregistrées à la station météorologique de Vale-NC (usine) pour la journée du 06 mai 2014 (95 mm). Par la suite, deux autres épisodes, de moindre intensité, respectivement de 48,1 mm cumulés du 8 au 10 mai, puis de 72,3 mm du 13 au 15 mai 2014, se sont produits (Figure 8). Au-delà aucune retombée significative n'a été enregistrée.

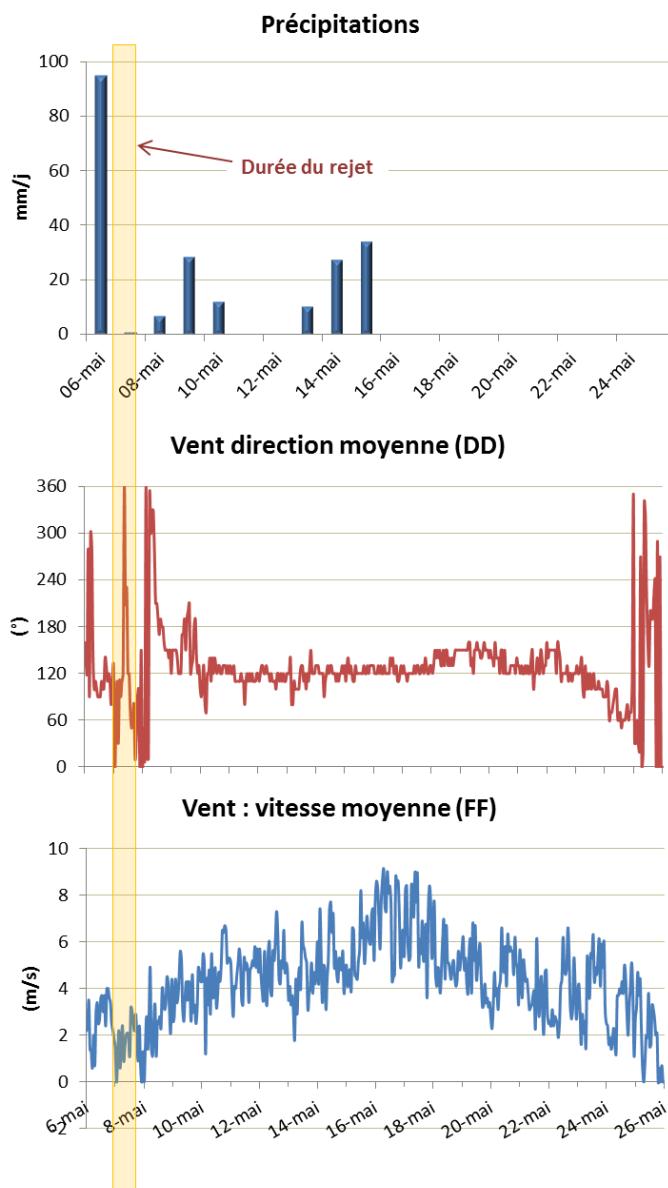


Figure 8 : Enregistrements des précipitations atmosphériques, des vitesses moyennes (FF) et des directions moyennes (DD) de vents quotidiens pour la période du 06 au 26 mai 2014.

Les vents se sont distribués selon deux types de régimes bien distincts : les régimes de secteur nord et les régimes de secteurs sud-est (Figure 8), le passage de l'un à l'autre s'opérant de manière relativement progressive.

En effet, en début de période (6-8 mai), les vents calmes ont dominé, ce régime ayant ensuite cédé la place à des alizés de sud-est dont l'installation s'est produite grâce à une bascule des vents à l'ouest. Inversement, en fin de période, le retour aux conditions de nord s'est effectué par une rotation par l'est.

En termes de vitesses, le début de période a été marqué par des vitesses très faibles ($FF < 4 \text{ m/s}$) fraîchissant par la suite progressivement jusqu'en milieu de période (16-18 mai ; $8-9 \text{ m/s}$) pour mollir nettement mais régulièrement jusqu'en fin de mois où les vitesses redeviennent très faibles.

Dans le détail, 4 épisodes peuvent être schématiquement distingués :

- 06-08 mai. Les vents moyens ont été très faibles ($FF < 4 \text{ m/s}$) et leur orientation a subi différentes rotations entre le secteur ouest vers le secteur nord en passant temporairement par le sud-est ou l'ouest, donnant de fortes pluies (95 mm) au début de cet épisode.
- 09-22 mai. Le vent s'est installé progressivement au secteur sud-est où il s'est maintenu jusqu'au 22 mai. Durant cette période, sa vitesse moyenne s'est renforcée, passant de 4 m/s à plus de 9 m/s durant 24 heures puis a molli progressivement. Des pluies de moyennes intensité ont accompagné ce régime de sud-est ;
- 23-24 mai. Cet épisode marque le début d'une nouvelle rotation du vent vers le secteur nord avec un mollissement des vitesses ($FF < 4 \text{ m/s}$) ;
- 25-26 mai. Les vents de secteur nord sont dominants et leur force est très faible ($FF < 2 \text{ m/s}$).

Le déversement accidentel de la solution acide s'est donc produit quelques heures après des pluies importantes accompagnées de vents de secteurs nord dont les vitesses très faibles étaient souvent inférieures à 2 m/s .

Ces conditions météorologiques de début de période (06-08 mai 2014) ont donc probablement contribué à mettre en place deux mécanismes antagonistes, à savoir :

- augmenter momentanément le débit du Creek au-dessus de la moyenne décennale pour le mois de mai ($0,41 \text{ m}^3/\text{s}$) grâce aux 95 mm de pluie tombée le 06 mai, favorisant alors la dilution de la solution acide déversée dans le Creek;
- confiner temporairement les eaux douces du Creek dans la couche de surface de la Rade Nord, ralentissant notamment les mécanismes de dispersion horizontalement et verticalement ; le brassage mécanique des eaux n'a été enclenché qu'avec l'installation des alizés de sud-est.

B. ETUDE DE LA RADE NORD

Les résultats d'analyses au laboratoire et de mesures in-situ sont regroupés en Annexe 2.

Pour ces 4 campagnes de contrôle et de suivi des impacts relatifs au déversement de solution acide dans le Creek de Rade Nord, **113 niveaux de prélèvement** ont été réalisés donnant lieu à la collecte de **339 échantillons d'eau** pour les analyses du pH, et des concentrations en métaux dissous (Cd, Co, Cu, Cr(VI), Fe, Mn, Ni, Pb et Zn). Pour les métaux, il est dénombré 171 (mission 1), 306 (mission 2), 261 (Mission 3) et 279 (Mission 4), soit au total **1017 résultats d'analyses**.

1. Structure de la colonne d'eau

Les profils multiparamétriques réalisés lors des 4 campagnes sont regroupés dans la Figure 9, pour la mission 1 (07 mai), et en Annexe 2, pour les 3 autres missions.

a) Mission du 07 mai (Figure 9)

Les 10 profils multiparamétriques des eaux de la Rade Nord enregistrés pendant cette première mission mettent en évidence :

- une dessalure de l'ordre de 5 mètres d'épaisseur avec des valeurs minimales de 33,7‰ environ qui a affecté toutes les stations de la Rade Nord. Cependant, l'importance et l'intensité de la couche dessalée varie modérément d'une station à l'autre, et inhabituellement, elle est sensiblement plus marquée pour des stations éloignées de l'embouchure (RN03 et RN06) qu'autour de celles-ci (RN01, RN02, RN08 et RN05) ;
- la présence d'une thermocline à une profondeur comprise entre 2 et 3 m. Les températures les plus chaudes sont relevées pour les stations proches de l'embouchure avec plus de 26,7°C en RN01, RN02, RN08 et RN05, les plus fraîches étant enregistrées aux stations les plus éloignées (RN04 et RN07) avec une valeur minimale de 25,9°C ;
- des conditions typiques de turbidité pour cette zone de la Baie du Prony. Les valeurs les plus élevées sont relevées autour de l'embouchure (RN01, RN02, RN05 et RN08) où les couches turbides se développent tant en surface qu'en profondeur, avec un maximum de 1,94 NTU ; plus au large, seuls des néphéloïdes benthiques persistent encore (2,20 NTU en RN03) ;
- des eaux riches en oxygène dissous (saturation supérieur à 90 %) dans toute la colonne d'eau, au droit de l'embouchure et vers le large. Entre les deux secteurs, des teneurs bien plus faibles dans l'eau de surface (0-5m) sont mesurées au niveau de cinq stations intermédiaires (RN03, RN04, RN06, RN07 et RN08) ; les niveaux de saturation en oxygène oscillant entre 60 et 80% ;
- des mesures de fluorescence constantes et faibles dans la couche d'eau de surface (0-5m) de toutes les stations. Cette mesure traduit la présence des concentrations en chlorophylle totale faibles (0,3-0,4 µg/L), elle-même liée à la densité d'organismes phyto-planctoniques. En dessous, les valeurs augmentent progressivement jusqu'à atteindre 2 µg/L en RN03 en profondeur.

Ces observations permettent d'émettre l'hypothèse que, le 07 mai, le milieu marin est fortement marqué par les apports en douce du Creek et notamment consécutivement aux fortes pluies du 06 mai (95mm). Toutefois, ces eaux, qui occupent encore une bonne partie de la Rade Nord, sont progressivement évacuées vers le large, comme le suggère l'inversion du gradient horizontal de salinité mesuré entre la côte et le large ; la salinité étant plus faible aux stations éloignées de l'embouchure qu'au droit de celle-ci.

En ce qui concerne la chlorophylle-totale, cette distribution verticale coïncide avec l'allure générale des profils de salinité et de température qui deviennent constants en-dessous de la limite des 5 mètres de profondeur. Un lien avec les précipitations du 06 mai semble être réaliste, par ailleurs, une distribution identique pour la Rade Nord a été observée lors du passage du cyclone Freda, les teneurs en chlorophylle-totale ayant notamment chuté dans les mêmes proportions et ont affecté une couche de même épaisseur (Fernandez et Moreton, 2013).

b) Mission du 12 mai 2014

Outre les profils réalisés dans la zone d'expansion du Creek de la Rade Nord (14), la deuxième mission a permis de réaliser des mesures complémentaires le long de la côte sud-est de l'île Ouen (5).

Dans la Rade Nord, les observations suivantes peuvent être émises :

- des traces d'une dessalure modérée en surface sont visibles au niveau de 5 stations dans une couche de faible épaisseur (<1 m) pour RN01, RN02, RN08, RN15 et RN17) et plus importante (5 m) pour RN16. Pour cette dernière, l'importance de la couche dessalée pourrait correspondre à une rémanence des fortes précipitations du 06 mai (réalimentées par les pluies modérées cumulées entre du 08 au 10 mai) ; les masses d'eau étant poussées vers le nord de la rade par les alizés de secteur sud-est. Les profils de salinité des 8 autres stations sont homogènes et très proches de la valeur habituelle des eaux du lagon (35,5%) ;
- des profils de températures très homogènes présentent, au droit de l'embouchure des eaux plus fraîches sur 1 à 2 mètres d'épaisseur ; à la station RN16, cette épaisseur atteint les 5 m ce qui conforte l'hypothèse d'eau encore marquée par les pluies du 06 mai. Ailleurs, les températures ne fluctuent pas avec la profondeur et sont comprises entre 25,5 et 25,7°C.
- exception faite des stations de très faible profondeur (RN01 et RN15), la turbidité des eaux est importante en RN03 et RN04 (1,5 NTU), la valeur maximale étant mesurée pour le néphéloïde benthique de la station RN14 (3,91 NTU) localisée en bordure de plage (Figure 2). Pour toutes autres stations, hormis la présence sporadique de couches turbides de faible importance au sein de la colonne d'eau, deux autres néphéloïdes benthiques bien définis ont été mis en évidence, à la station RN04 et surtout en RN16 où la turbidité est de 1,83 NTU ;
- une baisse de la teneur en oxygène dissous concerne la couche des 4 premiers mètres de la colonne d'eau, voire les 9 m (RN08), profondeur au-delà de laquelle les valeurs augmentent effectivement de moins de 60% de saturation à environ 90% au fond ;
- des profils de fluorescence très contrastés dans les 15 premiers mètres de la colonne d'eau permettent de distinguer les stations les unes des autres. En effet, particulièrement dans la couche de surface (0-5m), un gradient de fluorescence croissant se dessine globalement, depuis les stations les plus éloignées vers les plus proches de la côte, les valeurs passant d'environ 0,50 à 1,17 µg/L. En dessous, les écarts entre les stations se réduisent et les

teneurs en chlorophylle-totale marquent une légère tendance à la diminution avec la profondeur.

Les mesures réalisées durant la journée du 12 mai montrent que les conséquences des eaux de pluies (08-10 mai) sur caractéristiques des masses d'eau lagonaire sont perceptibles dans la proche embouchure seulement. Pour l'ensemble du réseau, globalement, les eaux ont recouvré leurs caractéristiques lagonaires excepté au nord (RN16) où la salinité, notamment inférieure dans une épaisse couche de surface (5m), correspond à la trace des fortes précipitations du 06 mai.

c) Mission du 15 mai 2014

Les 16 profils multiparamétriques des eaux de la Rade Nord enregistrés pendant cette troisième mission mettent en évidence :

- une salinité très homogène (35,5 %) au-delà des 5 mètres de profondeur, quelle que soit la station. Inversement dans les eaux de surface (0-5m), hormis la station RN21 placée dans le lit du creek, une dessalure importante est visible aux stations RN16, RN20 et RN22. L'importance de la couche d'eau dessalée (2-3m) et leurs salinités minimales respectives (34,2, 33,6 et 32,5 %) confirment le déplacement vers le large des eaux encore marquées par les précipitations atmosphériques du 06 mai. Ailleurs, une notable dessalure n'affectant que le premier mètre environ et de moindre intensité, souligne les nouveaux apports en eau de pluie tombée entre le 13 et 15 mai ;
- approximativement de la même manière que précédemment, la température devient très homogène sous les 5 mètres de profondeur (25,20 à 25,50 °C). Dans la couche supérieure, les températures varient de plus 1°C avec la surface, mais également d'une station à l'autre ; les plus fraîches étant mesurées en RN20 et RN16 et les chaudes dans le sud du secteur, c'est-à-dire RN18 ;
- la quasi-totalité des stations montre que des couches turbides, d'intensité et d'importance variables, se sont développées entre 10 et 15 mètres de profondeur. A ces structures s'ajoutent aux niveau des stations RN04, RN05, RN07, RN10, RN12, RN19 et RN22 des néphéloïdes de surface de forte turbidité (3-10 NTU) ;
- les valeurs en oxygène dissous sont remarquablement stables autour des 90 % de saturation, sous les 15 mètres de profondeur. Dans les couches supérieures, de nombreuses fluctuations des taux (75-90 %) traduisent la mise en place de phénomènes de mélange des eaux douces et salées ;
- quelle que soit la station, les 10 premiers mètres de la colonne d'eau sont notamment enrichis en pigments chlorophylliens, les valeurs maximales étant mesurées dans la tranche de 5 à 10m de profondeur (1,5 µg/L), les valeurs les plus faibles étant attribuées aux stations les plus proches de l'embouchure (1,0 µg/L). En dessous des 10 à 15 mètres de profondeur environ, la teneur en chloro-pigments décroît rapidement autour 0,2 à 0,3 µg/L jusqu'au fond.

Les stations les plus éloignées de l'embouchure, au nord du secteur, semblent rester encore marquées par les pluies du 06 mai. A proximité du Creek, les caractéristiques des eaux sont amplement influencées par les dernières précipitations tombées entre le 13 et le 15 mai. Cet épisode pluvieux a entraîné en mer une forte quantité de composés chlorophylliens mesurable dans toute la zone d'expansion du Creek.

d) Mission du 23 mai 2014

Les 16 profils multiparamétriques des eaux de la Rade Nord enregistrés pendant cette quatrième mission mettent en évidence :

- une salinité très homogène (35,4 %o) au-delà des 5 mètres de profondeur, quelle que soit la station. Inversement dans les eaux de surface (0-5m), hormis les deux stations RN21 et RN24, placées dans le lit du creek, une dessalure importante est visible aux stations RN16, RN20 et RN22, comme durant la mission précédente. Toutefois, l'importance de la couche d'eau dessalée est réduite à 1 ou 2m et les salinités respectives sont plus élevées. Ailleurs, une notable dessalure affecte les 3 à 5 premiers mètres de la colonne d'eau. En surface, la salinité la plus importante est mesurée dans les eaux de la station RN18 (35,0 %o) dans le sud du secteur ;
- les températures sont similaires à celles observées pour les deux dernières missions (12 et 15 mai), à savoir, une distribution très homogène et constante sous les 5 mètres de profondeur (25,20 à 25,50 °C) quelle que soit la station. De même, dans la couche supérieur, les températures varient de plus 1°C avec la surface, mais également d'une station à l'autre ; les plus fraîches étant mesurées dans les stations du large (RN16, RN19, RN20 et RN21) et les chaudes dans le sud du secteur, c'est-à-dire RN18 ou près de la côte (RN14) ;
- hormis RN24 localisée dans le lit du Creek, les seules stations à développer une couche turbide de surface sont RN02 (2,5 NTU) et RN14 (3,6 NTU). Inversement à la mission du 15 mai, la majorité des profils montre l'existence d'un néphéloïde de fond bien développé, dépassant le bruit de fond de 1 à 2 NTU ;
- les taux de saturation en oxygène dissous sont globalement stables pour les profondeurs supérieures à 3 mètres, les valeurs étant comprises entre 87 et 90 %. Seul au niveau de 2 stations, RN24 (lit du Creek) et RN21, les valeurs en surface sont plus faibles. Inversement, dans la tranche des 3 mètres sous la surface, les taux sont plus forts (90-93 %) et à la station RN18 ils sont proches de la saturation ;
- la distribution spatiale des pigments chlorophylliens ainsi que les teneurs sont très proches de celles observées le 15 mai. En effet, quelle que soit la station, les concentrations maximales se répartissent autour d'un pic décelé à 5 mètres de profondeur environ, les valeurs étant comprises entre 0,5 et 0,9 µg/L. En-dessous de cette profondeur, les concentrations diminuent progressivement jusqu'à 0,3-0,4 µg/L, aux stations les plus profondes (ex. RN10, RN19, RN20).

Comme pour les observations réalisées lors de la mission précédente, les stations les plus éloignées de l'embouchure et localisées dans le nord du secteur restent sous l'influence des eaux douces. Aux alentours immédiats du Creek, l'influence des eaux douces est bien plus modérée et concerne une tranche d'eau beaucoup plus réduite. La turbidité globale et les teneurs en pigments chlorophylliens ont notamment diminué en l'absence de nouvelles précipitations atmosphériques.

Ce qu'il faut retenir

L'influence des fortes précipitations atmosphériques du 06 mai (95 mm) ont fortement marqué le milieu marin, phénomène encore très visible dans le secteur nord de la zone d'études le lendemain de l'accident (07 mai). Ces eaux dessalées occupent une bonne partie de la Rade Nord, comme le suggère l'inversion du gradient horizontal de salinité ; la salinité étant plus faible aux stations éloignées de l'embouchure qu'au droit de celle-ci.

Comme conséquence de cet important afflux d'eau douce, les teneurs en chlorophylle-totale ont drastiquement diminué dans la tranche des 5 premiers mètres sous la surface. Cette distribution verticale qui coïncide avec l'allure générale des profils de salinité et de température est identique à celle déjà observée après le passage du cyclone Freda.

Les mesures réalisées durant la journée du 12 mai montrent que les pluies du 08-10 mai ont influencé les caractéristiques des masses d'eau lagunaire dans la proche embouchure seulement. Pour l'ensemble du réseau, globalement, les eaux ont recouvré leurs caractéristiques lagonaires excepté au nord (RN16) où la salinité, notamment inférieure dans une épaisse couche de surface (5m), correspond probablement à la trace des fortes précipitations du 06 mai.

Les observations réalisées lors des missions suivantes montrent que les stations les plus éloignées de l'embouchure et localisées dans le nord du secteur restent sous l'influence des eaux douces. Aux alentours immédiats du Creek, l'influence des eaux douces devient progressivement plus modérée et concerne une tranche d'eau chaque fois plus réduite. La turbidité globale et les teneurs en pigments chlorophylliens diminuent nettement en fin de période en l'absence de nouvelles précipitations atmosphériques entre le 15 et le 23 mai.

En ce qui concerne, l'Ile Ouen, les profils obtenus démontrent que les caractéristiques des masses d'eau sont inchangées et correspondent à celles habituellement mesurées dans ce secteur du lagon sud de Nouvelle Calédonie.

