

MAREL CARNOT, rapport n°17.

Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique.

Bilan de l'année 2024.

Lefebvre Alain et Devreker David



Version 1.1 du 22/04/2025

Cofinanceur

Fiche documentaire

Titre du rapport

Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2024.

Référence interne :

IFREMER/ODE/COAST/LERBL/25.03

Date de publication :

22/04/2025

Diffusion

- libre (internet)
- restreinte (intranet)
levée d'embargo : AAAA/MM/JJ
- interdite (confidentielle)
levée de confidentialité : AAAA/MM/JJ

Version : 1.1

Référence de l'illustration de couverture :

©Ifremer

Langue(s) : Français

Résumé / Abstract :

Installée dans la rade de Boulogne-sur-Mer et inaugurée le 25 novembre 2004, la station MAREL Carnot mesurait initialement, toutes les 20 minutes, la salinité, la température de l'eau et de l'air, la fluorescence, la turbidité, la concentration en oxygène dissous, le pourcentage de saturation en oxygène, le P.A.R., l'humidité relative, la direction et la vitesse du vent, la hauteur d'eau et toutes les 12 heures, la concentration en nitrate, en phosphate et en silicium. Depuis 2014 (2010 pour les nutriments) et jusqu'en 2024, les paramètres météo ainsi que le P.A.R. et les nutriments ne sont plus mesurés. Ce rapport vise à présenter les principaux éléments utiles à l'utilisateur des données afin de pouvoir adapter son étude en fonction de la disponibilité des données, de leur qualité et, bien entendu, de son objectif. Les résultats des paramètres température, salinité, turbidité, concentration et saturation en oxygène, fluorescence sont présentés de manière plus détaillée afin de mettre en évidence les cycles saisonniers caractéristiques de cet écosystème.

Mots-clés / Key words :

Manche orientale, Boulogne-sur-Mer, haute fréquence temporelle, MAREL, hydrologie, fluorescence, ILICO, COAST-HF.

Comment citer ce document :

Lefebvre A., Devreker D (2025). MAREL Carnot : Rapport n° 17 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2024. IFREMER/ODE/COAST/LERBL/25.03, 40 pages.

Disponibilité des données de la recherche :

DOI :

MAREL Carnot (2025). High Frequency measurement of the coastal environment in the eastern English Channel. Data from MAREL CARNOT - COAST-HF (Coastal ocean observing system - High frequency) monitoring programme within the Research Infrastructure ILICO. SEANOE. <https://doi.org/10.17882/39754>

Commanditaire du rapport :

Agence de l'Eau Artois-Picardie

Nom / référence du contrat :

Rapport définitif

Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit (programme européen, campagne, etc.) :

IR-ILICO.

COAST-HF.

Convention Ifremer/Agence de l'Eau Artois Picardie 2024 (P305-0013).

Auteur(s) / adresse mail**Affiliation / Direction / Service, laboratoire**

Alain Lefebvre / alain.lefebvre@ifremer.fr

IFREMER/ODE/COAST/LER BL

David Devreker / david.devreker@ifremer.fr

IFREMER/ODE/COAST/LER BL

Encadrement(s) :

Lefebvre Alain, Ifremer/LER/Boulogne-sur-Mer.

Destinataires :

Agences de l'Eau.

DDTM59,62,80.

DDPP.

DREAL.

Collaborateurs universitaires, EUR IFSEA, SFR Campus de la mer.

Coordinateurs SNO COAST-HF.

ARS.

ANSES.

OFB.

Ifremer.

Validé par :

Lefebvre Alain, Ifremer/LER/Boulogne-sur-Mer.

Remerciements :

**Contexte
national du projet
MAREL Carnot**



Partenaires



LISIC



Cofinanceur



Etablissement public du Ministère chargé
du développement durable

Les projets CPER Phaeocytis, MARCO et IDEAL ayant participé aux financements de certains investissements.