Déversement accidentel du 06-07 mai 2014

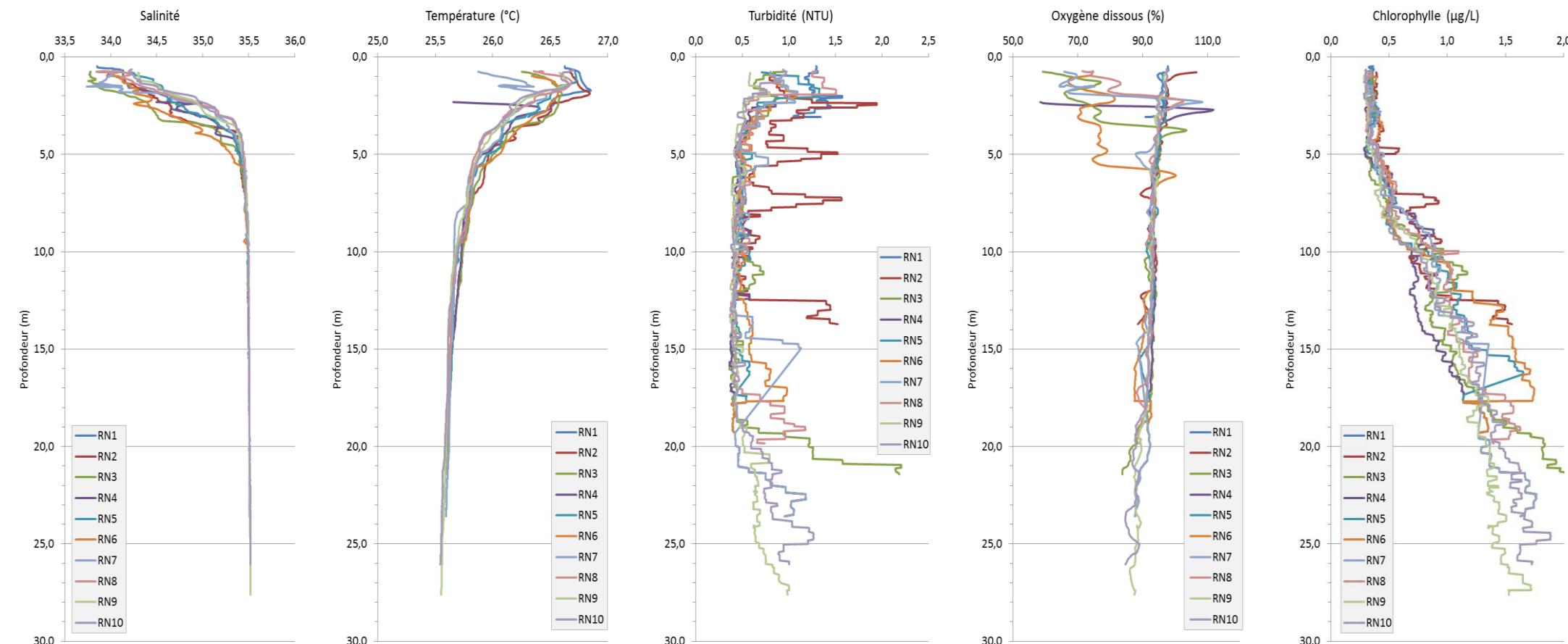


Figure 9 : Profils multiparamétriques des eaux de la Rade Nord pendant la mission du 07 mai 2014.

2. Mesure du pH

a) Mission du 07 mai 2014

Les résultats montrent que les valeurs de pH mesurées le 7 mai dans les eaux de mer, quelques heures après le déversement de la solution acide dans le Creek, sont caractéristiques de celles de l'eau de mer ; ces valeurs étaient comprises entre 8,21 et 8,26. Aucune acidité n'a été décelée dans la totalité des prélèvements effectués dans la Rade du Nord, les pH étant comparables aux mesures réalisées en avril 2014 antérieures à l'accident (Annexe 2).

De surcroit, ces valeurs sont en conformité avec les données historiques obtenues depuis la définition de l'Etat de Référence de la colonne d'eau (2007-2008).

Ces observations montrent que l'« effet-tampon » des eaux de mer fortement carbonatées des milieux lagunaires a joué son rôle et a permis de rapidement modérer l'acidité des eaux du Creek induite par les effluents du bassin SX (Effluents « Raffinerie ») dont le pH est voisin de 1.

Ces effluents (96 m^3) ont été déversés à raison d'un débit moyen estimé à $7,3 \text{ L/s}$. Ils ont été dilués par différents contributeurs au cours de leur progression dans le Creek, puisque la valeur du pH aux stations de surveillance U7 et U13 situées approximativement à 470 et 1000 m de l'usine, a d'abord chuté à environ 3,5 (début de la fuite), pour finir progressivement à 2,5. Ces valeurs indiquent que le taux de dilution au niveau des stations U7 et U13 a atteint, au minimum, un facteur 10 avant l'arrêt de la fuite. Ce taux est confirmé par les résultats d'analyses de Na, Cl mais aussi de Ni et Zn (par exemple) effectuées dans les eaux du bassin SX et dans les échantillons d'eau collectés à ces deux stations de suivi pendant toute la durée de la fuite. En effet, les ratios de concentrations montrent, à l'évidence, que la dilution était comprise entre 50 et 10, correspondant respectivement, au début des opérations de pompage et au moment de l'arrêt de celles-ci.

Par ailleurs, si l'on extrapole les résultats des jaugeages de Vale-NC effectués en 2008 et 2009, d'une part, et d'autre part, on estime le volume du cours inférieur (partie élargie du Creek avant l'embouchure), le taux de dilution minimum aux stations U7 et U13 semble pouvoir être au moins multiplié par 2. Dans ce cas, une approximation conduit à estimer le pH à l'embouchure aux environs de 3,5 pour terminer à 3,0 comme valeur plancher, avant de remonter avec l'arrêt de la fuite (le pH naturel du Creek étant de 7,8 environ).

Dans ces conditions, à raison d'un débit moyen de $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ calculé sur 10 ans (Données Vale-NC, dossier ICPE), les eaux du Creek à leur arrivée en mer ont sans doute été rapidement neutralisées par la présence des carbonates ($2,30 \pm 0,07 \text{ meq/L}$).

b) Evolution du pH entre le 07 et le 23 mai

Pour les quatre missions successives, les valeurs du pH confirment l'absence d'impact mesurable des eaux acidifiées du Creek de la Rade Nord sur les eaux marines, les mesures étant toutes comprises dans les normales habituellement obtenues en milieu marin (Tableau 2 et Figure 10).

Bien que du même ordre, les variations de pH observées entre les stations d'une même mission sont plus importantes pour la couche de surface (0,50 m) que dans les eaux de mi-profondeur. Cette différence exprime l'impact des eaux douces moins denses qui alimentent la Rade Nord, en fonction

des conditions météorologiques et notamment des quantités de pluies cumulées et de leur fréquence ; les couches intermédiaires n'étant pas directement concernées.

Tableau 2 : Valeur des pH mesurés dans les eaux de surface (0,50cm) et à mi-profondeur pour l'ensemble des stations de suivi de chacune des 4 missions d'échantillonnage.

Mission		7-mai	12-mai	15-mai	23-mai
Surface	Min	8,210	8,100	8,190	8,200
	Max	8,260	8,240	8,350	8,600
Mi-profondeur	Min	8,210	8,150	8,240	8,210
	Max	8,260	8,230	8,310	8,270

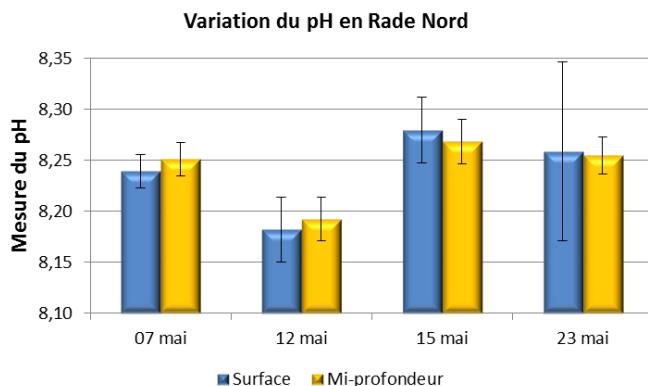


Figure 10 : Valeurs moyennes et écart-types du pH mesuré dans les eaux de surface (0,50 m) et à mi profondeur pour chacune des 4 missions de suivi (07, 12, 15 et 23 mai) dans la zone d'expansion du Creek de la Rade Nord.

Ce qu'il faut retenir

Aucun impact des eaux acidifiées n'est mesurable dans la zone d'expansion du Creek de la Rade Nord. Ces observations sont en parfait accord avec les données multiparamétriques, reflet de l'évolution temporelle et spatiale de la structure des masses d'eau qui traduisent successivement les phénomènes de dilution des apports notables en eau douce du 06 mai, puis les pluies éparses de la mi-mai et enfin, la mise en place d'une période sèche jusqu'à la fin du mois.

3. Métaux dissous

Pour les 4 missions de suivi des impacts, les métaux analysés ont été : Cd, Co, Cu, Cr(VI), Fe, Mn, Ni, Pb et Zn. Les résultats sont listés en Annexe 2 et les valeurs extrêmes sont regroupées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Concentrations minimales et maximales pour Cd, Co, Cu, Cr(VI), Fe, Mn, Ni et Zn dans les eaux prélevées les 07, 12, 15 et 23 mai 2014 dans la zone d'expansion du Creek de la Rade Nord.

		Cd ($\mu\text{g/L}$)	Co ($\mu\text{g/L}$)	Cu ($\mu\text{g/L}$)	Cr(VI)	Fe ($\mu\text{g/L}$)	Mn ($\mu\text{g/L}$)	Ni ($\mu\text{g/L}$)	Pb ($\mu\text{g/L}$)	Zn ($\mu\text{g/L}$)
07-mai	Min	0,02	0,94	0,02	0,29	0,07	1,64	5,81	<0,02	5,05
	Max	0,02	30,98	0,12	0,60	1,98	29,24	140,60	<0,02	138,64
12-mai	Min	<0,02	0,09	0,02	0,14	0,02	0,61	0,48	<0,02	0,18
	Max	<0,02	0,92	0,02	3,77	0,15	8,71	11,72	<0,02	2,37
15-mai	Min	<0,02	0,08	0,02	0,17	0,02	0,32	0,61	0,02	0,17
	Max	<0,02	0,96	0,15	3,90	0,16	8,01	11,25	0,06	3,11
23-mai	Min	<0,02	0,09	0,02	0,14	0,02	0,61	0,48	<0,02	0,18
	Max	<0,02	0,92	0,02	3,77	0,15	8,71	11,72	<0,02	2,37

Les concentrations en Co, Ni, Cr(VI) et Mn dissous mesurées pour les 4 missions de suivi du 07, 12, 15 et 23 mai sont représentées aux Figure 12, Figure 13, Figure 14 et Figure 15.

a) Mission du 07 mai 2014

(1)Eaux de surface

Dans les eaux de surface, les métaux Co Fe, Mn et surtout Ni et Zn sont présents en concentrations nettement supérieures aux normales mesurées habituellement dans ce secteur (Figure 12, Figure 13, Figure 14 et Figure 15). Seuls Cd et Pb ne sont quasiment pas mesurables, les valeurs étant, pour la plupart, en dessous des limites de quantification (<0,02 µg/L). Les concentrations en Cu sont faibles et ne montrent pas d'anomalies particulières, tout comme Cr(VI), malgré des valeurs tout de même plus fortes près de l'embouchure qu'au milieu de la Rade Nord (Figure 12).

Les valeurs maximales pour les échantillons du 07 mai (Tableau 2) font apparaître des concentrations en forte, voire très forte, augmentation. Ces maxima concernent les stations RN02 et RN07 localisées respectivement au nord-ouest de l'embouchure et au droit de celle-ci ; les valeurs mesurées en surface sont respectivement plusieurs fois plus élevées que les concentrations maximales historiques :

- Co : 28,1 et 30,1 µg/L, soit 115 fois ;
- Mn : 28,6 et 29,2 µg/L, soit 7 fois ;
- Ni : 137,4 et 140,6 µg/L, soit 98 fois ;
- Zn : 133,78 et 138,6 µg/L, soit 107 fois.

En mer, ces concentrations représentent des taux de dilution respectivement de 2874, 3545, 3902 et 3532 pour Co, Mn Ni et Zn, soit une dilution moyenne de la solution de 3463 ± 429 .

Pour ce même secteur, les valeurs minimales (Tableau 4) montrent une très légère augmentation des concentrations pour 3 métaux : Co, Ni et Zn. En effet, les valeurs mesurées sont encore environ 4 fois plus élevées qu'en moyenne depuis la définition de l'Etat de Référence physico-chimique de la colonne d'eau (2007/2008). Pour les autres métaux, les concentrations minimales sont du même ordre de grandeur que précédemment.

(2)Eaux de mi-profondeur

Les eaux mi-profondeur n'ont quasiment pas été affectées par les apports d'eau douce provenant du Creek de la Rade Nord, aucune augmentation des concentrations en métaux dissous significativement n'a été observée ; les valeurs sont demeurées dans les gammes de concentrations habituellement rencontrées dans cet environnement.

Cette constatation est conforme aux prévisions de la modélisation hydrodynamique et aux mesures multiparamétriques (CTD) qui montrent un confinement des eaux douces du Creek dans une couche de surface dont l'importance dépend des conditions hydro-climatiques (vent, pluie, marée) du moment, avant de se diluer progressivement en direction du large.

Tableau 4 : Concentrations ($\mu\text{g/L}$) obtenues le 07 mai 2014 pour les eaux de surface et de mi-profondeur pour Ni, Co et Mn et comparaison avec les valeurs habituellement mesurées à la station St15 du suivi réglementaire (Les stations St15 et RN04 sont comparables).

Station	Concentration Ni Surface ($\mu\text{g/L}$)	Concentration Ni Mi-profondeur ($\mu\text{g/L}$)	Station	Concentration Co Surface ($\mu\text{g/L}$)	Concentration Co Mi-profondeur ($\mu\text{g/L}$)	Station	Concentration Mn Surface ($\mu\text{g/L}$)	Concentration Mn Mi-profondeur ($\mu\text{g/L}$)
RN1	82,5		RN1	14,9		RN1	17,1	
RN2	137,4	1,7	RN2	28,1	0,47	RN2	29,2	4,3
RN3	71,2	0,9	RN3	14,8	0,19	RN3	15,7	0,8
RN4	61,4	0,6	RN4	11,5	0,10	RN4	12,9	0,3
RN5	27,0	1,1	RN5	5,1	0,20	RN5	6,2	0,5
RN6	5,8	0,6	RN6	0,9	0,10	RN6	1,6	0,2
RN7	140,6	0,7	RN7	31,0	0,13	RN7	28,6	0,3
RN8	89,3	0,7	RN8	19,2	0,14	RN8	19,0	0,4
RN9	50,2	0,5	RN9	10,7	0,09	RN9	10,6	0,2
RN10	31,6	0,5	RN10	6,8	0,09	RN10	6,8	0,2
ST15 moyenne	$0,6 \pm 0,4$	$0,3 \pm 0,1$	ST15 moyenne	$0,1 \pm 0,1$	$0,05 \pm 0,01$	ST15 moyenne	$0,6 \pm 0,3$	$0,3 \pm 0,2$
ST15 Maximale	1,4	0,4	ST15 Maximale	0,3	0,07	ST15 Maximale	1,3	0,7

b) Mission du 12 mai 2014

(1) Eaux de surface

Les analyses réalisées sur les eaux prélevées le 12 mai montrent que les concentrations des principaux traceurs comme Co, Fe, Mn, Ni et Zn (Figure 12, Figure 13, Figure 14 et Figure 15) ont été divisées, respectivement par 34, 13, 3, 12 et 59. Ces taux de dilution équivalent encore à des niveaux de concentration très élevés, puisque respectivement ils sont de :

- 3,5 fois la valeur maximale pour Co ;
- 2 fois pour celle de Mn ;
- 8 fois pour celle de Ni ;
- 2 fois pour celle de Zn, approximativement.

Toutefois, ces concentrations indiquent qu'un retour assez rapide aux normales habituellement mesurées dans la Rade Nord s'est amorcé.

Les prélèvements réalisés à l'embouchure du Creek (RN12) et au sud de celle-ci (RN14) montrent des valeurs encore élevées en Co, Mn, Ni et Zn. Si ces fortes concentrations reflètent encore les apports au droit du Creek (RN12), les valeurs mesurées à la station RN14 traduisent la persistance de lentilles d'eau peu diluées en raison d'un hydrodynamisme de faible intensité.

Remarque : une étude sédimentaire antérieure (Fernandez et al., 2006) a permis de mettre évidence au niveau de la station RN14, l'existence d'une aire favorable à l'accumulation préférentielle de particules de très faible diamètre (Figure 11). La présence de Mn, dont l'affinité pour les particules organo-minérales est reconnue, conforte cette hypothèse.

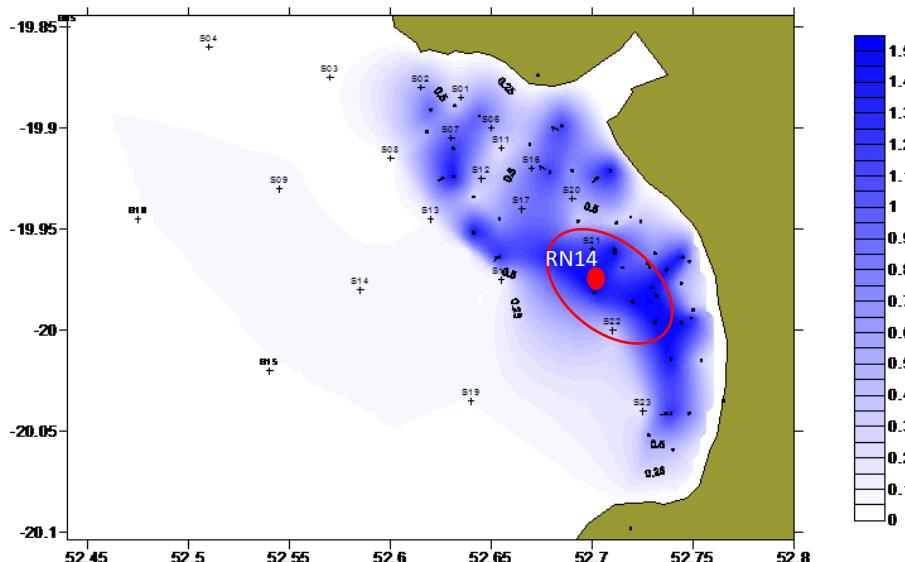


Figure 11: Estimation des surfaces impactées et des volumes de sédiments déposés dans la zone d'expansion du creek de la Rade Nord. Zones de sédimentation préférionales des particules de petits diamètres correspondant à une aire hydrodynamique de faible intensité (cercle rouge) (Fernandez et al., 2006).

Les concentrations en Cr(VI) relativement élevées, mesurées respectivement 3,77 µg/L en RN11 et 2,21 µg/L en RN12 (Figure 2), correspondent avec des aires de dépôts de chromite localisés le long des berge de l'embouchure même du Creek de la Rade Nord ; l'acidification du milieu ayant pu accélérer la dissolution d'une infime fraction de ces minéraux cependant très résistants à l'altération.

Au niveau de toutes les autres stations, la concentration de tous les métaux est de l'ordre des valeurs habituellement obtenues en Rade Nord.

(2) Eaux de mi-profondeur

Les eaux de mi-profondeur n'ont pas montré d'impact par les apports d'eau douce provenant du Creek, aucune augmentation des concentrations en métaux dissous n'a été observée ; les valeurs sont toutes demeurées dans les gammes de concentrations habituellement rencontrées dans cet environnement, pour toutes les stations.

Remarque : le manganèse dissous ayant la propension à rapidement s'associer aux particules sédimentaires organo-minérales (Figure 11), il est intéressant d'observer qu'un transfert sensible de ce métal depuis la couche de surface vers les couches intermédiaires s'est opéré. Ce transfert se traduit par une très légère augmentation des concentrations en Mn dissous à mi-profondeur, niveaux qui restent, par ailleurs, dans la gamme des valeurs historiques.

c) Mission du 15 mai 2014

(1) Eaux de surface

Cette troisième mission a permis de mettre en évidence un retour global aux conditions normales, exception faite de Ni dont les concentrations ont augmenté dans les eaux de surface (Figure 12, Figure 13, Figure 14 et Figure 15). Par ailleurs, deux stations montrent des concentrations encore élevées pour l'ensemble des métaux : RN08 et RN12 (Annexe 2). Pour la station RN08, les valeurs sont encore

environ plus d'un facteur 2 pour Co, 3 pour Cr(VI), 2 pour Mn et 5 pour Ni. Pour les autres métaux les concentrations sont dans les gammes habituelles.

A la station RN12, les concentrations sont du même ordre qu'en RN08, toutefois, la localisation de la station dans la zone intertidale a conduit à échantillonner une eau de rivière encore peu diluée et naturellement plus concentrée en métaux.

(2) Eaux de mi-profondeur

Les eaux de mi-profondeur n'ont pas montré d'empreinte par les apports d'eau douce provenant du Creek de la Rade Nord, exception faite de Mn, aucune augmentation des concentrations en métaux dissous n'a été observée ; les valeurs sont demeurées dans les gammes de concentrations habituellement rencontrées dans cet environnement.

Remarque : pour Mn, les mécanismes de transfert vers les couches intermédiaires se sont poursuivis. En effet, les concentrations en Mn dissous ont augmenté de manière significative dans les eaux de mi-profondeur, accroissement qui ne concerne pas encore les couches de fond. Par exemple à la station RN08 (proche embouchure), la concentration à mi-profondeur est passée de 0,36 µg/L le 7 mai à 0,50 µg/L le 12 mai et 3,06 µg/L le 15 mai. Dans le même temps et pour la même station la concentration pour les autres métaux restait relativement stable.

d) Mission du 23 mai 2014

(1) Eaux de surface

Cette quatrième mission a confirmé un retour aux conditions normales ; bien que les concentrations en Ni soient encore un peu élevées dans les eaux de surface, elles demeurent inférieures aux maximas observés depuis 2007/2008 (Figure 12, Figure 13, Figure 14 et Figure 15).

Par ailleurs, les stations dans le lit du Creek (RN23, RN11) et dans la zone de mélange (RN12) montrent des concentrations élevées pour tous les métaux ; dans le prolongement en direction du large, les stations proches de l'embouchure (RN01, RN02) possèdent également des concentrations notables.

De part et d'autre de l'embouchure (RN14, RN15), les concentrations notamment en Ni, sont encore élevées (Tableau 3).

Pour la station RN04 (équivalente à St15 du suivi réglementaire), les valeurs sont proches des normales historiques quel que soit le métal considéré.

En ce qui concerne Cr(VI), à cette station (RN04), les concentrations des eaux marines sont tout à fait comparables (0,41 µg/L aux normales historiques observées à la station St15 (0,44 ±0,31 µg/L). Les seules concentrations élevées sont mesurées, soit dans le lit du Creek (5,72 µg/L pour RN11 et 5,78 pour RN23), soit dans la zone de mélange des eaux douces et marines (environ 1 µg/L en RN01, RN12, RN15) ; les valeurs mesurées dans les eaux douces atteignant couramment 5 à 20 µg/L, comme dans les creeks Bien-Sûr, Pandanus et Coco, La Coulée, Kwé, Wajan, Rivière Bleue. (Bouichet, 2004 ; Le Grand, 2005 ; Moreton et al., 2009).

(2)Eaux de mi-profondeur

Les eaux de mi-profondeur n'ont plus montré de concentrations anormales y compris pour Mn; les valeurs figurent à présent dans les gammes de concentrations habituellement rencontrées dans cet environnement.

Remarque : pour Mn, les mécanismes de transfert vers les couches intermédiaires semblent avoir cessé, une fraction importante de ce métal ayant probablement sédimenté avec les particules. En effet, les concentrations en Mn dissous ont diminué de manière significative dans les eaux de mi-profondeur. Par exemple à la station RN08 (proche embouchure), la concentration à mi-profondeur est passée successivement de 0,36 µg/L (07 mai) à 0,50 µg/L (12 mai), 3,06 µg/L (15 mai) pour revenir enfin à 0,38 µg/L (23 mai).

Ce qu'il faut retenir

Des analyses des principaux métaux dissous d'intérêt (Co, Cr(VI), Mn, Ni et Zn), il ressort de manière globale que les concentrations mesurées lors de la première mission (07 mai), ont été bien plus élevées que celles habituellement obtenues en Rade Nord. Cette augmentation a atteint au-moins deux ordres de grandeur pour Co, Ni et Zn dans les heures qui ont suivi le déversement de la solution acide en mer ; les niveaux de concentrations ont été ensuite divisés par 30, 15 et 50, respectivement, au terme de 5 jours (12 mai). Les analyses du 15 mai et les suivantes ont montré un retour aux concentrations globalement normales.

Les concentrations les plus importantes ont été systématiquement mesurées dans les eaux de surface, c'est-à-dire dans la couche des 50 premiers centimètres sous l'interface ; dans les eaux de mi-profondeur les concentrations ont été bien inférieures et se sont rapprochées très nettement de celles habituellement mesurées dans l'environnement marin de l'embouchure du Creek de la Rade Nord mais aussi des systèmes du même type.

Dans la zone de prélèvement, les concentrations se sont distribuées globalement selon un gradient « côte-large », quelle que soit la mission et la radiale considérée. Toutefois, le nord et l'ouest de la zone ont montré quelques valeurs sensiblement plus élevées qu'au droit du Creek même 8 jours après l'accident.

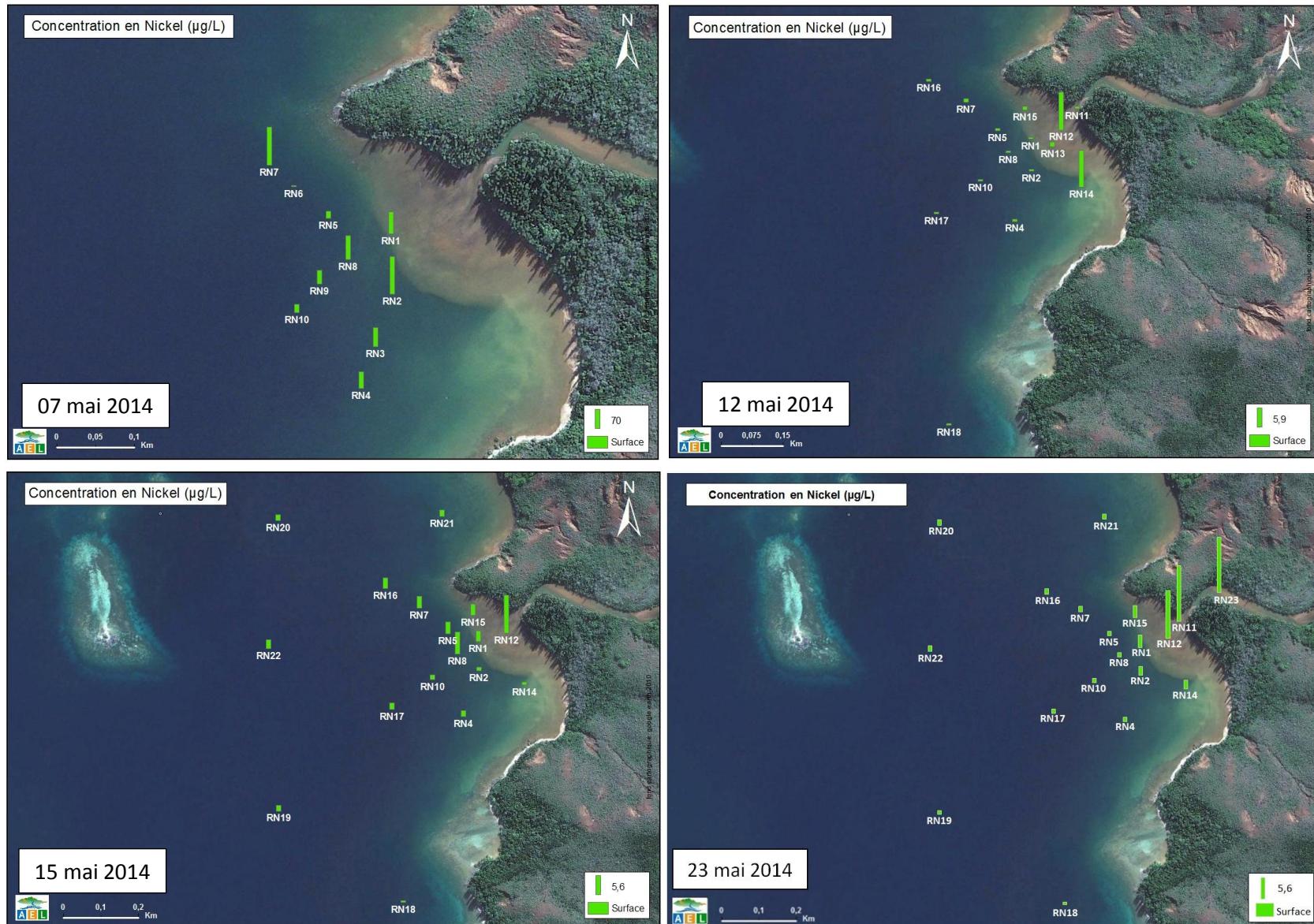


Figure 12 : Evolution des concentrations en Nickel dans les eaux lagonaires de la Rade Nord, entre le 07 et le 23 mai 2014.

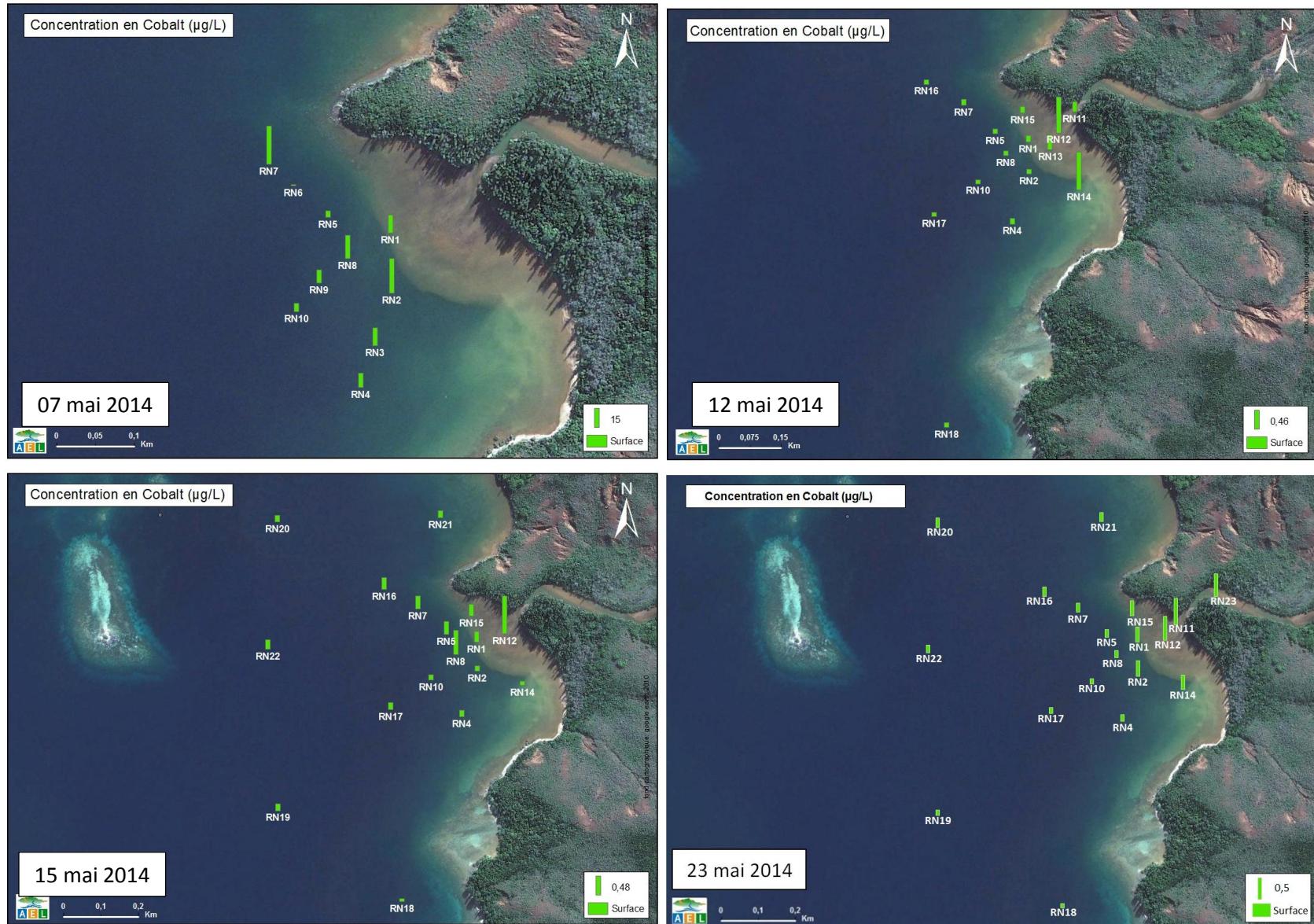


Figure 13 : Evolution des concentrations en Cobalt dans les eaux lagonaires de la Rade Nord, entre le 07 et le 23 mai 2014.

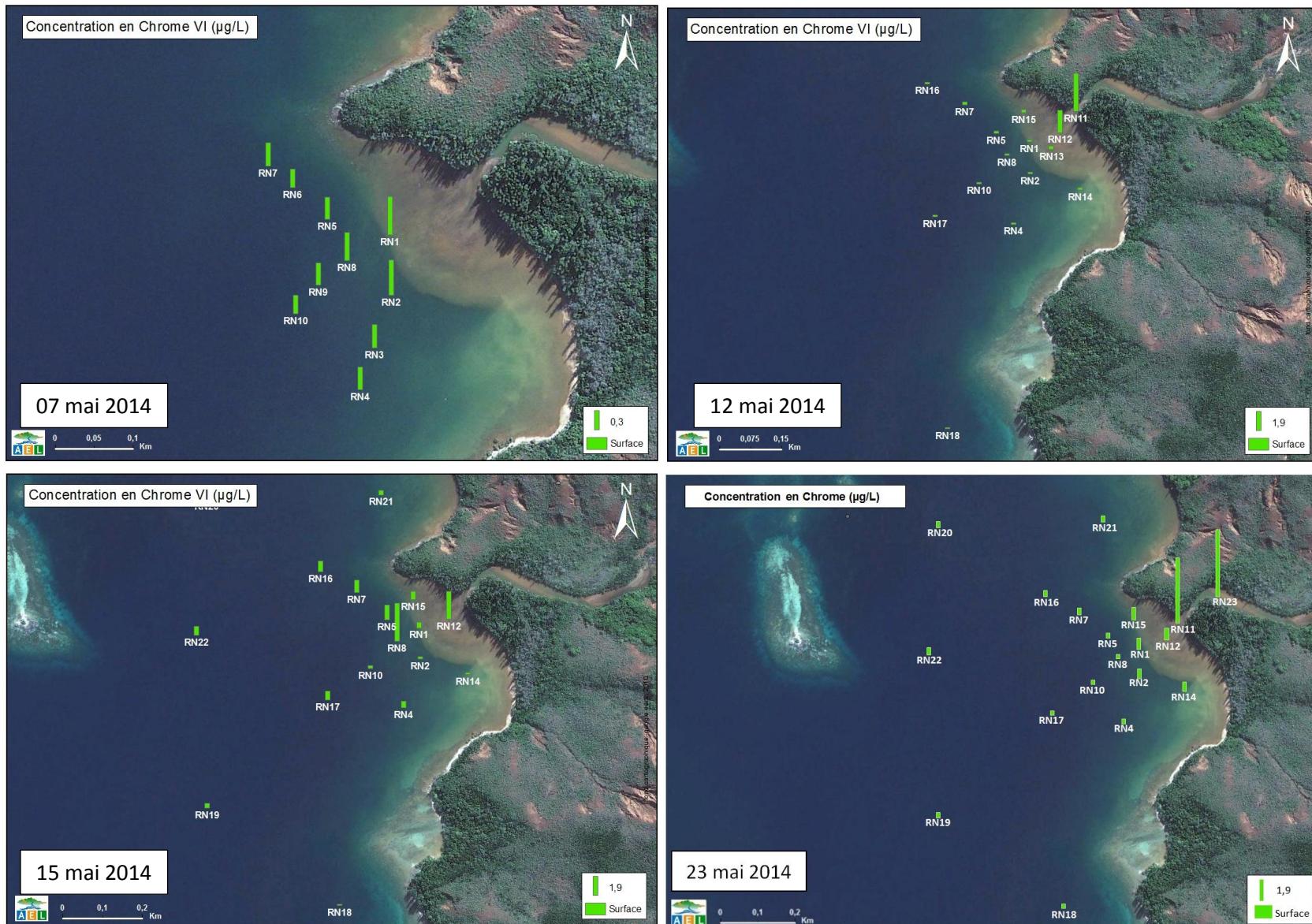


Figure 14 : Evolution des concentrations en Chrome-VI dans les eaux lagonaires de la Rade Nord, entre le 07 et le 23 mai 2014.

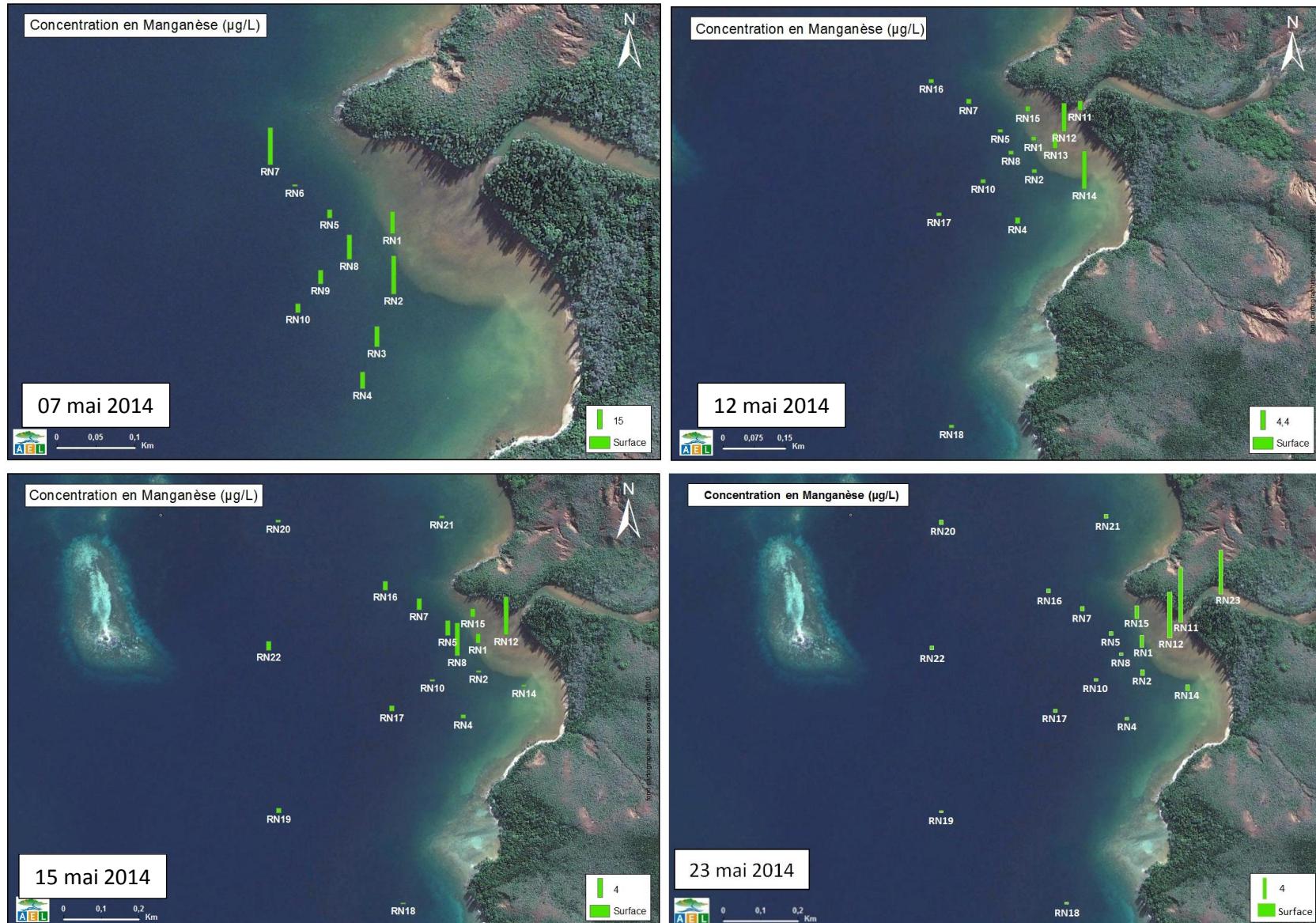


Figure 15 : Evolution des concentrations en Chrome-VI dans les eaux lagonaires de la Rade Nord, entre le 07 et le 23 mai 2014.

4. Synthèse de l'évolution spatio-temporelle des métaux

a) Eaux de surface

Pour chacune des stations, les concentrations mesurées dans les eaux de surface ont évolué avec une relative rapidité. En effet, l'évacuation et/ou la dilution des eaux concentrées en métaux est nette puisque 5 jours après l'arrêt du déversement, quasiment toutes les concentrations sont revenues aux valeurs normales observées dans la Rade Nord (Figure 16).

Toutefois, durant la troisième mission (15 mai), soit 3 jours plus tard, en relation probable avec les pluies des 13, 14 et 15 mai, les concentrations ont augmenté à nouveau, sans cependant atteindre ni dépasser, dans la plupart des stations, les valeurs maximales observées depuis la définition de l'Etat de Référence de 2007/2008 (St15).