Table des matières

Avant-propos	3
1. INTRODUCTION	4
2. FONCTIONNEMENT DE MAREL CARNOT DE 2004 A NOS JOURS	5
2.1. Le système MAREL Carnot jusque 2014	5
2.2. Le système MAREL Carnot depuis 2014	7
2.2.1. La base de données	7
2.2.2. Le système de mesures	8
3. RESULTATS	9
3.1. Bilan du fonctionnement	9
Oxygène	10
Oxygène Saturation	11
Turbidité	12
Fluorescence	13
Température	14
Salinité	15
Conductivité	16
Irradiance	17
Phosphate	18
Nitrite + Nitrate	19
Silicate	20
3.2 Valorisation des données	21
Rapports de fonctionnement du système MAREL Carnot	21
Jeu de données MAREL CARNOT	22
Utilisation des données issues du système MAREL Carnot	22
Valorisations scientifiques	22
Bibliographie	26
Annexes	29
Analyse des paramètres au cours de la dernière année de disponibilité des données	29
Température et liste des événements sur la station MAREL Carnot	29
Oxygène	30
Oxygène Saturation	31
Turbidité	32
Fluorescence	33
Salinité	34
Conductivité	35
Phosphate	36
Nitrate + Nitrite	37

Avant-propos

Le présent rapport n'est pas destiné à proposer une interprétation environnementale des résultats. Il correspond à un bilan annuel de fonctionnement de la station instrumentée MAREL Carnot afin de permettre une analyse exploratoire de base des données acquises et d'engager d'autres actions de traitements et d'analyses des données de manière plus approfondie en fonction des objectifs scientifiques et/ou techniques des utilisateurs.

1. INTRODUCTION

La prise de conscience générale des problèmes d'environnement, notamment au niveau du littoral, conduit à renforcer la surveillance qui s'y exerce.

Par l'expérience acquise depuis de nombreuses années dans l'exploitation des réseaux de surveillance de l'environnement, l'Ifremer a mis en évidence le besoin de développer des systèmes de surveillance automatisée de l'environnement et des effets directs et indirects des activités humaines sur le milieu marin. Les développements technologiques concernant les capteurs physico-chimiques permettent la réalisation de réseaux de stations instrumentées autonomes effectuant des mesures à fréquence élevée et rapidement disponibles pour les utilisateurs (site web).

Depuis les années 1992-1995, le concept des stations MAREL a été validé puis décliné selon différentes familles de produits adaptés aux contraintes environnementales ainsi qu'aux demandes des utilisateurs. Récemment, dans le cadre de l'Infrastructure de Recherche Littorale et Côtière ILICO, les équipes se sont structurées en un réseau national multi organismes : le COAST-HF. Une large gamme de paramètres est maintenant mesurée sur des sites très variés (Figure 1).

L'infrastructure de recherche littorale et côtière (ILICO) a été créée en 2016 afin d'observer et de comprendre les milieux et les écosystèmes littoraux et côtiers dans leur globalité. ILICO fédère des moyens d'observations permettant sur le long terme, de mesurer les paramètres essentiels d'évolution des systèmes littoraux et côtiers, de collecter des échantillons et d'assurer la mise à disposition de ces données. ILICO assure une animation scientifique pour la communauté scientifique impliquée par l'étude de ces milieux. Les réseaux d'observation sur lesquels s'appuie ILICO contribuent tous, par leur domaine de recherche et d'observation spécifique, à améliorer les connaissances des écosystèmes et des espaces littoraux et côtiers. La qualité des réseaux d'observation présents au sein de l'IR est assurée via des labellisations attribuées par les « commissions spécialisées » du CNRS-INSU comme « service national d'observation » - SNO. Parmi ces réseaux d'observation labellisé, COAST-HF est un réseau qui vise à fédérer et coordonner à l'échelle du littoral français (figure 1) un ensemble de plateformes fixes instrumentées de mesures *in situ* hautes fréquences pour des paramètres clés des eaux côtières. Il est labellisé par le CNRS.



FIGURE 1 – Localisation des stations instrumentées du réseau national COAST-HF de l'IR ILICO. Source : <https://coast-hf.fr/>

2. FONCTIONNEMENT DE MAREL CARNOT DE 2004 A NOS JOURS

Un rapport bilan n°1, édité en 2006, présente les différentes étapes de mise en place du système depuis les études avant implantation jusqu'à l'inauguration du site (Lefebvre & Répécaud, 2006).