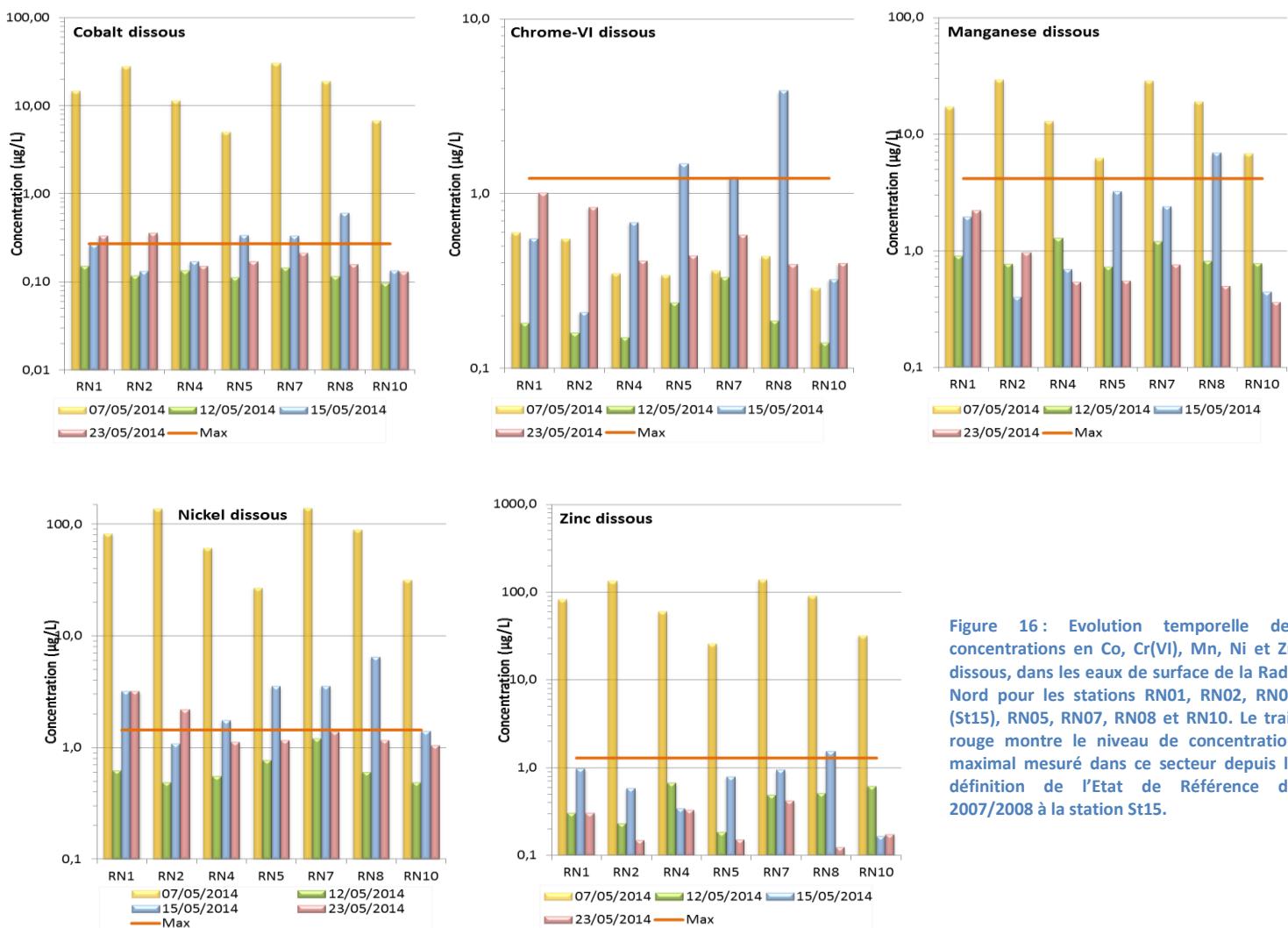


Figure 16 : Evolution temporelle des concentrations en Co, Cr(VI), Mn, Ni et Zn dissous, dans les eaux de surface de la Rade Nord pour les stations RN01, RN02, RN04 (St15), RN05, RN07, RN08 et RN10. Le trait rouge montre le niveau de concentration maximal mesuré dans ce secteur depuis la définition de l'Etat de Référence de 2007/2008 à la station St15.

A l'inverse, dans le cas de Ni, quasiment toutes les concentrations mesurées ont atteint, voire dépassé, son maxima historique, ce métal possédant la propension reconnue à rester en solution sous une forme faiblement complexée. Cette caractéristique a probablement permis de tracer les

mouvements des masses d'eau de surface sujettes aux changements de conditions hydro-climatiques. En effet, les régimes de vents qui se sont installés au secteur sud-est à partir du 10 mai ont repoussé ainsi globalement vers le nord, les eaux marquées par les métaux.

Pour la 4^{ème} mission (23 mai), toutes les valeurs sont repassées sous les maxima historiques exception faite de Ni et Co, mais seulement aux deux stations RN01 et RN02 localisées dans la proximité immédiate de l'embouchure sous l'influence directe du Creek.

Pour Zn, les fortes concentrations mesurées le 07 mai ont rapidement diminué ne montrant plus, par la suite de variations notables dans les eaux ; son affinité pour la matière organique (MO) avec laquelle il forme des complexes stables, est probablement une des explications de cette baisse des concentrations de sa forme dissoute.

b) Eaux de mi-profondeur

Pour l'ensemble des métaux, exception faite de Mn, les eaux de mi-profondeur n'ont quasiment pas été concernées par les fortes concentrations apportées par le Creek ou très ponctuellement ; les valeurs sont demeurées inférieures aux concentrations maximales observées dans ce secteur. A l'inverse, les concentrations de Mn sont notables dans les eaux de mi-profondeur, quantités qui sont supérieures aux normales observées en St15 (Figure 17). Ces niveaux de concentration s'expliquent par :

- de fortes aptitudes pour la formation de colloïdes (oxy-hydroxydes de Fe-Mn) ;
- des affinités pour la sorption sur des particules organo-minérales qui sédimentent.

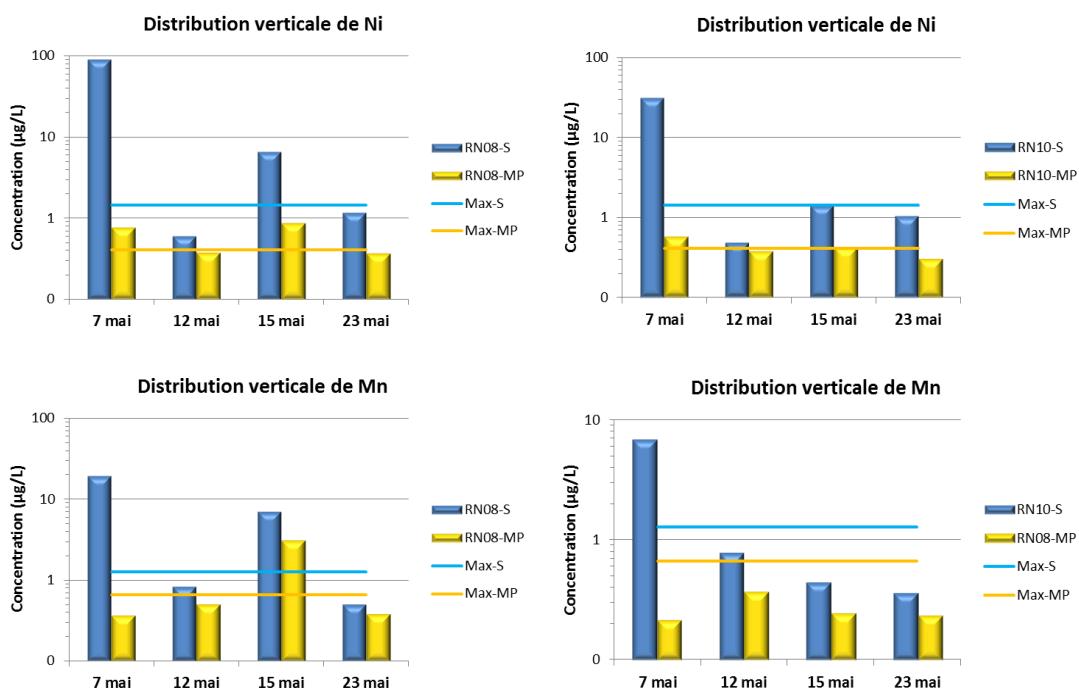


Figure 17 : Evolution des concentrations de Ni et Mn dissous dans les couches de surface (S) et de mi-profondeur (MP) pour les missions du 07, 12, 15 et 23 mai 2014. Le trait bleu clair indique la concentration maximale observée dans les eaux de surface (Max-S) depuis la définition de l'Etat de Référence de 2007/2008 à la station St15 ; le trait orangé indique la concentration maximale observée dans les eaux de mi-profondeur (Max-MP).

La conjonction de ces phénomènes physico-chimiques favorise le transfert du Mn vers les couches profondes par sédimentation des matières en suspension (MES) auxquelles il s'est associé. Ces mécanismes sont particulièrement observables aux stations RN08, RN10 et RN14.

5. Modélisation hydrodynamique

Le travail ici présenté s'inscrit dans la continuité des études de modélisation hydrodynamique réalisées par l'IRD entre 2006 et 2009, un des objectifs étant la description des phénomènes de dispersion des effluents dans le Canal de la Havannah (Convention IRD/Goro-Ni n°1124).

L'évolution verticale de la dilution du panache a été abordée au travers de coupes orientées globalement NE-SW, c'est-à-dire depuis le terme source (Creek de la Rade du Nord) vers le large (Ilot Gabriel). Les résultats sont présentés dans l'annexe 3.

a) Généralités

La fuite d'acide sulfurique survenue le 01 avril 2009 a mis en exergue la nécessité de mettre en place des simulations hydrodynamiques pour mieux comprendre la dispersion des panaches et évaluer les impacts. En effet, cet accident avait, non seulement, durement affecté le Creek de la Rade Nord (CRN), mais concerné sa zone d'expansion dans la Rade Nord (Convention IRD/Vale-Inco n°2284) ; les simulations réalisées avec le modèle disponible à maille large (180m) ayant alors permis de mieux cerner l'emprise géographique du rejet de solution acide.

En 2009, une description des impacts environnementaux de cet accident sur le milieu récepteur, à différentes échelles de temps (court, moyen et long terme), avait été donc fournie à Vale-NC. En particulier, elle ciblait le devenir des métaux dans la colonne d'eau et les conséquences pour le compartiment sédimentaire ainsi que sur certains organismes marins (Convention IRD/Goro-Ni n° 2120). Toutefois, cet accident avait fait la démonstration de la nécessité de disposer d'un modèle dont la réponse soit compatible avec le contexte géomorphologique. De cette constatation avait émané une demande de Vale-NC pour l'élaboration d'un modèle plus performant pour la Baie du Prony en réduisant la maille de calcul à 60m, travail qui a été conduit dès 2011 à partir du modèle phénoménologique existant.

En effet, dans cet objectif il avait été procédé au raffinement de la modélisation des courants, des phénomènes de transport et de dispersion d'un polluant potentiel dissous, accidentellement déversé dans la Baie du Prony, deux termes sources ayant été envisagés : le Creek de la Rade du Nord et le port de commerce de Vale-NC (Fernandez et al., 2012).

Les résultats issus des simulations ont été exploités dans l'objectif de :

- constituer un atlas de la dispersion des panaches respectifs dans les trois dimensions, pour différents jeux de conditions hydro-climatiques forçantes ;
- estimer les temps de résidence/renouvellement des eaux et les taux de dilution des rejets pour chacun des jeux de conditions.

b) Rappel du contexte hydro-climatique du déversement du 06/07 mai

Le déversement accidentel de la solution acide dans le Creek s'est produit quelques heures après un épisode pluvieux. Durant cet épisode, des vents faibles à très faibles ($FF < 2 \text{ m/s}$) ont effectué 3 rotations anticycloniques complètes entre, approximativement, le 06 mai à 0h00 et le 08 mai en début de matinée (Figure 8). Au-delà, les vents se sont progressivement orientés au secteur sud-est, se stabilisant à partir du 10 mai, en direction et en force, jusqu'au 15 mai.

Il est donc schématiquement envisageable de prendre en considération deux ensembles de conditions météorologiques distincts qui ont influencé successivement le devenir du panache dans la zone d'expansion du Creek :

- des conditions de vent nul entre le 06 et le 09 mai qui ont joué en défaveur de la mise en place de mécanismes de dispersion ;
- des conditions d'alizé modéré ($FF = 5 \text{ m/s}$), du 10 au 15 mai qui, à l'inverse, ont favorisé la dispersion par effet mécanique.

c) Conditions des simulations

Compte tenu des informations disponibles au moment des simulations, les conditions pour les calculs de dispersion du panache d'eau douce pénétrant la Rade Nord, ont été les suivantes :

- Le volume déversé est d'environ 96 m^3 dans le Creek, en continu pendant 15 heures (fuite constatée entre le 06 mai à 23h00 et le 07 mai à 14 h00) et arrivée en mer supposée entre 17h30 (07 mai) et 20h30 (08 mai) ;
- La concentration réelle du traceur (Ni) à l'embouchure est inconnue pour toute la durée de l'accident. Toutefois, l'hypothèse de rejet à concentrations variables en Ni est retenue. Elle est basée sur une évolution dans le temps calée sur la réponse des capteurs de conductivité. La variation est calculée en unités arbitraires (Figure 18) ;

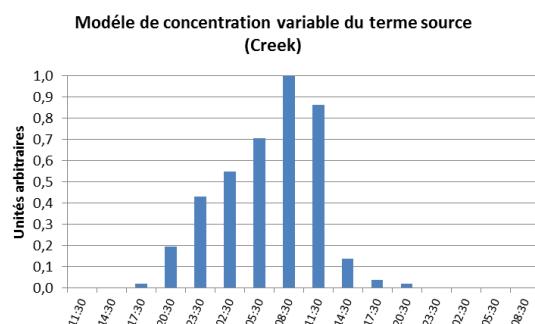


Figure 18 : Modèle de la concentration en Ni à l'embouchure du Creek de la Rade Nord (terme source). Evolution temporelle basée sur la mesure de la conductivité et exprimée en unités arbitraires pour les besoins des calculs de simulation.

- L'heure d'arrivée de l'eau marquée en mer est inconnue mais supposée à 20h30 (Figure 18), de très fortes concentrations anormales en métaux ayant été décelées dans les échantillons d'eau prélevés dès 20h45, le 07 mai ;
- Les concentrations en Ni dans les eaux de surface ont été déterminées pour les échantillons du 07 mai (mission 1) sur 10 stations réparties dans la zone d'expansion du Creek (Figure 2), puis pour les 3 autres missions du 12, 15 et 23 mai ;
- Le débit moyen décennal du Creek pris en compte est de $Q = 0,41 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette valeur est supposée constante durant les 15 heures du déversement. Toutefois, un débit variable

pourrait être pris en considération pour une meilleure précision, compte tenu de la réponse rapide d'un bassin versant aux dimensions réduites ;

- Les enregistrements des paramètres météorologiques de la station « Usine » de Vale-NC, du 06 au 26 mai, ont été pris en considération, à défaut de mesures dans la Rade du Nord ; la station AEL installée sur la balise IORO (Canal de la Havannah) mesurant des vitesses de vents surestimées par rapport à la réalité dans cette rade abritée ;
- Le calcul des ondes de marées retenues correspond à la période de simulation du 06 au 26 mai.

Remarque : Les simulations ne tiennent pas compte des précipitations atmosphériques qui se sont produites et contribuent à la dilution du panache en surface.

d) Résultats des calculs

Les extractions des différents fichiers issus des calculs sont disponibles sur demande à AEL. De même, l'ensemble des sorties graphiques horaires entre le 07 mai 18h00 et le 26 mai 00h00, soit **438 cartes**, seront présentées sur requête.

(1) Principe de calcul

Le modèle de dispersion/dilution est capable de calculer à tout moment et pour chaque maille, la concentration d'un traceur introduit dans l'eau de mer. Toutefois, pour calculer cette concentration il est nécessaire de connaître la valeur de la concentration du terme source. Dans le cas du déversement de la solution acide, la concentration de Ni de l'eau du Creek est inconnue, puisqu'à l'embouchure aucun dispositif ne permet de la mesurer.

De ce fait, les simulations ont été conduites de la manière suivante :

- La concentration du terme source est choisie arbitrairement égale à 1,0 pour réaliser les calculs ;
- La simulation fournit alors des valeurs de concentration dans l'eau de mer qui tiennent compte des différents mécanismes de dispersion/dilution ; pour chaque maille de coordonnées déterminées, les concentrations calculées en mer sont alors comprises entre 1,0 (terme source) et des valeurs infinitésimales, globalement avec l'éloignement au terme source (dilution maximale) ;
- Les lois régissant les phénomènes de dispersion/dilution doivent être considérées comme indépendantes de la concentration initiale du terme source ;
- Dans l'hypothèse d'un modèle calé du point de vue hydrodynamique, pour une maille donnée correspondant approximativement aux coordonnées d'une station de prélèvement sur le terrain, les concentrations arbitraires calculées (modèle) et les concentrations mesurées (analyses) sont directement proportionnelles.

En conséquence, les concentrations du modèle, représentées sur une échelle arbitraire du terme source égale à 1,0 et les concentrations issues des résultats d'analyse des eaux de surface prélevées le 07 mai, sont donc liées par une relation linéaire (Figure 19). Cette corrélation ($R^2=0,704$), qui est relativement robuste pour ce type de calculs, a permis d'extrapoler l'échelle de concentrations réelles et estimer une valeur du terme source en Ni dont la valeur est proche de 46 mg/L dans les eaux du Creek.

Cette valeur démontrerait que le taux de dilution de la solution acide déversée dans les eaux du Creek de la Rade Nord, pourrait ne pas excéder un facteur 12, avant de se jeter dans le lagon.

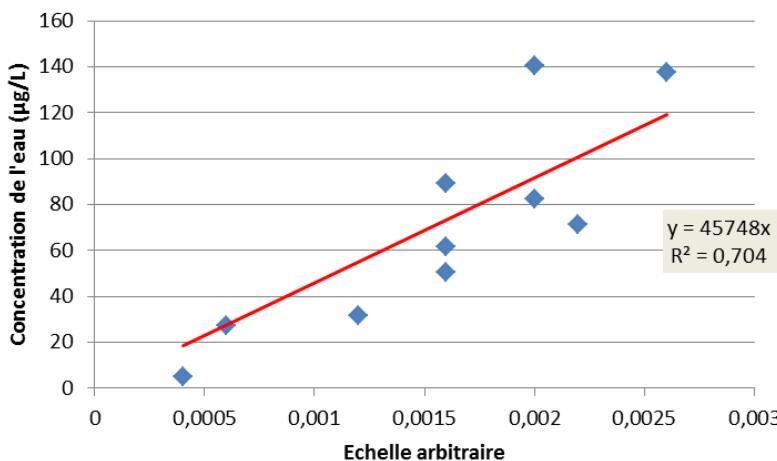


Figure 19 : Régression linéaire entre les concentrations en Ni dans les eaux de surface et les valeurs de l'échelle arbitraire aux coordonnées des stations correspondant aux prélèvements.

(2) Interprétation

Les représentations cartographiques des eaux de surface montrent que :

- d'une part, le panache est relativement homogène pendant les 12, voire les 24, premières heures après le début supposé du déversement en mer (17h30) ; les concentrations maximales atteignant plus de 250 µg/L dans la proche embouchure ;
- d'autre part, le panache est globalement centré autour de l'embouchure et se disperse lentement en auréoles concentriques (Figure 20).

Cette distribution est principalement dictée par les conditions météorologiques forçantes du moment qui structurent les masses, comme décrit précédemment. En d'autres termes, le début de déversement en mer a coïncidé avec l'absence quasi-totale de vent, régime qui s'est prolongé jusqu'au 9 mai. Cette configuration a créé une stabilité spatiale du panache, seule son étendue a légèrement progressé jusqu'en fin de période de calme météorologique, les eaux de surface étant très peu brassées.

Au droit du Creek, l'arrêt du déversement se fait sentir à la 24^{ème} heure (Figure 21) et combiné à la reprise relativement lente des régimes d'alizés de sud-est, le panache se distribue alors progressivement selon une demi-couronne centrée sur l'anse recevant le Creek. Cette distribution est particulièrement visible au terme de 48 heures (Figure 21) ; les concentrations élevées (80-90 µg/L) étant réparties sur la périphérie, les plus faibles (30-40 µg/L) au centre.

Au terme de 72 heures après le début de l'écoulement en mer, la couronne du panache la moins diluée (60-70 µg/L) s'est déplacée vers l'îlot Gabriel. Le centre du panache est relativement bien dilué (7-10 µg/L), tandis qu'au droit du Creek de la Rade Nord les concentrations redescendent fortement à moins de 3-5 µg/L. Toutefois, des volutes peu diluées qui longent les lignes de côte sud et nord de l'anse persistent.

Remarque : ces poches de panache peu diluées sont encore visibles au terme de 120 heures, c'est-à-dire 5 jours après le début du déversement (Figure 22). Ce résultat de simulation est en concordance avec les niveaux de concentration obtenus sur les échantillons prélevés le 12 mai 2014.

Au-delà de 96 heures, la reprise des alizés de secteur sud-est déstructure le panache et permet à une langue de se détacher et de se déplacer vers le sud. Cette dernière montre des concentrations en Ni encore élevées (40-50 µg/L) mais tend à se diluer rapidement. En effet, les taux de dilution font passer les concentrations en Ni au-dessous des 10 µg/L après 120 heures (mission du 12 mai 2014 ; Figure 22).

Les niveaux de concentration en Ni décroissent autour de 2 à 3 µg/L dans les eaux formant la couronne qui est encore décelable plus de 18 heures après le début du déversement en mer (mission du 15 mai 2014 ; Figure 23). Au centre et au droit du Creek, les concentrations ne sont plus que de l'ordre de 1 µg/L, valeurs normales pour ce secteur en dehors de tout événement pluvieux susceptible d'engendrer des mécanismes de lixiviation profonds des sols latéritiques.

Au-delà de ce délai, les simulations montrent que les surconcentrations en Ni dues au panache acide déversé par la Creek ne sont plus décelables (Figure 24).

Ce qu'il faut retenir

Globalement, la simulation de la dispersion montre de bonnes similitudes avec les résultats d'analyses du point de vue des mécanismes. Toutefois, les calculs dessinent une tendance à la dispersion du panache plus rapide que les résultats de terrain (analyses) ne laissent supposer. De plus, les aires échantillonnées ne couvrent pas l'ensemble du secteur qui a été potentiellement impacté.

Afin de parfaire la stratégie d'échantillonnage en cas d'accident, il apparaît donc nécessaire de s'intéresser à la mise en place d'une modélisation de type prédictif.

Le modèle hydrodynamique développé en Rade Nord doit maintenant faire l'objet d'un calage (traçage colorimétrique), cette étape étant primordiale pour la mise en œuvre d'un véritable « modèle opérationnel » capable de fournir des prédictions précises.

Ce modèle doit être supporté d'une acquisition de paramètres in-situ, transmis en « temps réel » pour alimenter les calculs

Ce développement trouvera une application directe, non seulement dans de la Baie du Prony (Creek de la Rade Nord et Port de commerce) mais également le Canal de la Havannah (diffuseur) et la Baie Kwé.

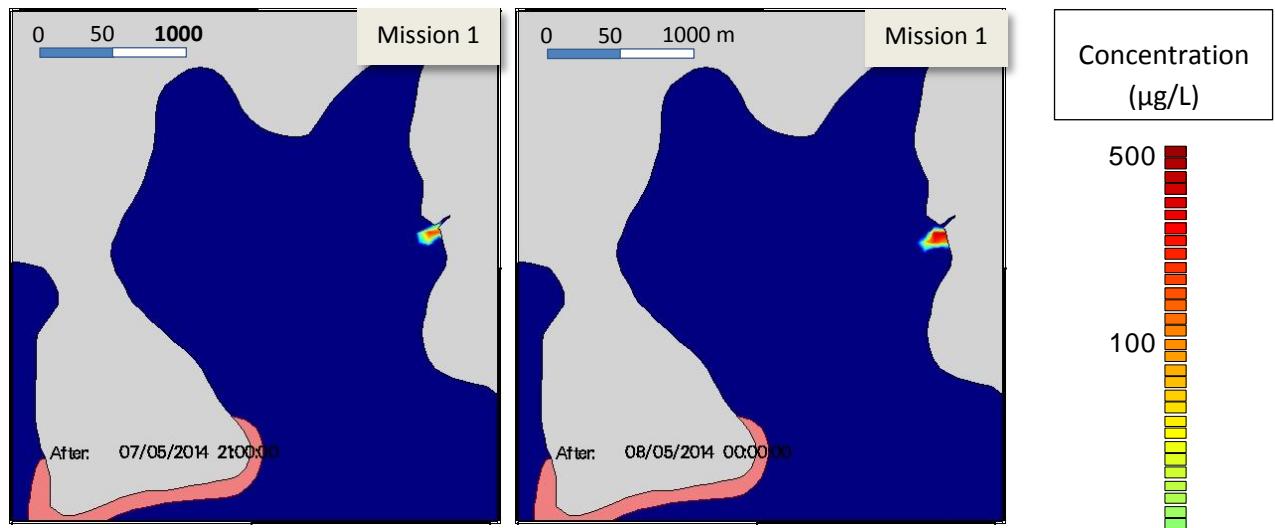


Figure 20 : Distribution du panache au droit du Creek de la Rade Nord correspondant à la collecte des échantillons d'eau durant la mission du 07 mai 2014 entre 18h00 et 00h00 approximativement. Concentrations exprimées ($\mu\text{g}/\text{L}$) en échelle logarithmique.

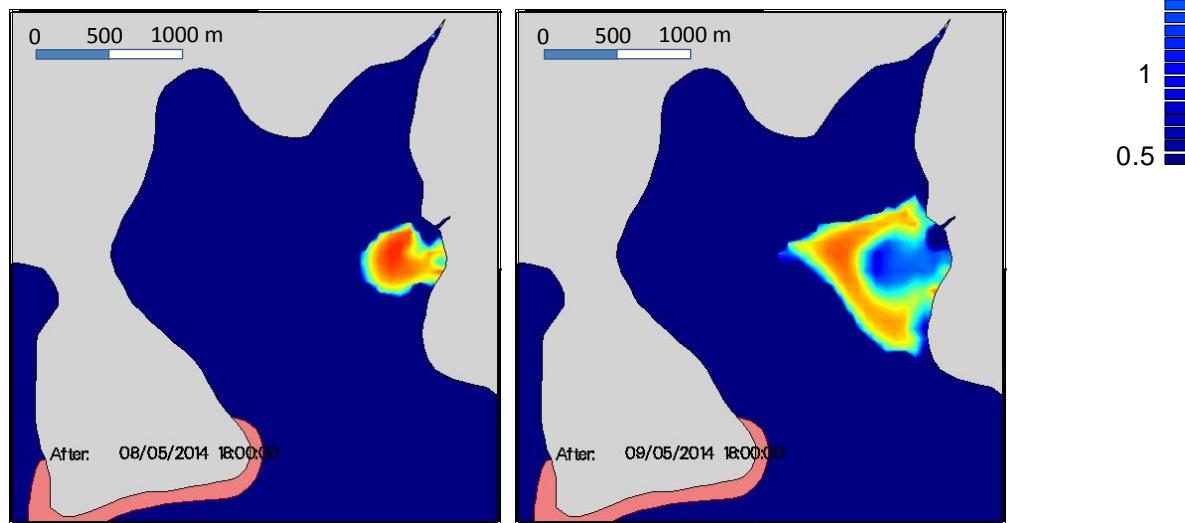


Figure 21 : Distribution du panache au droit du Creek de la Rade Nord au terme de 24 et 48 après le début du déversement en mer du panache. Concentrations exprimées ($\mu\text{g}/\text{L}$) en échelle logarithmique.

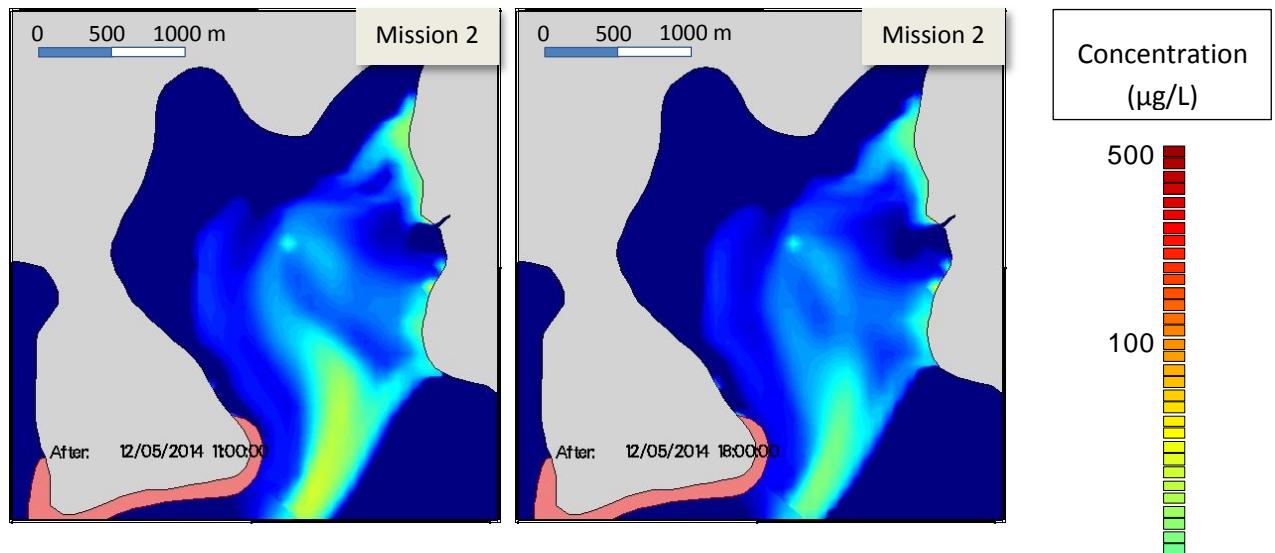


Figure 22 : Distribution du panache au droit du Creek de la Rade Nord correspondant à la collecte des échantillons d'eau durant la mission du 12 mai 2014 entre 11h00 et 18h00, approximativement. Concentrations exprimées ($\mu\text{g}/\text{L}$) en échelle logarithmique.

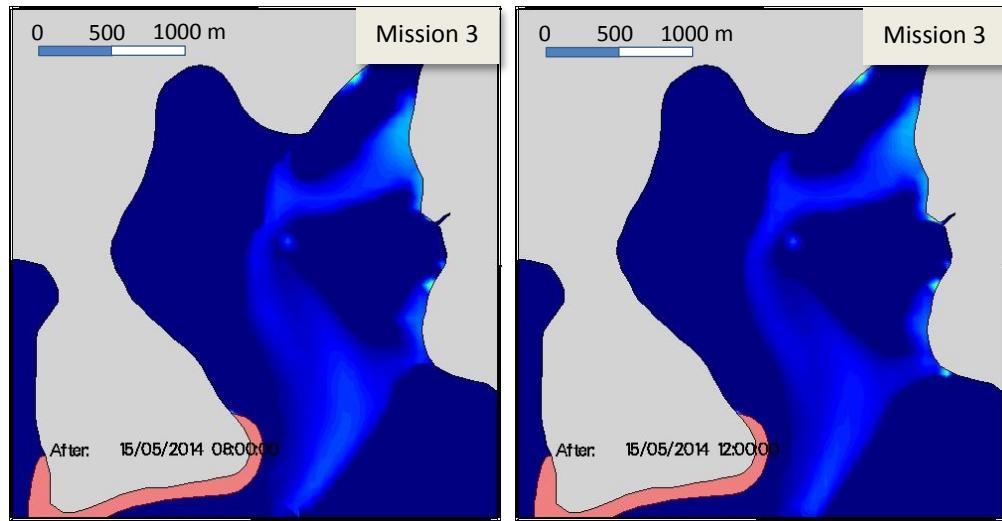


Figure 23 : Distribution du panache au droit du Creek de la Rade Nord correspondant à la collecte des échantillons d'eau durant la mission du 15 mai 2014 entre 08h00 et 12h00, approximativement. Concentrations exprimées ($\mu\text{g}/\text{L}$) en échelle logarithmique.

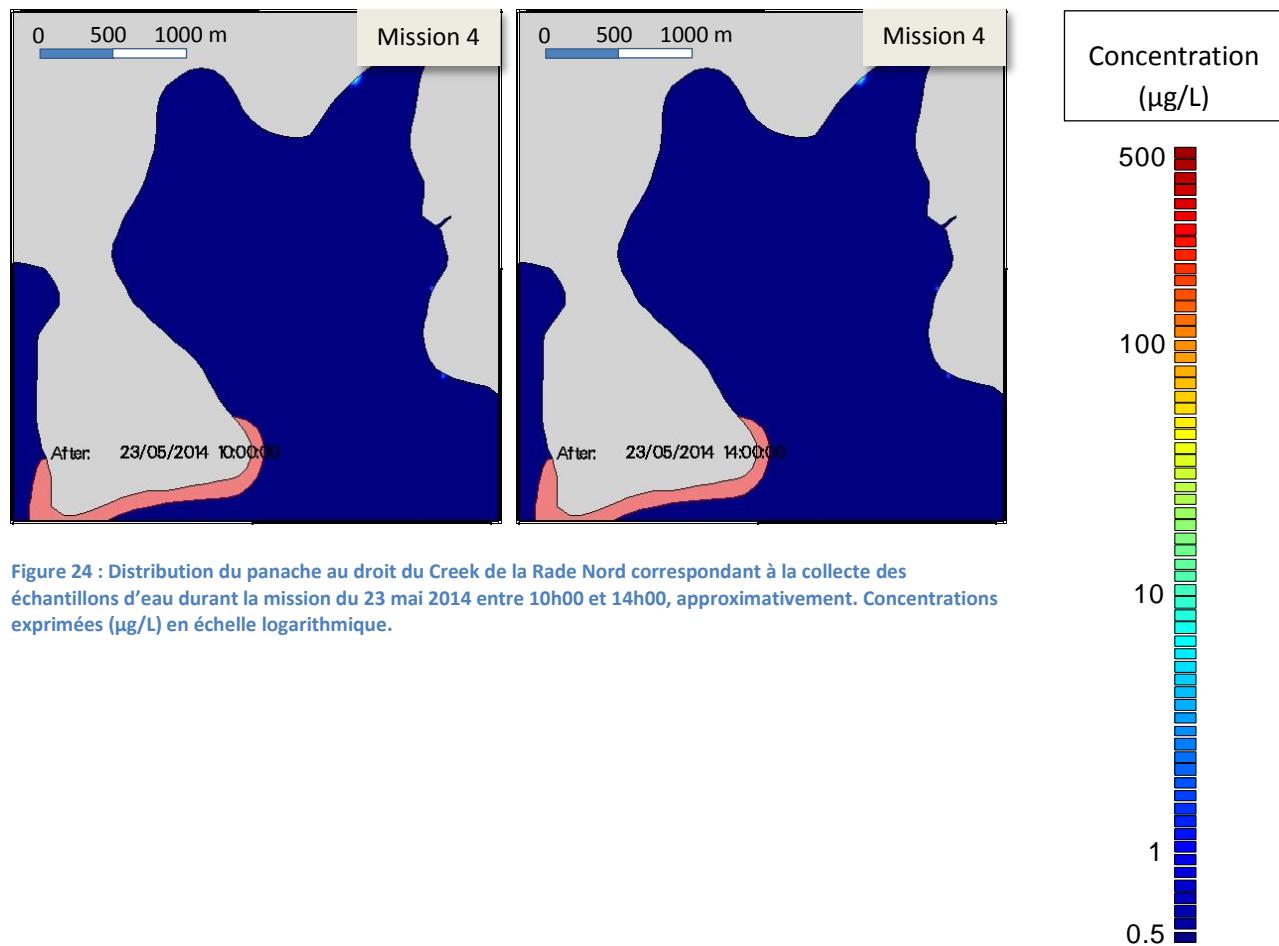


Figure 24 : Distribution du panache au droit du Creek de la Rade Nord correspondant à la collecte des échantillons d'eau durant la mission du 23 mai 2014 entre 10h00 et 14h00, approximativement. Concentrations exprimées ($\mu\text{g}/\text{L}$) en échelle logarithmique.

C. ETUDE DE L'ILE OUEN

1. Structure de la colonne d'eau

Le long de la côte sud-est de l'Île Ouen, les profils multiparamétriques réalisés sur les 5 stations montrent que :

- la salinité est remarquablement constante ($35,54 \pm 0,01\%$), quelle que soit la station et la profondeur ;
- la température est constante dans toute la colonne d'eau, sauf au niveau de la station Ouen04, où une eau plus fraîche est mesurée dans les 2 premiers mètres sous la surface. Spatialement, les eaux les plus froides sont localisées au sud ($25,09 \pm 0,03^\circ\text{C}$, Ouen05) et les plus chaudes au nord ($25,22 \pm 0,01^\circ\text{C}$, Ouen02) ;
- La turbidité des eaux est très faible (environ 0,5 NTU), quelle que soit la station ; aucune structure néphéloïde n'est décelable, excepté en Ouen04 où une légère turbidité (0,82 NTU) dans les deux derniers mètres de la colonne d'eau est mesurable ;
- La saturation en oxygène dissous est très proche de 95% dans toute la colonne d'eau, quelle que soit la station. Toutefois pour 2 stations, les eaux de surface (2 à 3 premiers mètres) montrent des variations notables des taux de saturation : 64,1% (Ouen04) et 86,1 (Ouen3) ;
- Les profils de fluorescence montrent que la distribution des pigments chlorophylliens est relativement homogène dans la colonne d'eau. Toutefois, un enrichissement des eaux est observé du sud vers le nord. Ainsi globalement, les eaux les plus pauvres sont observées en Ouen05 et les plus riches en Ouen02.

Les profils obtenus démontrent que les eaux de la côte sud-est de l'Île Ouen ont les caractéristiques normales habituellement mesurées dans ce secteur du lagon sud de Nouvelle Calédonie.

2. Analyses de laboratoire

Les résultats d'analyses des prélèvements d'eau sont regroupés en Annexe 2, les stations étant représentées à la Figure 2.

Les concentrations obtenues pour les 5 stations échantillonnées ne montrent aucune anomalie, les valeurs étant tout à fait comparables avec les observations collectées depuis la mise en place du suivi physico-chimique de la colonne d'eau (St13). Dans les tableaux ci-dessous (Tableau 5), une comparaison avec les niveaux historiques est également fournie pour la St13 du suivi réglementaire afin de conforter les mesures.

Tableau 5 : Concentrations ($\mu\text{g/L}$) obtenues pour les eaux de surface pour Co Mn et Ni et comparaison avec les valeurs habituellement mesurées à la station St13 dans le cadre du suivi réglementaire.

Station	Concentration Co Surface ($\mu\text{g/L}$)	Concentration Mn Surface ($\mu\text{g/L}$)	Concentration Ni Surface ($\mu\text{g/L}$)	Station	Concentration Co Surface ($\mu\text{g/L}$)	Concentration Mn Surface ($\mu\text{g/L}$)	Concentration Ni Surface ($\mu\text{g/L}$)
Ouen 2	0,059	0,32	0,40	ST13 moyenne	$0,026 \pm 0,022$	$0,18 \pm 0,07$	$0,21 \pm 0,06$
Ouen 3	0,068	0,29	0,38				
Ouen 4	0,059	0,32	0,44	ST13 Maximale	0,132	0,30	0,403
Ouen 5	0,072	0,47	0,52				
ST13	0,056	0,32	0,37				

IV. CONCLUSIONS

Les données obtenues permettent d'émettre les conclusions suivantes :

Pour la Rade Nord

- Une couche d'eau légèrement dessalée constitue les eaux de surface observées durant les quatre missions du 07, 12, 15 et 23 mai 2014. Ces dessalures résultent d'un épisode pluvieux de forte intensité (95 mm) qui a été enregistré le 06 mai 2014. Deux autres épisodes, de moindre intensité, respectivement, 48,1 mm correspondant à la période du 8 au 10 mai, puis 72, 3 mm du 13 au 15 mai 2014, se sont produits ;
- Les fortes précipitations du 06 mai ont grandement favorisé la dilution de la solution acide enrichie en métaux provenant du bassin SX qui a été déversée dans le Creek. Les mécanismes de dilution ont été également forcés par pluies sporadiques de la mi-mai ;
- Les prélèvements réalisés au droit du Creek ont permis de mettre en évidence que les eaux du lagon ne contenaient aucune trace mesurable d'acidité, ni le 07 mai (20h00), ni à fortiori, les 12, 15 et 23 mai, en raison, notamment du pouvoir tampon des eaux marines fortement carbonatées ($2,30 \pm 0,07 \text{ meq/L}$). L'acidité des eaux du Creek à l'embouchure a été estimée entre 3,0 <pH< 3,5 ;
- Le 7 mai, les concentrations de Ni, Co, Mn et Zn des eaux de surface étaient jusqu'à 300 fois plus élevées que les concentrations maximales typiquement observées en Rade Nord (St15) suite à des événements pluvieux intenses. Les valeurs pour Cr(VI) n'ont été sensiblement impactées qu'au niveau de l'embouchure même du Creek ;
- Les eaux de mi-profondeur n'ont pas été affectées par des niveaux de concentrations anormales, quel que soit le métal analysé. Toutefois, connu pour son affinité pour les phases organo-minérales, Mn une fois complexé a subi un transfert progressif depuis la surface vers les couches d'eau profonde avec la sédimentation naturelle des particules ;
- Les 3 épisodes pluvieux consécutifs conjointement à la reprise des régimes de sud-est (alizés) dès le 9 mai ont permis de réduire notablement les niveaux de concentrations en métaux dissous dans les eaux marines. Les facteurs peuvent estimer entre 35 et 282 pour Ni, 45 et 240 pour Co, 9 et 38 pour Mn et 1,1 et 3,4 pour Cr(VI), selon la station d'observation ;
- La dernière campagne de prélèvements (23 mai) a montré que les concentrations dans les eaux de la Rade Nord étaient conformes aux normales historiques par rapport à la station St15 du suivi physicochimique, quel que soit le métal considéré. Les valeurs élevées mesurées ne correspondent qu'aux eaux du Creek, naturellement bien plus concentrées ;
- La modélisation confirme la distribution temporelle et spatiale des concentrations mesurées, avec toutefois, des divergences avec les résultats d'analyses ;
- La simulation a mis en évidence que la combinaison des phénomènes marégraphiques et météorologiques (absence de vent) a conjointement conduit à la formation d'une lentille d'eau saumâtre fortement concentrée en métaux dissous. Ce panache a occupé la quasi-totalité de la zone d'expansion du Creek, au moins pendant environ 24 heures ;
- L'installation des alizés de sud-est et leur montée en puissance progressive ont ensuite impulsé les mécanismes de dispersion en donnant naissance à un panache de forme concentrique centré sur la baie.

Pour l'Île Ouen

- Aux différentes stations échantillonnées, tant les valeurs de pH que les concentrations en métaux dissous sont toutes demeurées en dessous des niveaux habituellement mesurés autour de l'Île Ouen.

REFERENCES

Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality, 2000. National Water Quality Management Strategy, Volume 1 (Chap.1-7), Oct 2000, 314p.

Bouichet, G, 2004. Spéciation et transfert du chrome et éléments associés dans plusieurs bassins versants de Nouvelle Calédonie. Rapport de stage de DEA, CEREGE/IRD, 47p.

Fernandez JM, Chevillon C, Belhandouz A et Di-Mateo A, 2006. Etude des apports sédimentaires à l'embouchure du Creek de Rade Nord (Baie du Prony). Convention IRD/Goro-Ni n°1229, 19p.

Fernandez J-M. et Moreton B., 2013. Rade Nord : physico-chimie de la colonne d'eau consécutivement au passage du cyclone Freda. Rapport AEL A130117-V-002, contrat Vale-NC/AEL n°E54930, 72p.

Fernandez JM, Douillet P, Moreton B et Danès C, 2012. Modélisation hydrodynamique raffinée de la Baie du Prony : maille à 60 m. Rapport AEL, Contrat E29926 / 0001, 202p.