Les stations de mesure MAREL ont pour objectifs communs la mesure à haute fréquence et, de manière automatique, des paramètres physico-chimiques essentiels de l'eau de mer ainsi que de quelques autres indicateurs caractéristiques. L'ensemble de ces grandeurs mesurées peut être transmis en temps réel vers un centre de traitement de données à terre.

L'évolution des technologies, et par conséquent l'obsolescence des systèmes mis en oeuvre en 2004, est telle que le système MAREL a subi une évolution majeure en 2014. Ainsi, le traitement de la série temporelle acquise depuis maintenant plus de 10 ans nécessite la prise en compte de ces changements pour un traitement optimal des données. Par ailleurs, il faut noter que l'évolution du système est en cours. L'utilisateur des données devra différencier la période de 2004-2014 de la période 2014-2024, conformément aux informations ci-dessous.

2.1. Le système MAREL Carnot jusque 2014

Pendant cette période, le système MAREL Carnot enregistrait, toutes les 20 minutes, la température de l'air et de l'eau et la salinité de cette dernière, l'oxygène dissous, la fluorescence (chlorophylle), la turbidité, le pH, l'humidité relative et la radiation disponible pour la photosynthèse (P.A.R.). Les concentrations en sels nutritifs (nitrates, silicates et phosphates) étaient mesurées toutes les 12 heures (Tableau 1) jusqu'en 2010.

Le coeur du système était constitué d'une cellule de mesure regroupant plusieurs capteurs. L'originalité du système était le pompage de l'eau à travers la zone où elle est analysée, avec une chloration de celle-ci lorsqu'il n'y a pas de cycle de mesure. La chloration de l'eau de mer par électrolyse protège les capteurs contre le développement de bio-fouling. C'est donc cette chloration qui rend possible la bonne tenue dans le temps des capteurs qui restent en place sans intervention de maintenance pendant 3 mois théoriquement.

TABLEAU 1 – Gammes et caractéristiques des paramètres mesurés par MAREL Carnot entre 2004 et 2014.

Paramètres physico-chimiques	Gamme capteur ¹	Incertitude
Température	- 5 à + 30 °C	0,1 °C
Conductivité	0 à 70 mS/cm	0,3 mS/cm
Oxygène dissous	0 à 20 mg/L	0,2 mg/L
pH	6,5 à 8,5 UpH	0,2 UpH
Turbidité	0 à 4000 NTU	10 %
Fluorescence	0 à 500 FFU	10 %
Nitrate + Nitrite	0,1 à 100 µmol/L	5 %
Phosphate	0,1 à 100 µmol/L	5 %
Silicate	0,1 à 100 µmol/L	5 %

¹ il existe également des gammes expert définies par un expert de terrain, voir Halawi Ghosn et al. (2023).

L'ensemble de ces données était transmis deux fois par jour au Centre Ifremer Manche Mer du Nord de Boulogne-sur-Mer par liaison GSM, ensuite débutaient la validation et le traitement des données. Dès cette phase de transmission, les données étaient soumises à un ensemble de procédures de contrôle de qualité. Les données étaient alors caractérisées par un niveau de traitement et par un niveau de qualité (Figure 2).

Une partie de ce contrôle était fait automatiquement (contrôle du format des fichiers, de la gamme de valeurs observées en référence à des valeurs de références) ; les données étaient alors affectées dans un niveau de traitement T0,5. Un contrôle visuel était également réalisé afin d'identifier « à dire d'experts » le niveau de qualité de la donnée.



FIGURE 2 – Niveau de traitement et de qualité des données lors de la procédure de contrôle (Capture d’écran de l’outil de contrôle qualité OCQ)

Après cette étape, les données passaient en niveau de traitement T1,0 et étaient accessibles par l’internet via <http://www.ifremer.fr/difMARELCarnot/> (Figure 3). Les accès étaient possibles via trois domaines : public, scientifique et technique en fonction du profil de l’utilisateur. Les informations disponibles étaient différentes en fonction du profil utilisateur sélectionné lors de l’étape d’identification (cadre rouge sur Figure 3). Ainsi, le profil ‘public’ permettait de visualiser les données et d’avoir accès aux rapports de métrologie alors que le profil ‘scientifique’ permettait en plus de télécharger les données et d’avoir accès à d’autres informations sur le fonctionnement du système. Le profil ‘technique’ était principalement réservé aux personnes chargées de la maintenance du système.



FIGURE 3 – Page d’accueil du site de consultation des données MAREL Carnot jusque 2014

La chambre de passage était changée trimestriellement et conduisait à la vérification sous assurance de qualité de l’étalonnage des capteurs (Tableau 2). Un rapport de métrologie permettait alors d’affecter un niveau de qualité définitif à la donnée qui passait en niveau de traitement final T2,0.

TABLEAU 2 – Métrologie : Règle de conformité des capteurs de MAREL Carnot pour les vérifications métrologiques jusque 2014

Paramètres	Oxygène dissous(mg/L)	Conductivité(mS/cm)	pH	Turbidité(N.T.U.)	Fluorescence(FFU)Sans nettoyage	Température(°C)
Conformité	+/- 0,20	+/- 0,30	+/- 0,20	+/- 10%	+/- 10%	+/- 0,1

2.2. Le système MAREL Carnot depuis 2014

2.2.1. La base de données

L'année 2014 a été marquée par une migration des données vers la base CORIOLIS.

Les données issues des plateformes de mesures à haute fréquence comme MAREL Carnot (Figure 4) sont collectées par CORIOLIS et diffusées par le Centre de données pour l'océanographie côtière opérationnelle (CDOCO). Elles sont accessibles/téléchargeables via : <http://data.coriolis-cotier.org/> (dernier accès : 14 mars 2025). Le code plateforme pour MAREL Carnot dans CORIOLIS est 62443.

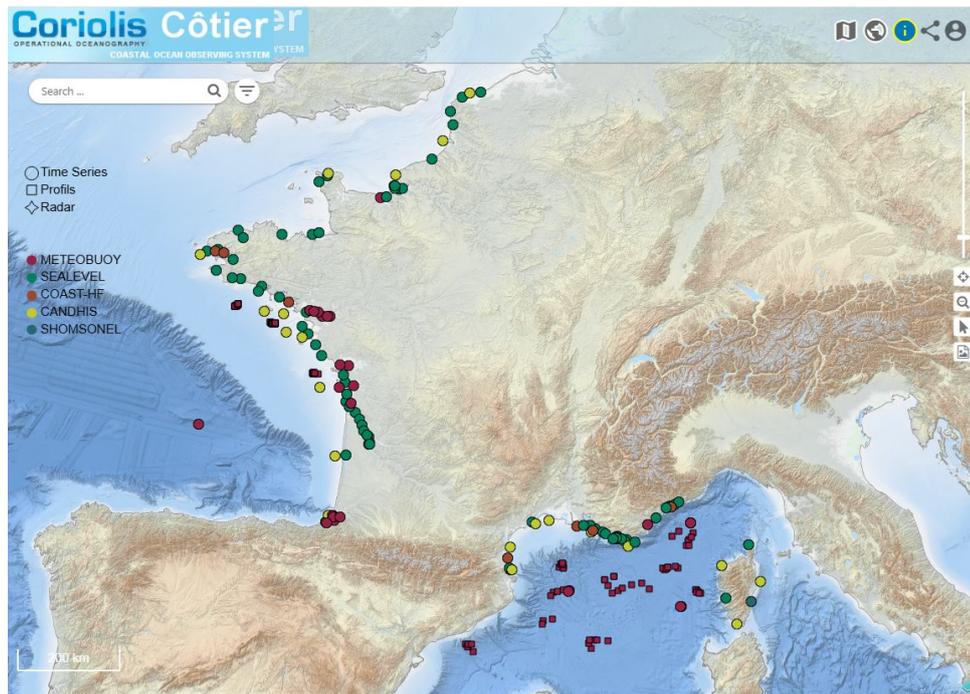


FIGURE 4 – Localisation des différents sites de l'infrastructure CORIOLIS dont fait partie MAREL Carnot

Ce site web permet également un accès à la visualisation des données MAREL Carnot.