Le Grand, 2005. Développement d'un protocole de préconcentration et spéciation du chrome (III/VI) pour le dosage en milieu marin. Rapport INSTM/IRD, 61p.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : DUREE DU REJET DE SOLUTION ACIDE DANS LE CREEK DE LA RADE NORD (06 MAI A 23H00 AU 07 MAI 13H50) ET COURBE DES MOUVEMENTS MAREGRAPHIQUES.....	6
FIGURE 2 : CARTES DES STATIONS DE PRELEVEMENTS DES 4 MISSIONS (07, 12, 15 ET 23 MAI) DE SUIVI DE L'IMPACT EN MILIEU MARIN CONSECUITIF A LA FUITE DE SOLUTION ACIDE DANS LE CREEK DE LA RADE NORD. CARTE DES SITES DE PRELEVEMENT COMPLEMENTAIRES DE CONTROLE POUR L'ILE OUEN.	9
FIGURE 3 : CARTE GENERALE DE SITUATION GEOGRAPHIQUE DU CANAL DE LA HAVANNAH, DE LA BAIE DU PRONY ET DE LA RADE NORD. LE CARRE ROUGE DELIMITE LA ZONE DE SUJETTE A LA MODELISATION DES PHENOMENES DE DISPERSION DU PANACHE ISSU DU CREEK.....	10
FIGURE 4 : CHRONOLOGIE DES PRELEVEMENTS ET MESURES REPORTEE SUR LE MAREGRAMME DU 07/05/14.	12
FIGURE 5 : CHRONOLOGIE DES PRELEVEMENTS ET MESURES REPORTEE SUR LE MAREGRAMME DU 12 MAI 2014.....	13
FIGURE 6 : CHRONOLOGIE DES PRELEVEMENTS ET MESURES REPORTEE SUR LE MAREGRAMME DU 15/05/14 (PRONY).	15
FIGURE 7 : CHRONOLOGIE DES PRELEVEMENTS ET MESURES REPORTEE SUR LE MAREGRAMME DU 23/05/14 (PRONY).	16
FIGURE 8 : ENREGISTREMENTS DES PRECIPITATIONS ATMOSPHERIQUES, DES VITESSES MOYENNES (FF) ET DES DIRECTIONS MOYENNES (DD) DE VENTS QUOTIDIENS POUR LA PERIODE DU 06 AU 26 MAI 2014.....	19
FIGURE 9 : PROFILS MULTIPARAMETRIQUES DES EAUX DE LA RADE NORD PENDANT LA MISSION DU 07 MAI 2014.	26
FIGURE 10 : VALEURS MOYENNES ET ECART-TYPES DU pH MESURE DANS LES EAUX DE SURFACE (0,50 M) ET A MI PROFONDEUR POUR CHACUNE DES 4 MISSIONS DE SUIVI (07, 12, 15 ET 23 MAI) DANS LA ZONE D'EXPANSION DU CREEK DE LA RADE NORD.	28
FIGURE 11 : ESTIMATION DES SURFACES IMPACTEES ET DES VOLUMES DE SEDIMENTS DEPOSES DANS LA ZONE D'EXPANSION DU CREEK DE LA RADE NORD. ZONES DE SEDIMENTATION PREFERENTIELLES DES PARTICULES DE PETITS DIAMETRES CORRESPONDANT A UNE AIRE HYDRODYNAMIQUE DE FAIBLE INTENSITE (CERCLE ROUGE) (FERNANDEZ ET AL., 2006).	31
FIGURE 12 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN NICKEL DANS LES EAUX LAGONAIRES DE LA RADE NORD, ENTRE LE 07 ET LE 23 MAI 2014.....	34
FIGURE 13 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN COBALT DANS LES EAUX LAGONAIRES DE LA RADE NORD, ENTRE LE 07 ET LE 23 MAI 2014.....	35
FIGURE 14 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN CHROME-VI DANS LES EAUX LAGONAIRES DE LA RADE NORD, ENTRE LE 07 ET LE 23 MAI 2014.....	36
FIGURE 15 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN CHROME-VI DANS LES EAUX LAGONAIRES DE LA RADE NORD, ENTRE LE 07 ET LE 23 MAI 2014.....	37
FIGURE 16 : EVOLUTION TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS EN Co, Cr(VI), Mn, Ni ET Zn DISSOUS, DANS LES EAUX DE SURFACE DE LA RADE NORD POUR LES STATIONS RN01, RN02, RN04 (St15), RN05, RN07, RN08 ET RN10. LE TRAIT ROUGE MONTRÉ LE NIVEAU DE CONCENTRATION MAXIMAL MESURE DANS CE SECTEUR DEPUIS LA DEFINITION DE L'ETAT DE REFERENCE DE 2007/2008 A LA STATION St15.	38
FIGURE 17 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE Ni ET Mn DISSOUS DANS LES COUCHES DE SURFACE (S) ET DE MI-PROFONDEUR (MP) POUR LES MISSIONS DU 07, 12, 15 ET 23 MAI 2014. LE TRAIT BLEU CLAIR INDIQUE LA CONCENTRATION MAXIMALE OBSERVEE DANS LES EAUX DE SURFACE (MAX-S) DEPUIS LA DEFINITION DE L'ETAT DE REFERENCE DE 2007/2008 A LA STATION St15 ; LE TRAIT ORANGE INDIQUE LA CONCENTRATION MAXIMALE OBSERVEE DANS LES EAUX DE MI-PROFONDEUR (MAX-MP).	39
FIGURE 18 : MODELE DE LA CONCENTRATION EN Ni A L'EMBOUCHURE DU CREEK DE LA RADE NORD (TERME SOURCE). EVOLUTION TEMPORELLE BASEE SUR LA MESURE DE LA CONDUCTIVITE ET EXPRIMEE EN UNITES ARBITRAIRES POUR LES BESOINS DES CALCULS DE SIMULATION.....	41
FIGURE 19 : REGRESSION LINEAIRE ENTRE LES CONCENTRATIONS EN Ni DANS LES EAUX DE SURFACE ET LES VALEURS DE L'ECHELLE ARBITRAIRE AUX COORDONNEES DES STATIONS CORRESPONDANT AUX PRELEVEMENTS.	43

FIGURE 20 : DISTRIBUTION DU PANACHE AU DROIT DU CREEK DE LA RADE NORD CORRESPONDANT A LA COLLECTE DES ECHANTILLONS D'EAU DURANT LA MISSION DU 07 MAI 2014 ENTRE 18H00 ET 00H00 APPROXIMATIVEMENT. CONCENTRATIONS EXPRIMEES ($\mu\text{G}/\text{L}$) EN ECHELLE LOGARITHMIQUE.	45
FIGURE 21 : DISTRIBUTION DU PANACHE AU DROIT DU CREEK DE LA RADE NORD AU TERME DE 24 ET 48 APRES LE DEBUT DU DEVERSEMENT EN MER DU PANACHE. CONCENTRATIONS EXPRIMEES ($\mu\text{G}/\text{L}$) EN ECHELLE LOGARITHMIQUE.	45
FIGURE 22 : DISTRIBUTION DU PANACHE AU DROIT DU CREEK DE LA RADE NORD CORRESPONDANT A LA COLLECTE DES ECHANTILLONS D'EAU DURANT LA MISSION DU 12 MAI 2014 ENTRE 11H00 ET 18H00, APPROXIMATIVEMENT. CONCENTRATIONS EXPRIMEES ($\mu\text{G}/\text{L}$) EN ECHELLE LOGARITHMIQUE.	46
FIGURE 23 : DISTRIBUTION DU PANACHE AU DROIT DU CREEK DE LA RADE NORD CORRESPONDANT A LA COLLECTE DES ECHANTILLONS D'EAU DURANT LA MISSION DU 15 MAI 2014 ENTRE 08H00 ET 12H00, APPROXIMATIVEMENT. CONCENTRATIONS EXPRIMEES ($\mu\text{G}/\text{L}$) EN ECHELLE LOGARITHMIQUE.	46
FIGURE 24 : DISTRIBUTION DU PANACHE AU DROIT DU CREEK DE LA RADE NORD CORRESPONDANT A LA COLLECTE DES ECHANTILLONS D'EAU DURANT LA MISSION DU 23 MAI 2014 ENTRE 10H00 ET 14H00, APPROXIMATIVEMENT. CONCENTRATIONS EXPRIMEES ($\mu\text{G}/\text{L}$) EN ECHELLE LOGARITHMIQUE.	47
FIGURE 25 : COUPES VERTICALES DE DILUTION DES EAUX DE REJET POUR T+12, T+48, T+120 ET T+240 HEURES LE LONG D'UNE RADIALE NE-SW PARTANT DE L'EMBOUCHURE DU CREEK DE LA RADE DU NORD. RESULTATS DE SIMULATION POUR DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES DE SECTEUR SE (ALIZES, $v=5\text{m/s}$) ET MAREES DE MORTE-EAU.....	71
FIGURE 26 : COUPES VERTICALES DE DILUTION DES EAUX DE REJET POUR T+12, T+48, T+120 ET T+240 HEURES LE LONG D'UNE RADIALE NE-SW PARTANT DE L'EMBOUCHURE DU CREEK DE LA RADE DU NORD. RESULTATS DE SIMULATION POUR DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES CALMES ($v=0\text{ m/s}$) ET MAREES DE MORTE-EAU	72

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LISTE DES STATIONS D'ECHANTILLONNAGE DE LA COLONNE D'EAU DE LA MISSION 1 (07 MAI), MISSION 2 (12 MAI), MISSION 3 (15 MAI) ET MISSION 4 (23 MAI). DEUX A TROIS NIVEAUX DE PRELEVEMENT ONT ETE REALISES : SURFACE (S), MI-PROFONDEUR (M) ET FOND (F) SELON LA STATION.	8
TABLEAU 2 : VALEUR DES pH MESURES DANS LES EAUX DE SURFACE (0,50CM) ET A MI-PROFONDEUR POUR L'ENSEMBLE DES STATIONS DE SUIVI DE CHACUNE DES 4 MISSIONS D'ECHANTILLONNAGE.	28
TABLEAU 3 : CONCENTRATIONS MINIMALES ET MAXIMALES POUR Cd, Co, Cu, Cr(VI), Fe, Mn, Ni ET Zn DANS LES EAUX PRELEVEES LES 07, 12, 15 ET 23 MAI 2014 DANS LA ZONE D'EXPANSION DU CREEK DE LA RADE NORD.....	28
TABLEAU 4 : CONCENTRATIONS ($\mu\text{G}/\text{L}$) OBTENUES LE 07 MAI 2014 POUR LES EAUX DE SURFACE ET DE MI-PROFONDEUR POUR Ni, Co ET Mn ET COMPARAISON AVEC LES VALEURS HABITUELLEMENT MESUREES A LA STATION St15 DU SUIVI REGLEMENTAIRE (LES STATION St15 ET RNO4 SONT COMPARABLES).....	30
TABLEAU 5 : CONCENTRATIONS ($\mu\text{G}/\text{L}$) OBTENUES POUR LES EAUX DE SURFACE POUR Co Mn ET Ni ET COMPARAISON AVEC LES VALEURS HABITUELLEMENT MESUREES A LA STATION St13 DANS LE CADRE DU SUIVI REGLEMENTAIRE.	49

ANNEXE 1

Méthodologie :

- **Structures des masses d'eau ;**
- **Mesure du pH ;**
- **Analyse des métaux dissous dans les eaux marines.**

Structures des masses d'eau

La structuration verticale des masses d'eau sur chacune des stations échantillonnées a été obtenue grâce aux profils verticaux réalisés avec une sonde CTD SBE19 équipée de capteurs additionnels. La fréquence d'acquisition des données étant de 0,5 secondes et la vitesse de descente d'environ 0,5 m/s, une série d'acquisition est générée tous les 25 cm environ.

Les paramètres de la sonde CTD et leurs spécifications sont les suivants (Tableau 1) :

- La pression, qui permet de calculer la profondeur ;
- La salinité, déduite de la mesure de la conductivité ;
- La température (°C) ;
- La turbidité par mesure de la néphélométrie exprimée en NTU (Nephelometric Turbidity Unit) ;
- La fluorescence *in-vivo*, exprimée en mg/m³, permet d'estimer la concentration en pigments chlorophylliens (capteurs Wet labs).

Tableau 1 : Spécifications des paramètres de la sonde.

Paramètres	Gamme	Précision initiale	Résolution
Conductivité (S.m ⁻¹)	0 - 9	0,0005	0,0007
Température (°C)	-5 à +35	0,005	0,0001
Pression (db)	0 - 350	0,35	0,007
Turbidité (NTU)	0 - 25	NA*	0,01
Fluorescence (mg/m ³)	0 - 50	NA*	0,025

Mesure du pH

Un sous-échantillonnage à partir des prélèvements en bouteilles Go-Flo® a été effectué pour la mesure du pH (pHmètre WTW) ;

Le flaconnage utilisé pour le stockage des prélèvements d'eau est en PEHD et les échantillons sont conservés à 4 °C jusqu'à leur analyse de retour au laboratoire.

Analyse des métaux dissous dans les eaux marines

- *Conditionnement et analyse*

Pour chacune des stations des 4 campagnes, les échantillons ont été prélevés en surface, mi-profondeur (le cas échéant) et au fond pour une seule station. Les échantillons ont été prélevés en double :

- Les 113 échantillons du premier lot ont été filtrés en ligne à 0,45 µm (filtres Millipore®, qualité HA, pré-lavés) le jour même des prélèvements. Ces échantillons sont destinés aux analyses des éléments Cr(total)/Cr(VI) effectuées par électrochimie (Voltampérométrie) au laboratoire de AEL ;
- Les 113 échantillons du troisième lot ont été directement filtrés à 0,45 µm en ligne (filtres Millipore®, qualité HA, pré-lavés) puis passés sur les résines cationiques « OnGuard II M » afin de concentrer les métaux dissous le jour même du prélèvement. Les percolations terminées,

chaque colonne de résine a été bouchée à chaque extrémité avec des bouchons (Luer[®]) puis stockée dans un portoir fermé hermétiquement. De retour au laboratoire, les métaux ont été élués de la résine par lavage des colonnes à l'acide nitrique (2M). L'analyse des éléments dissous Co, Fe, Mn, Ni et Zn a ensuite été effectuée par ICP-OES (Marque Varian, modèle Vista).

- *Les limites de quantification des métaux dissous sont regroupées dans le Tableau 2.*

Tableau 2 : Limite de quantification des métaux dissous.

Elément	LQ ($\mu\text{g/L}$)
As	0,500
Cd	0,200
Co	0,012
Cr(VI)	0,030
Cu	0,015
Fe	0,011
Mn	0,011
Ni	0,012
Pb	0,200
Zn	0,015

- *Validation de la méthode de percolation et de l'analyse des métaux dissous (Co, Fe, Mn, Ni et Zn)*

Un échantillon certifié pour le dosage des éléments traces (TMDA-61) délivré par la société *Environment Canada* a été intercalé dans chaque série d'analyses pour valider les calibrations (Tableau 3).

La validation des résultats d'analyse a été vérifiée par le dosage d'un échantillon certifié d'eau de mer : CASS-5 (Tableau 4).

Tableau 3 : Résultats d'analyse de l'échantillon certifié TMDA-61.

Elément	TMDA-61 ($\mu\text{g/L}$)	
	Valeur déterminée	Valeur certifiée
Co	72,0 \pm 0,7	62,9 \pm 5,8
Cu	73,1 \pm 0,3	69,2 \pm 7,4
Fe	87,5 \pm 0,8	81,1 \pm 10,1
Mn	82,2 \pm 0,5	74,8 \pm 7,3
Ni	68,2 \pm 1,0	58,7 \pm 6,4
Zn	87,1 \pm 7,0	71,3 \pm 8,7

Tableau 4 : Résultats d'analyse de l'échantillon de référence CASS-5 (09/10/12).

CASS-5 (n=3)	Co ($\mu\text{g/L}$)	Fe ($\mu\text{g/L}$)	Mn ($\mu\text{g/L}$)	Ni ($\mu\text{g/L}$)	Zn ($\mu\text{g/L}$)
Conc. obtenue	0,104	1,07	2,48	0,279	0,772
Ecart-type +/-	0,006	0,13	0,25	0,006	0,167
Conc. Certifié	0,095	1,44	2,62	0,330	0,719
Ecart-type +/-		0,11	0,2	0,023	0,068

ANNEXE 2

Suivi des impacts de l'acidification du Creek de la Rade nord :

- Mesures des valeurs de pH dans les 113 échantillons d'eau ;
- Résultats d'analyse des fractions dissoutes de Cd, Co, Cu, Cr(VI), Fe, Mn, Ni et Zn dans les 162 échantillons d'eau ;
- Profils de sonde multiparamétrique.

Mesures de pH dans les eaux de la Rade du Nord et de la côte est de l'Île Ouen

Mission du 07 mai 2014			Mission du 12 mai 2014			Mission du 15 mai 2014			Mission du 23 mai 2014		
STATION	NIVEAU	pH									
RN01	Surface	8,21	RN01	Surface	8,15	RN01	Surface	8,31	RN01	Surface	8,25
RN02	Surface	8,26	RN02	Mi-profondeur	8,20	RN02	Mi-profondeur	8,27	RN02	Mi-profondeur	8,26
RN02	Mi-profondeur	8,25	RN02	Surface	8,18	RN02	Surface	8,27	RN02	Surface	8,22
RN03	Surface	8,26	RN04	Mi-profondeur	8,16	RN04	Mi-profondeur	8,28	RN04	Mi-profondeur	8,26
RN03	Mi-profondeur	8,26	RN04	Surface	8,19	RN04	Surface	8,29	RN04	Surface	8,24
RN04	Surface	8,24	RN05	Mi-profondeur	8,20	RN05	Mi-profondeur	8,27	RN05	Mi-profondeur	8,27
RN04	Mi-profondeur	8,25	RN05	Surface	8,20	RN05	Surface	8,28	RN05	Surface	8,24
RN05	Surface	8,22	RN07	Mi-profondeur	8,15	RN07	Surface	8,28	RN07	Surface	8,26
RN05	Mi-profondeur	8,26	RN07	Surface	8,17	RN07	Mi-profondeur	8,28	RN07	Mi-profondeur	8,21
RN06	Surface	8,24	RN08	Mi-profondeur	8,20	RN07	Fond	8,28	RN07	Fond	8,20
RN06	Mi-profondeur	8,26	RN08	Surface	8,20	RN08	Mi-profondeur	8,28	RN08	Mi-profondeur	8,26
RN07	Surface	8,25	RN10	Mi-profondeur	8,21	RN08	Surface	8,27	RN08	Surface	8,21
RN07	Mi-profondeur	8,25	RN10	Surface	8,19	RN10	Mi-profondeur	8,24	RN10	Mi-profondeur	8,27
RN08	Surface	8,23	RN11	Surface	8,10	RN10	Surface	8,28	RN10	Surface	8,25
RN08	Mi-profondeur	8,21	RN12	Surface	8,24	RN12	Surface	8,35	RN11	Surface	8,60
RN09	Surface	8,23	RN13	Surface	8,19	RN14	Surface	8,29	RN12	Surface	8,25
RN09	Mi-profondeur	8,26	RN14	Surface	8,19	RN15	Surface	8,29	RN14	Surface	8,23
RN10	Surface	8,25	RN15	Surface	8,15	RN16	Mi-profondeur	8,26	RN15	Surface	8,26
RN10	Mi-profondeur	8,26	RN16	Mi-profondeur	8,21	RN16	Surface	8,19	RN16	Mi-profondeur	8,26
			RN16	Surface	8,21	RN17	Mi-profondeur	8,31	RN16	Surface	8,23
			RN17	Mi-profondeur	8,20	RN17	Surface	8,28	RN17	Mi-profondeur	8,26
			RN17	Surface	8,18	RN18	Mi-profondeur	8,24	RN17	Surface	8,22
			RN18	Mi-profondeur	8,20	RN18	Surface	8,27	RN18	Mi-profondeur	8,23
			RN18	Surface	8,19	RN19	Mi-profondeur	8,28	RN18	Surface	8,28
			OUEN2	Mi-profondeur	8,20	RN19	Surface	8,28	RN19	Mi-profondeur	8,26
			OUEN2	Surface	8,20	RN20	Mi-profondeur	8,24	RN19	Surface	8,26
ST15-Surface	01/04/14	8,21	OUEN3	Mi-profondeur	8,20	RN20	Surface	8,28	RN20	Mi-profondeur	8,26
ST15-Mi-profondeur	01/04/14	8,24	OUEN3	Surface	8,19	RN21	Surface	8,24	RN20	Surface	8,20
			OUEN4	Mi-profondeur	8,23	RN22	Surface	8,30	RN21	Surface	8,22
			OUEN4	Surface	8,24				RN22	Surface	8,23
			OUEN5	Mi-profondeur	8,18						
			OUEN5	Surface	8,21						
			St13	Mi-profondeur	8,22						
			St13	Surface	8,22						

Concentrations en métaux dissous dans les eaux de la Rade du Nord et de la côte est de l'Île Ouen