L'utilisateur des données se doit de citer la source en utilisant la formule suivante :

Lefebvre Alain (2015). Données et métadonnées MAREL Carnot issues du centre de données Coriolis. SEANOE. <https://doi.org/10.17882/39754>

2.2.2. Le système de mesures

La station automatisée MAREL Carnot, qui a été implantée sur site en décembre 2004, regroupe des éléments électroniques, informatiques et mécaniques conçus dans les années 90. Le vieillissement général, qui affecte tout particulièrement les systèmes exposés à l'environnement marin, impose le remplacement d'un certain nombre d'éléments qui ne sont plus fonctionnels. Par ailleurs, l'obsolescence de bon nombre de composants électroniques a conduit à remplacer le système de mesure par un nouvel ensemble automate/cellule de mesure.

Le coeur du système se compose donc maintenant des éléments suivants :

- un automate de contrôle de mesure de type Costof2 depuis 2020,
- une perche sur laquelle se trouve une pompe de circulation (pompage de l'eau sur la sonde),
- un débitmètre pour le contrôle de la pompe,
- un chlorateur pour la production de chlore par électrolyse,
- une sonde multi-paramètres de type MP 6 nke (Tableau 3 et figure 5).

Voir également les précisions sur les phases de déploiement des capteurs et les gammes de valeurs étudiées via <https://www.seanoe.org/data/00286/39754/>

TABLEAU 3 – Caractéristiques principales de la sonde nke MP6 pour les paramètres mesurés par MAREL Carnot depuis 2014.

Paramètres	Précision	Gamme capteur ¹
Pression	0,006 m	0 à 20 m
Température	±0,05 °C	-5 à + 35 °C
Salinité	±0,1 PSU	2 à 42 PSU
Conductivité	±0,05 mS/cm	0 à 70 mS/cm
Oxygène dissous	±5 %	0 à 16 mg/L
Saturation en oxygène		0 à 120 %
Fluorescence	±5 %	0 à 500 FFU
Turbidité	±5 %	0 à 2000 NTU

¹ il existe également des gammes expert définies par un expert de terrain, voir Halawi Ghosn et al. (2023).



FIGURE 5 – Système de mesure immergé en position sur sa perche

3. RESULTATS

3.1. Bilan du fonctionnement

A ce jour, les analyses des nutriments ainsi que les paramètres mesurés dans l'air ne sont plus accessibles. Les systèmes de mesures devraient être de nouveau opérationnels courant 2025.

Les figures 6 à 16 illustrent la variabilité des paramètres mesurées par la station MAREL Carnot aux périodes de fonctionnement de la station jusqu'en 2024. Un focus de cette variabilité au cours de la dernière année de disponibilité des données est donné en annexe.

Les tableaux montrent les statistiques descriptives des séries de données de chaque paramètre (MIN = valeur minimale, Q1 = premier quartile, Médiane, Moyenne, Ecart-type, Q3 = troisième quartile, MAX = la valeur maximale, n = nombre de données, %NA = nombre de données manquantes par rapport au nombre attendu par rapport la fréquence de mesure et la période considérée).

Oxygène

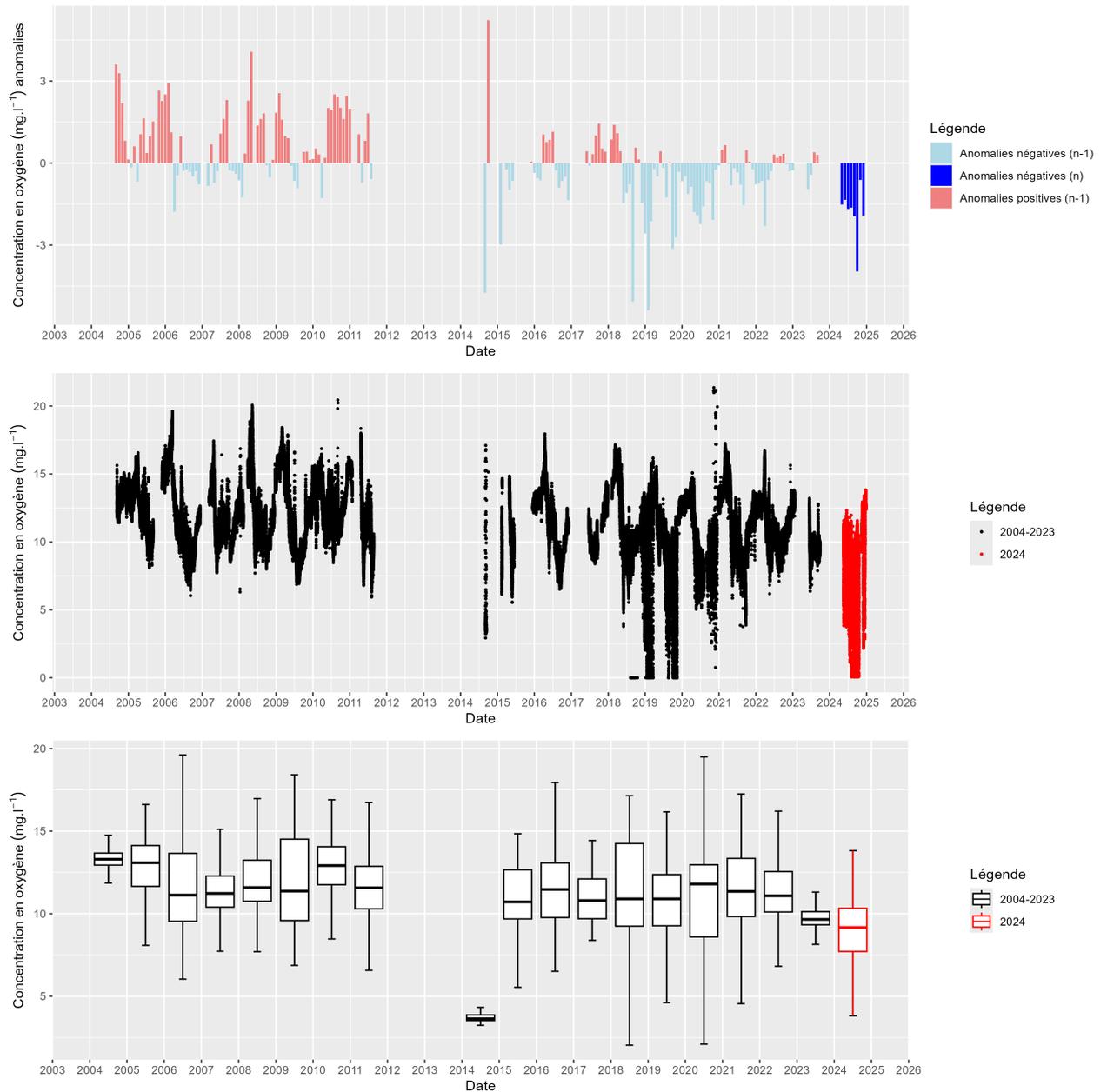


FIGURE 6 – Évolution de la concentration en oxygène dissous (mg.l^{-1}) mesurée par le système MAREL Carnot entre 2004 et 2024. Du haut vers le bas : écarts mensuels à la moyenne de la série, valeurs des mesures et boîtes à moustaches par année.

TABLEAU 4 – Statistiques - Oxygène dissous

Période	variable	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n	%NA
2004-2024	DOX	0,0	9,6	11,4	2,8	11,3	13,1	24,3	546285	39,1
2024	DOX	0,1	7,6	8,5	3,0	9,1	10,3	13,8	26352	47,6