Mission du 07 mai 2014

Station	Niveau	Cd ($\mu\text{g/L}$)	Co ($\mu\text{g/L}$)	Cu ($\mu\text{g/L}$)	Cr(VI)	Fe ($\mu\text{g/L}$)	Mn ($\mu\text{g/L}$)	Ni ($\mu\text{g/L}$)	Pb ($\mu\text{g/L}$)	Zn ($\mu\text{g/L}$)
RN01	Surface	<0,02	14,87	0,12	0,60	1,1	17,1	82,5	<0,02	82,1
RN02	Surface	0,023	28,13	0,05	0,55	1,9	29,2	137,4	<0,02	133,7
RN02	Mi-profondeur	<0,02	0,47	0,02	0,19	<0,03	4,3	1,7	<0,02	1,2
RN03	Surface	<0,02	14,76	0,10	0,37	1,0	15,7	71,2	<0,02	71,8
RN03	Mi-profondeur	<0,02	0,19	0,02	0,14	<0,03	0,8	0,9	<0,02	<1
RN04	Surface	<0,02	11,53	0,05	0,35	0,8	12,9	61,4	<0,02	59,8
RN04	Mi-profondeur	<0,02	0,10	0,03	0,14	<0,03	0,3	0,6	<0,02	<1
RN05	Surface	<0,02	5,09	0,06	0,34	0,4	6,2	27,0	<0,02	25,7
RN05	Mi-profondeur	<0,02	0,20	0,04	0,16	<0,03	0,5	1,1	<0,02	2,7
RN06	Surface	<0,02	0,94	0,04	0,29	0,1	1,6	5,8	<0,02	5,0
RN06	Mi-profondeur	<0,02	0,10	0,04	0,15	<0,03	0,2	0,6	<0,02	1,2
RN07	Surface	0,024	30,98	0,04	0,36	2,0	28,6	140,6	<0,02	138,6
RN07	Mi-profondeur	<0,02	0,13	0,03	0,17	<0,03	0,3	0,7	<0,02	1,0
RN08	Surface	<0,02	19,17	0,08	0,44	1,2	19,0	89,4	<0,02	90,2
RN08	Mi-profondeur	<0,02	0,14	0,03	0,16	<0,03	0,4	0,8	<0,02	1,0
RN09	Surface	<0,02	10,66	0,02	0,35	0,7	10,6	50,3	<0,02	51,2
RN09	Mi-profondeur	<0,02	0,09	0,02	0,13	<0,03	0,2	0,5	<0,02	<1
RN10	Surface	<0,02	6,81	0,02	0,29	0,4	6,8	31,6	<0,02	32,1
RN10	Mi-profondeur	<0,02	0,09	0,02	0,14	<0,03	0,214	0,564	<0,02	<1

Mission du 12 mai 2014

Station	Niveau	Cd ($\mu\text{g/L}$)	Co ($\mu\text{g/L}$)	Cu ($\mu\text{g/L}$)	Cr(VI)	Fe ($\mu\text{g/L}$)	Mn ($\mu\text{g/L}$)	Ni ($\mu\text{g/L}$)	Pb ($\mu\text{g/L}$)	Zn ($\mu\text{g/L}$)
RN01	Surface	<0,02	0,152	<0,02	0,18	<0,02	0,91	0,62	<0,02	0,30
RN02	Surface	<0,02	0,117	<0,02	0,16	<0,02	0,77	0,49	<0,02	0,23
RN02	Mi-profondeur	<0,02	0,120	<0,02	0,14	0,20	0,90	0,43	<0,02	0,80
RN04	Surface	<0,02	0,135	<0,02	0,15	0,08	1,28	0,55	<0,02	0,67
RN04	Mi-profondeur	<0,02	0,06	<0,02	0,14	0,03	0,36	0,36	<0,02	0,91
RN05	Surface	<0,02	0,112	<0,02	0,24	0,02	0,72	0,77	<0,02	0,18
RN05	Mi-profondeur	<0,02	0,077	<0,02	0,15	<0,02	0,43	0,38	<0,02	0,27
RN07	Surface	<0,02	0,144	<0,02	0,33	0,07	1,21	1,20	<0,02	0,49
RN07	Mi-profondeur	<0,02	0,060	<0,02	0,14	<0,02	0,33	0,35	<0,02	0,34
RN08	Surface	<0,02	0,117	<0,02	0,19	<0,02	0,82	0,60	<0,02	0,51
RN08	Mi-profondeur	<0,02	0,070	<0,02	0,14	0,03	0,50	0,37	<0,02	0,48
RN10	Surface	<0,02	0,10	<0,02	0,14	0,1	0,78	0,48	<0,02	0,61
RN10	Mi-profondeur	<0,02	0,06	<0,02	0,14	0,0	0,37	0,38	<0,02	0,34
RN11	Surface	<0,02	0,236	<0,02	3,77	<0,02	2,19	0,74	<0,02	0,30
RN12	Surface	<0,02	0,865	<0,02	2,21	0,15	6,50	11,72	<0,02	2,37
RN13	Surface	<0,02	0,357	<0,02	0,33	<0,02	3,66	1,48	<0,02	0,51
RN14	Surface	<0,02	0,918	<0,02	0,20	0,13	8,71	11,32	<0,02	2,24
RN15	Surface	<0,02	0,159	<0,02	0,31	0,03	1,25	1,09	<0,02	0,34
RN16	Surface	<0,02	0,11	0,02	0,17	0,2	0,79	0,72	<0,02	0,79
RN16	Mi-profondeur	<0,02	0,08	<0,02	0,13	<0,02	0,49	0,43	<0,02	0,29
RN17	Surface	<0,02	0,09	0,02	0,14	<0,02	0,61	0,51	<0,02	0,87
RN17	Mi-profondeur	<0,02	0,06	<0,02	0,13	<0,02	0,25	0,36	<0,02	0,30
RN18	Surface	<0,02	0,12	<0,02	0,16	<0,02	0,71	0,66	<0,02	0,80
RN18	Mi-profondeur	<0,02	0,06	0,04	0,14	<0,02	0,34	0,42	<0,02	0,59
Ouen02	Surface	<0,02	0,06	<0,02	0,13	<0,02	0,32	0,40	<0,02	0,85
Ouen02	Mi-profondeur	<0,02	0,06	<0,02	0,13	0,0	0,31	0,36	<0,02	0,60
Ouen03	Surface	<0,02	0,07	<0,02	0,14	<0,02	0,29	0,38	<0,02	0,38
Ouen03	Mi-profondeur	<0,02	0,07	0,04	0,15	<0,02	0,32	0,39	<0,02	0,90
Ouen04	Surface	<0,02	0,06	<0,02	0,13	0,0	0,32	0,44	<0,02	0,77
Ouen04	Mi-profondeur	<0,02	0,06	<0,02	0,13	<0,02	0,27	0,36	<0,02	0,57
Ouen05	Surface	<0,02	0,07	<0,02	0,13	0,1	0,47	0,52	<0,02	1,86
Ouen05	Mi-profondeur	<0,02	0,14	0,04	0,14	0,2	0,69	2,14	<0,02	0,88
St13	Surface	<0,02	0,06	<0,02	0,13	0,0	0,32	0,37	<0,02	0,33
St13	Mi-profondeur	<0,02	0,06	<0,02	0,13	<0,02	0,32	0,48	<0,02	0,35

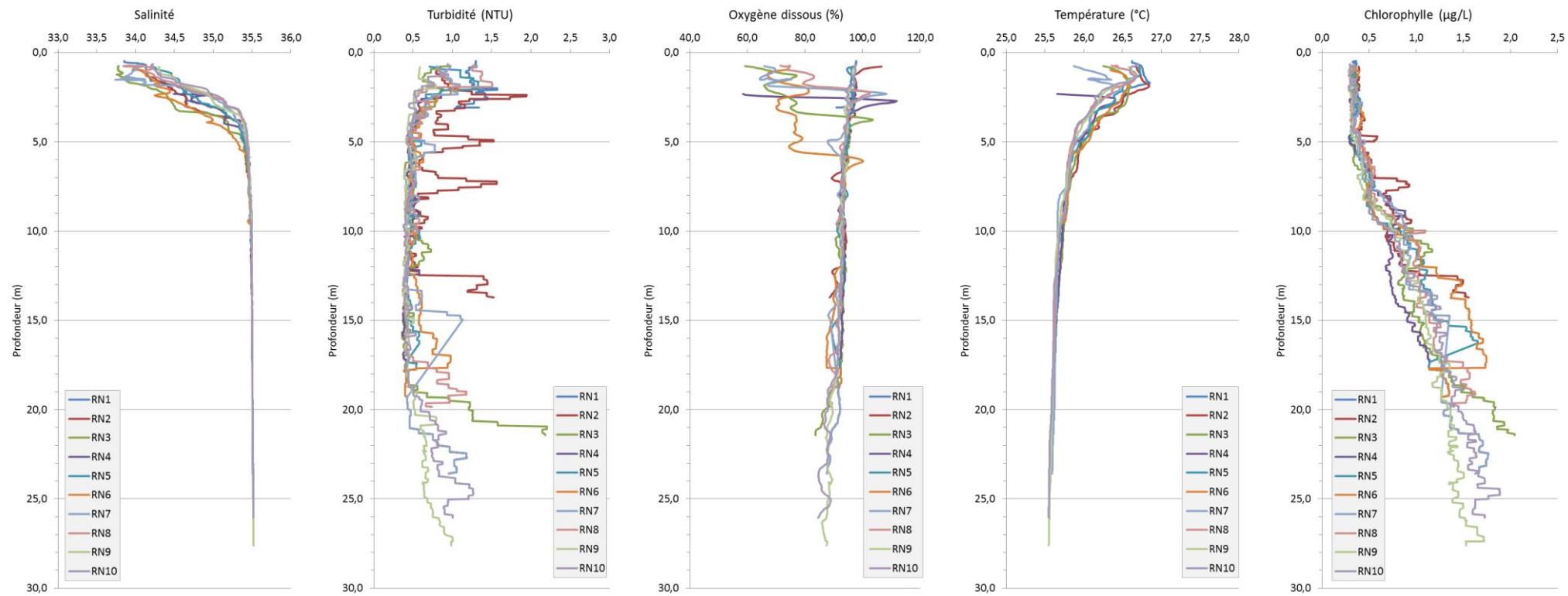
Mission 15 mai 2014

Station	Niveau	Cd ($\mu\text{g/L}$)	Co ($\mu\text{g/L}$)	Cu ($\mu\text{g/L}$)	Cr(VI)	Fe ($\mu\text{g/L}$)	Mn ($\mu\text{g/L}$)	Ni ($\mu\text{g/L}$)	Pb ($\mu\text{g/L}$)	Zn ($\mu\text{g/L}$)
RN01	Surface	<0,02	0,27	0,08	0,56	0,16	1,95	3,21	<0,02	0,98
RN02	Surface	<0,02	0,13	0,03	0,21	0,02	0,40	1,08	0,06	0,58
RN02	Mi-profondeur	<0,02	0,57	<0,02	0,14	<0,02	6,82	1,54	0,03	0,23
RN04	Surface	<0,02	0,17	0,02	0,69	<0,02	0,70	1,75	<0,02	0,34
RN04	Mi-profondeur	<0,02	0,10	<0,02	0,14	<0,02	1,67	0,65	<0,02	<0,02
RN05	Surface	<0,02	0,34	<0,02	1,49	0,07	3,21	3,55	<0,02	0,79
RN05	Mi-profondeur	<0,02	0,32	0,03	0,14	<0,02	4,63	1,18	<0,02	0,23
RN07	Surface	<0,02	0,33	0,02	1,25	<0,02	2,39	3,54	<0,02	0,94
RN07	Mi-profondeur	<0,02	0,10	0,03	0,14	<0,02	1,38	0,63	<0,02	0,14
RN07	Fond	<0,02	0,04	<0,02	0,14	<0,02	0,29	0,41	0,03	0,12
RN08	Surface	<0,02	0,61	0,05	3,90	0,03	6,91	6,52	0,03	1,53
RN08	Mi-profondeur	<0,02	0,16	0,11	0,15	0,03	3,06	0,85	0,07	0,29
RN10	Surface	<0,02	0,13	<0,02	0,33	0,03	0,45	1,41	<0,02	0,17
RN10	Mi-profondeur	<0,02	0,04	0,02	0,14	<0,02	0,24	0,42	<0,02	0,11
RN12	Surface	<0,02	0,96	0,03	2,84	0,02	8,01	11,25	0,02	2,54
RN14	Surface	<0,02	0,12	0,02	0,21	<0,02	0,49	0,90	<0,02	0,29
RN15	Surface	<0,02	0,29	0,15	0,88	0,14	1,77	3,36	<0,02	1,43
RN16	Surface	<0,02	0,30	0,06	1,12	<0,02	1,97	3,14	<0,02	0,91
RN16	Mi-profondeur	<0,02	0,04	<0,02	0,14	<0,02	0,29	0,44	<0,02	2,00
RN17	Surface	<0,02	0,19	<0,02	0,92	<0,02	1,21	2,00	<0,02	0,44
RN17	Mi-profondeur	<0,02	0,04	<0,02	0,14	<0,02	0,21	0,44	<0,02	<0,02
RN18	Surface	<0,02	0,08	0,03	0,17	<0,02	0,32	0,61	<0,02	0,25
RN18	Mi-profondeur	<0,02	0,04	0,04	0,14	<0,02	0,22	0,47	<0,02	<0,02
RN19	Surface	<0,02	0,17	0,03	0,52	<0,02	0,91	1,74	0,04	0,69
RN19	Mi-profondeur	<0,02	0,04	<0,02	0,14	<0,02	0,23	0,41	<0,02	0,05
RN20	Surface	<0,02	0,16	0,03	0,34	0,05	0,57	1,82	0,03	3,11
RN20	Mi-profondeur	<0,02	0,04	<0,02	0,14	<0,02	0,29	0,42	<0,02	0,04
RN21	Surface	<0,02	0,19	<0,02	0,49	0,04	0,57	1,94	<0,02	0,23
RN22	Surface	<0,02	0,24	<0,02	0,94	0,02	1,81	2,54	<0,02	0,53

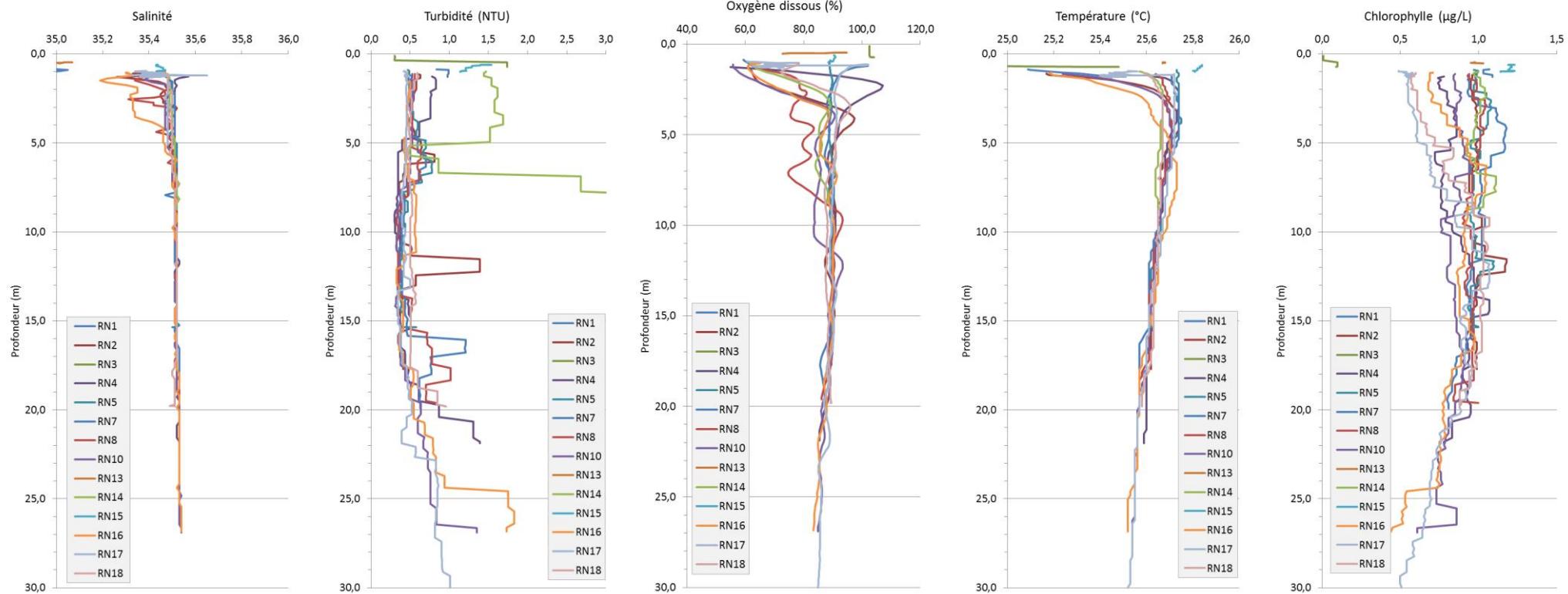
Mission 23 mai 2014

Station	Niveau	Cd ($\mu\text{g/L}$)	Co ($\mu\text{g/L}$)	Cu ($\mu\text{g/L}$)	Cr(VI)	Fe ($\mu\text{g/L}$)	Mn ($\mu\text{g/L}$)	Ni ($\mu\text{g/L}$)	Pb ($\mu\text{g/L}$)	Zn ($\mu\text{g/L}$)
RN01	Surface	<0,02	0,335	0,170	1,012	0,158	2,223	3,196	<0,02	0,31
RN02	Mi-profondeur	<0,02	0,143	0,027	0,140	0,040	0,875	0,490	<0,02	0,32
RN02	Surface	<0,02	0,359	<0,02	0,839	0,023	0,964	2,201	<0,02	0,15
RN04	Mi-profondeur	<0,02	0,071	<0,02	0,136	0,065	0,559	0,328	<0,02	0,29
RN04	Surface	<0,02	0,151	<0,02	0,414	0,051	0,541	1,121	<0,02	0,33
RN05	Mi-profondeur	<0,02	0,095	<0,02	0,134	0,026	0,697	0,408	<0,02	0,12
RN05	Surface	<0,02	0,172	<0,02	0,443	0,028	0,554	1,163	<0,02	0,15
RN07	Fond	<0,02	0,093	<0,02	0,130	<0,02	0,643	0,348	<0,02	0,08
RN07	Mi-profondeur	<0,02	0,109	<0,02	0,163	<0,02	0,727	0,475	<0,02	0,33
RN07	Surface	<0,02	0,213	<0,02	0,581	0,024	0,764	1,386	<0,02	0,42
RN08	Mi-profondeur	<0,02	0,055	<0,02	0,139	0,021	0,378	0,366	<0,02	0,18
RN08	Surface	<0,02	0,159	<0,02	0,395	0,029	0,498	1,158	<0,02	0,12
RN10	Mi-profondeur	<0,02	0,046	<0,02	0,134	0,072	0,233	0,299	<0,02	0,40
RN10	Surface	<0,02	0,130	0,032	0,401	0,046	0,364	1,051	<0,02	0,17
RN11	Surface	<0,02	0,599	<0,02	5,720	0,576	10,112	14,338	<0,02	0,99
RN12	Surface	<0,02	0,549	<0,02	1,046	0,329	8,355	12,349	<0,02	0,72
RN14	Surface	<0,02	0,335	<0,02	0,822	0,035	1,014	2,170	<0,02	0,16
RN15	Surface	<0,02	0,337	0,084	1,092	0,137	2,253	3,102	<0,02	0,33
RN16	Mi-profondeur	<0,02	0,056	<0,02	0,133	0,046	0,320	0,387	<0,02	0,14
RN16	Surface	<0,02	0,217	<0,02	0,516	0,037	0,734	1,383	<0,02	0,33
RN17	Mi-profondeur	<0,02	0,048	<0,02	0,130	0,083	0,199	0,285	<0,02	0,33
RN17	Surface	<0,02	0,139	0,083	0,351	0,094	0,529	1,102	<0,02	0,60
RN18	Mi-profondeur	<0,02	0,047	<0,02	0,137	<0,02	0,203	0,288	<0,02	0,22
RN18	Surface	<0,02	0,098	<0,02	0,244	0,041	0,431	0,641	<0,02	0,08
RN19	Mi-profondeur	<0,02	0,048	<0,02	0,154	0,092	0,199	0,271	<0,02	0,28
RN19	Surface	<0,02	0,119	<0,02	0,460	0,035	0,433	1,017	<0,02	0,32
RN20	Mi-profondeur	<0,02	0,047	<0,02	0,145	<0,02	0,158	0,287	<0,02	0,14
RN20	Surface	<0,02	0,211	<0,02	0,570	0,040	0,768	1,432	<0,02	0,24
RN21	Surface	<0,02	0,216	<0,02	0,542	0,034	0,680	1,277	<0,02	0,31
RN22	Surface	<0,02	0,171	<0,02	0,636	0,030	0,636	1,380	<0,02	0,32
RN23	Surface	<0,02	0,521	0,050	5,776	0,850	7,998	14,182	<0,02	0,90