Oxygène Saturation

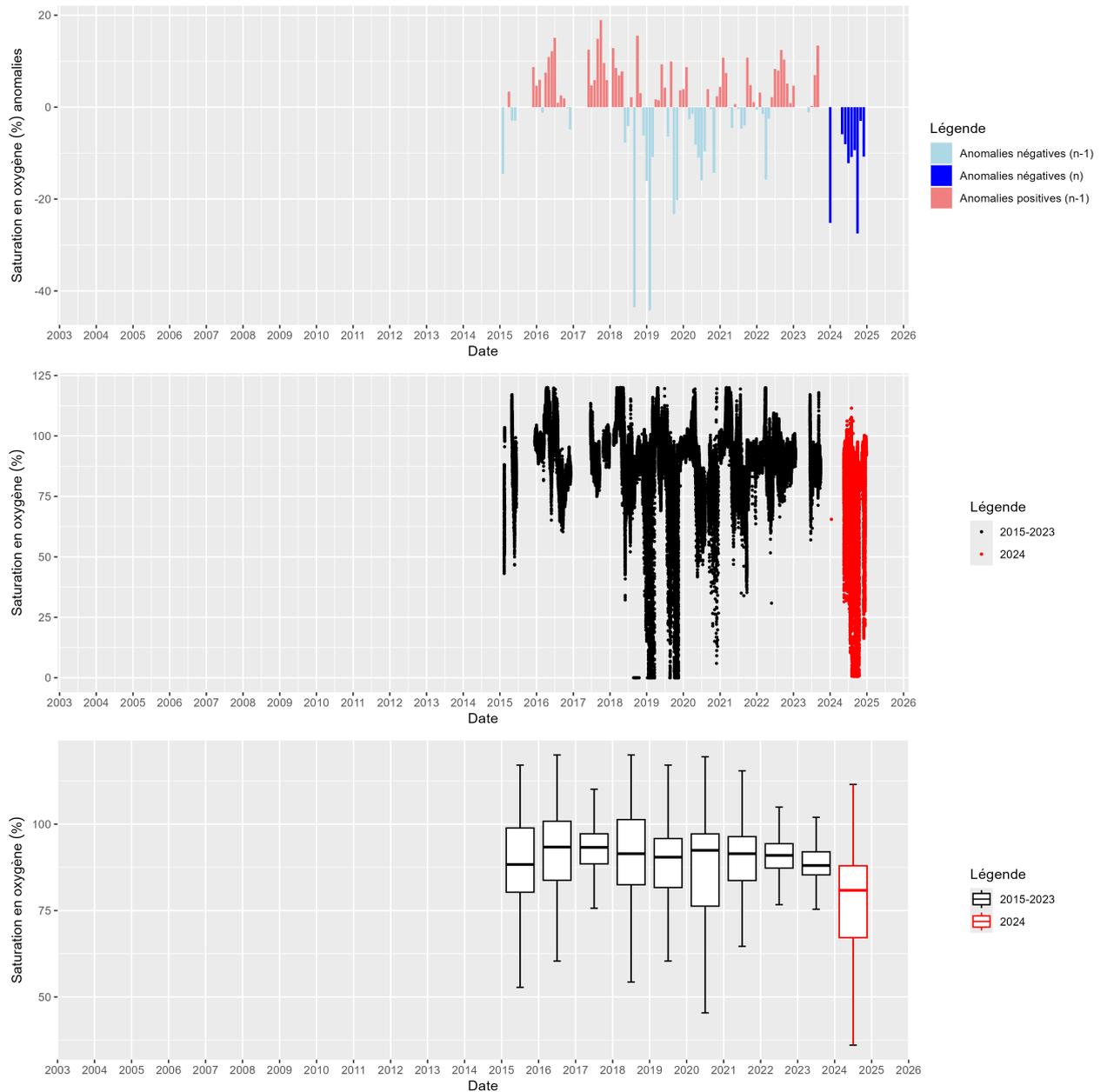


FIGURE 7 – Évolution de la saturation en oxygène (%) mesurée par le système MAREL Carnot entre 2004 et 2024. Du haut vers le bas : écarts mensuels à la moyenne de la série, valeurs des mesures et boîtes à moustaches par année.

TABEAU 5 – Statistiques - Saturation en oxygène

Période	variable	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n	%NA
2004-2024	OSAT	0,0	82,9	87,3	18,4	90,6	96,3	120,0	546285	68,6
2024	OSAT	0,6	64,8	71,7	24,5	80,5	87,7	111,5	26352	47,3