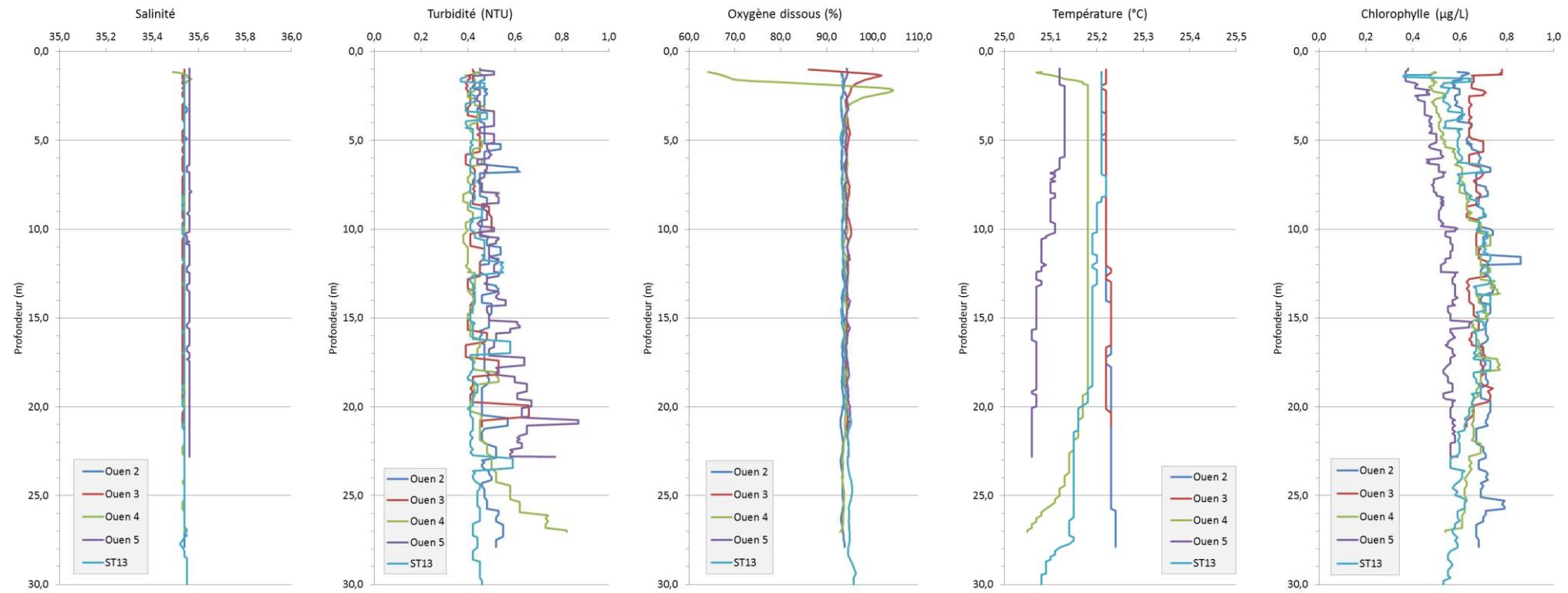
Profils multiparamétriques des eaux de la Rade Nord pendant la mission du 07 mai 2014



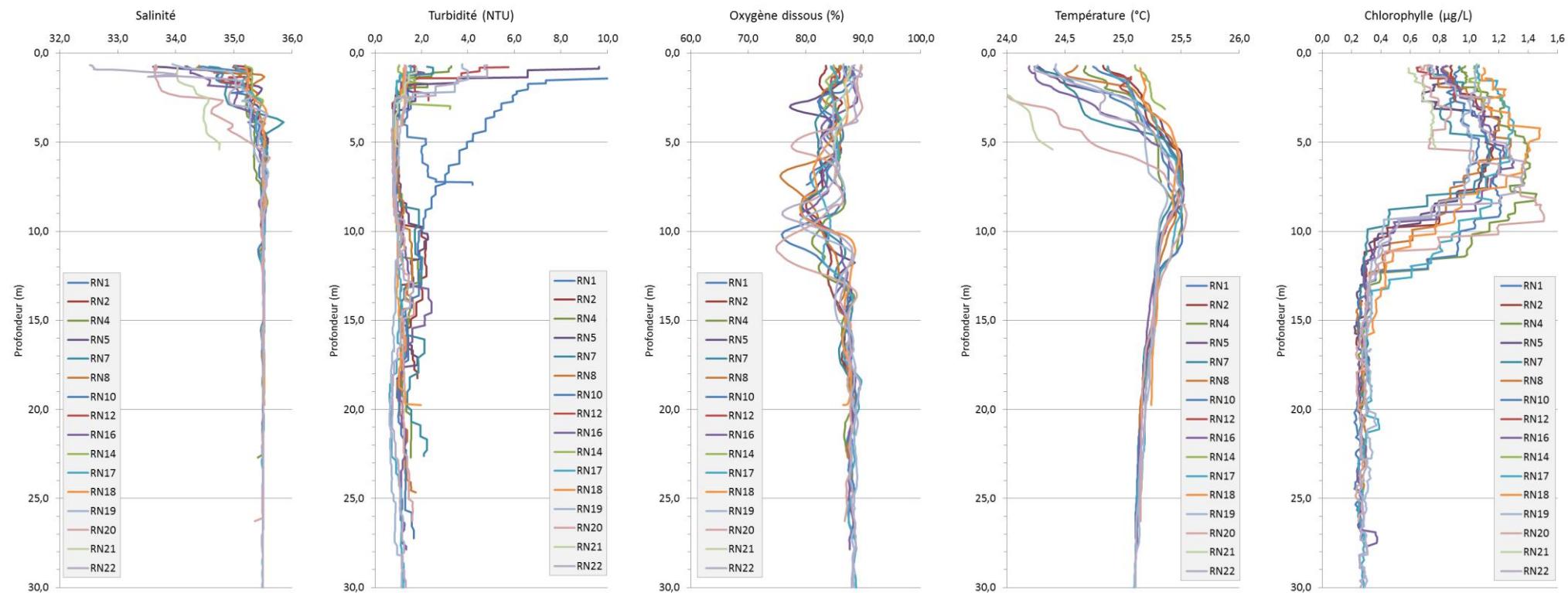
Profils multiparamétriques des eaux de la Rade Nord pendant la mission du 12 mai 2014



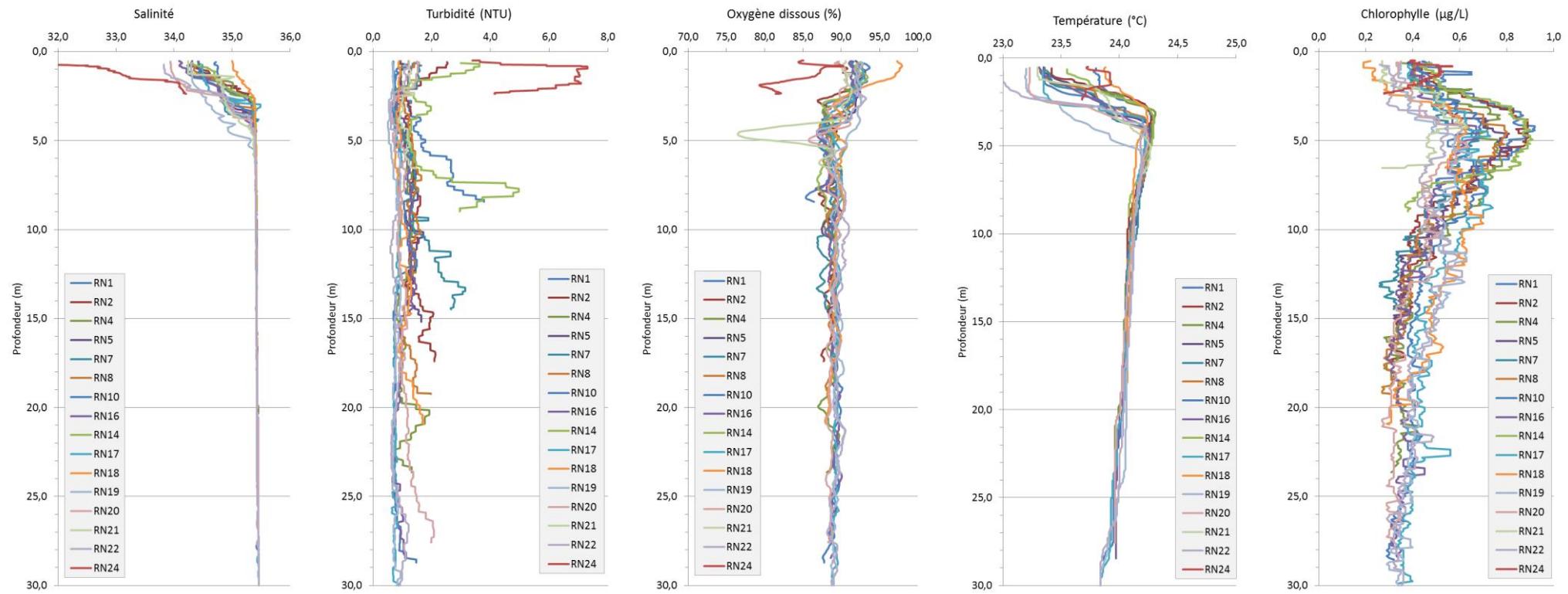
Profils multiparamétriques des eaux d'Île Ouen pendant la mission du 12 mai 2014



Profils multiparamétriques des eaux de la Rade Nord pendant la mission du 15 mai 2014



Profils multiparamétriques des eaux de la Rade Nord pendant la mission du 23 mai 2014



ANNEXE 3

Résultats de modélisation hydrodynamique ;

Simulation de la dispersion du panache au droit du Creek de la Rade Nord ;

Quatre pas de temps clefs ont été retenus pour décrire brièvement les mécanismes de dilution verticale : t+12 h, t+48 h, t+120 h et t+240 h.

Régime d'alizés (Figure 25) : Au cours des douze premières heures de rejet, le panache reste bloqué dans une couche décimétrique en surface et dans la très proche embouchure. Quelques 36 plus tard (t+48 h) le panache s'est épaisse et occupe les 2 ou 3 premiers mètres de la colonne d'eau. On observe nettement un effet de dilution du rejet en même temps qu'un déplacement de celui-ci vers le SW. Les eaux proches du terme source ont retrouvé des valeurs normales ou au moins diluées d'un facteur 10^4 , à minima ; vers le large les taux de dilution diminuent et n'atteignent encore que 10^2 à l'extrémité de la radiale délimitée (St151). Au terme d'une petite semaine (120 h), le panache est relativement dilué (10^4) et est encore bien décelable dans une couche de plus de 10 mètre d'épaisseur ; une couche benthique encore plus diluée est également visible (10^5). Une dizaine de jours sont nécessaires pour ne plus apercevoir que des traces du rejet dans les 10 mètres de profondeur ($> 10^5$).

Temps calme (Figure 26) : Ces conditions météorologiques sont particulièrement défavorables pour la dispersion verticale du panache. En effet, au terme de 12 heures de rejet, seule une fine couche centimétrique est observable en surface, mais tout le long de la radiale. A t+48h, les calculs permettent de constater la mise en place d'un début de diffusion dans la colonne d'eau au droit du Creek de la Rade du Nord. Toutefois, ce n'est que 5 jours après le début du rejet (t+120h) que toute la hauteur de la colonne d'eau, dans la proche embouchure uniquement, est concernée, mais la couche d'eau de surface demeure peu diluée, notamment au droit de l'embouchure (10^3) ; dans la colonne d'eau la dilution est un peu plus forte (10^4). Environ 10 jours (t+240) après le début du rejet, plus aucune trace du panache de subsiste ni en surface ni dans la colonne d'eau.

Dans ce cas de figure, il semble qu'à aucun moment l'ensemble des masses d'eau ne soit marqué par le rejet, la dilution du panache s'effectuant seulement par dispersion horizontale de la couche décimétrique de surface sur toute la surface de la Rade du Nord puis de la Baie du Prony.

Déversement accidentel du 06-07 mai 2014

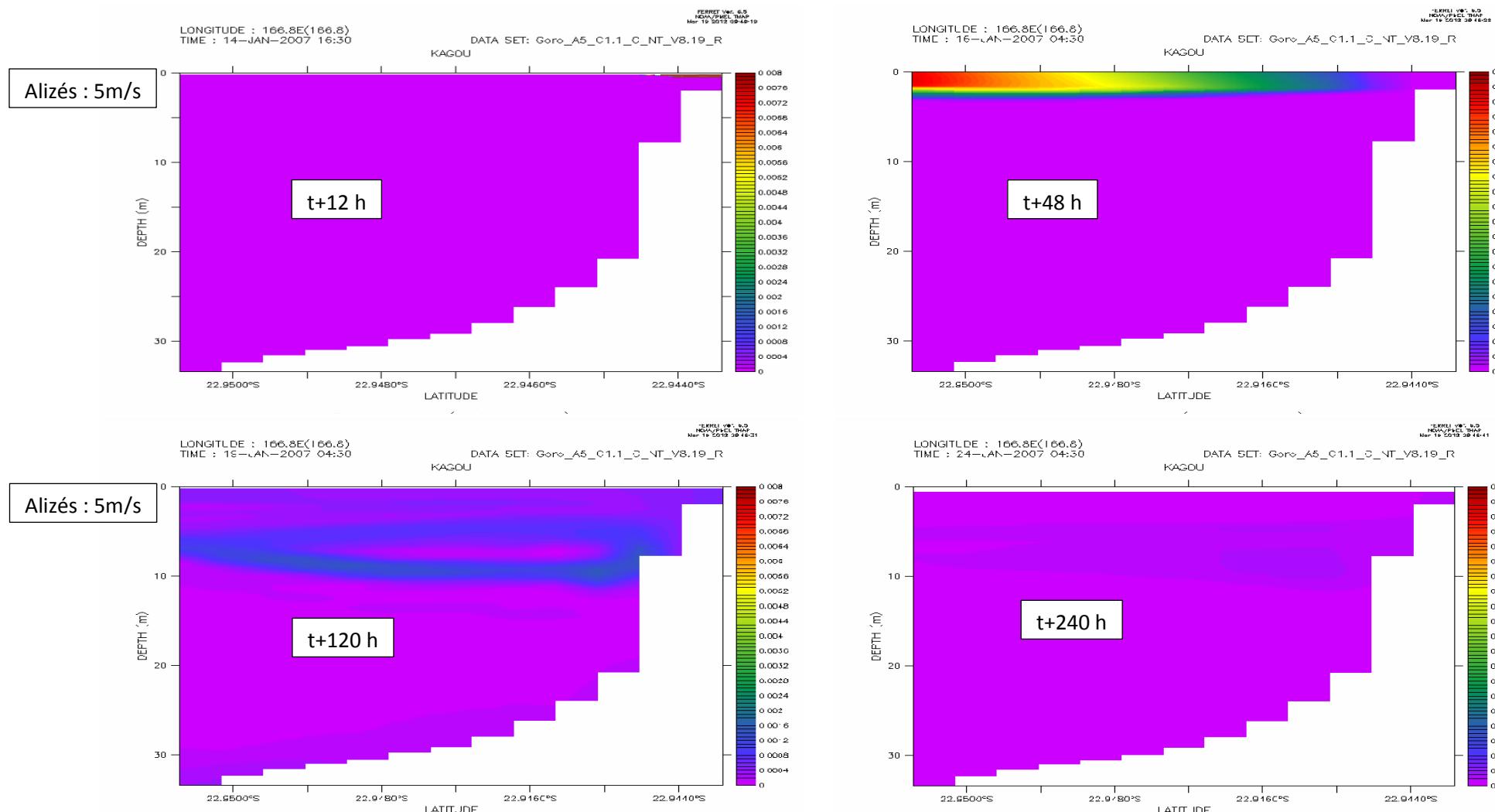


Figure 25 : Coupes verticales de dilution des eaux de rejet pour t+12, t+48, t+120 et t+240 heures le long d'une radiale NE-SW partant de l'embouchure du Creek de la Rade du Nord. Résultats de simulation pour des conditions météorologiques de secteur SE (alizés, v=5m/s) et marées de morte-eau.

Déversement accidentel du 06-07 mai 2014

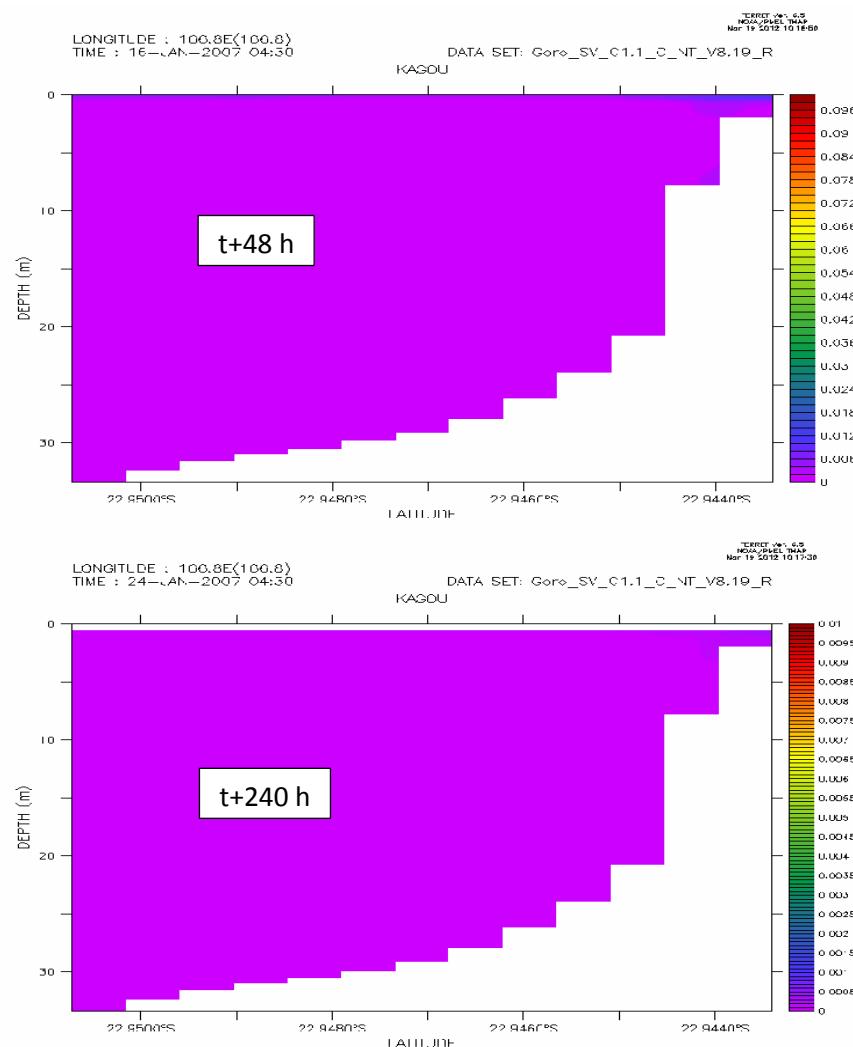
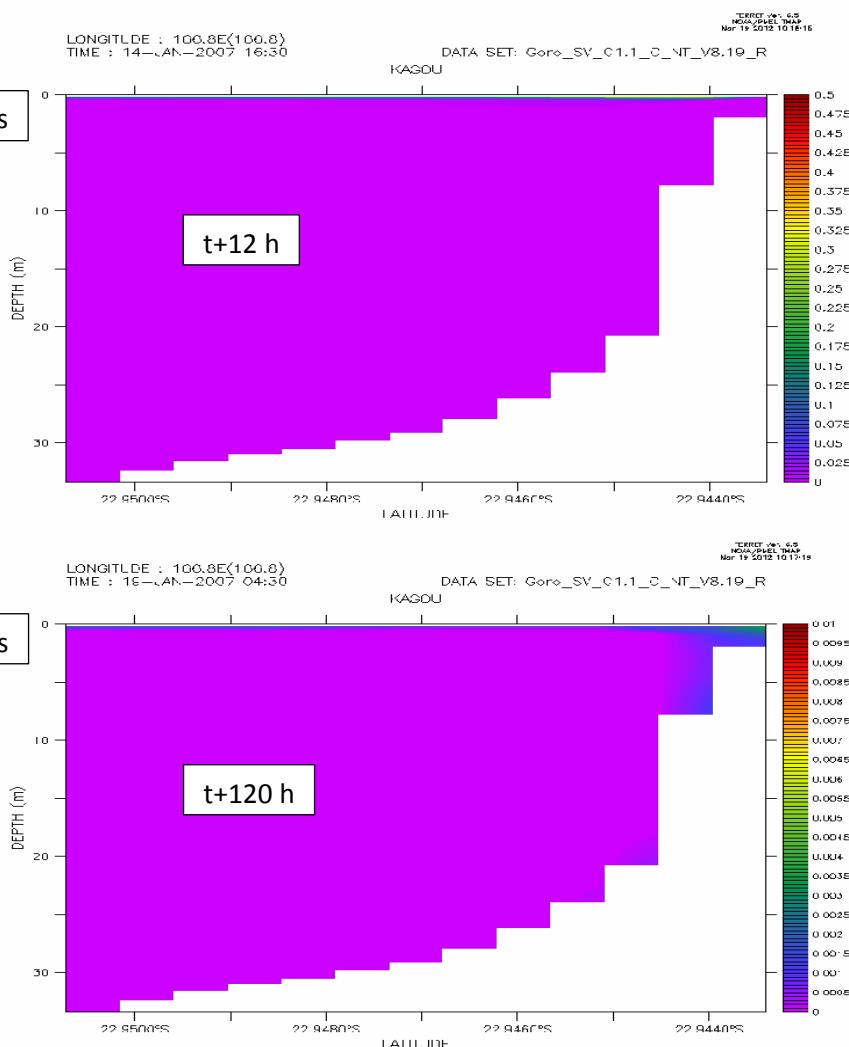


Figure 26 : Coupes verticales de dilution des eaux de rejet pour t+12, t+48, t+120 et t+240 heures le long d'une radiale NE-SW partant de l'embouchure du Creek de la Rade du Nord. Résultats de simulation pour des conditions météorologiques calmes ($v=0$ m/s) et marées de morte-eau