Turbidité

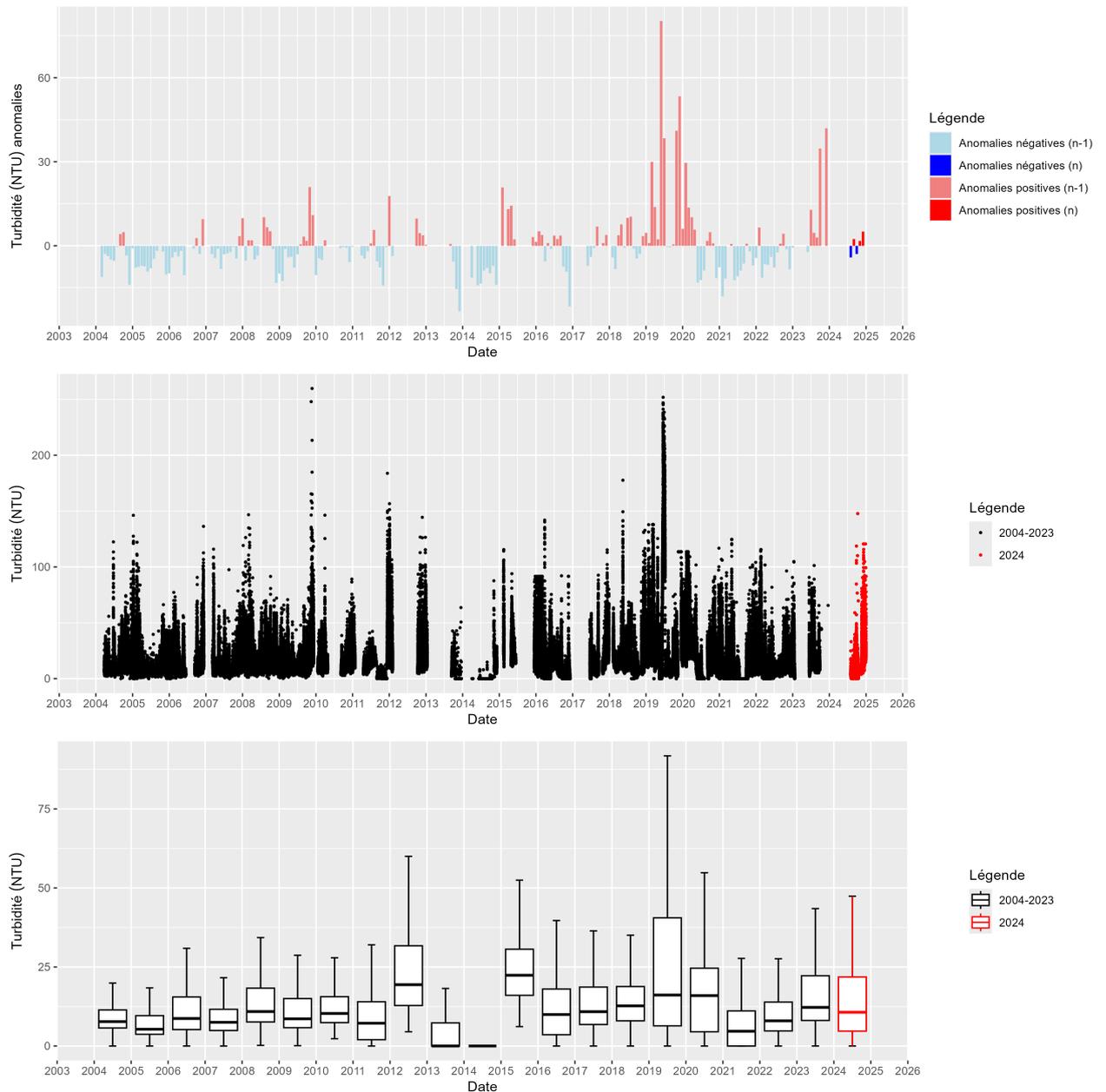


FIGURE 8 – Évolution de la turbidité (NTU) mesurée par le système MAREL Carnot entre 2004 et 2024. Du haut vers le bas : écarts mensuels à la moyenne de la série, valeurs des mesures et boîtes à moustaches par année.

TABLEAU 6 – Statistiques - Turbidité et matières en suspension

Période	variable	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n	%NA
2004-2024	TURB	0	4,7	14,9	20,5	9,1	17,6	269,2	546285	34,4
2024	TURB	0	0,1	20,2	38,5	10,2	21,4	269,2	26352	45,5

Fluorescence

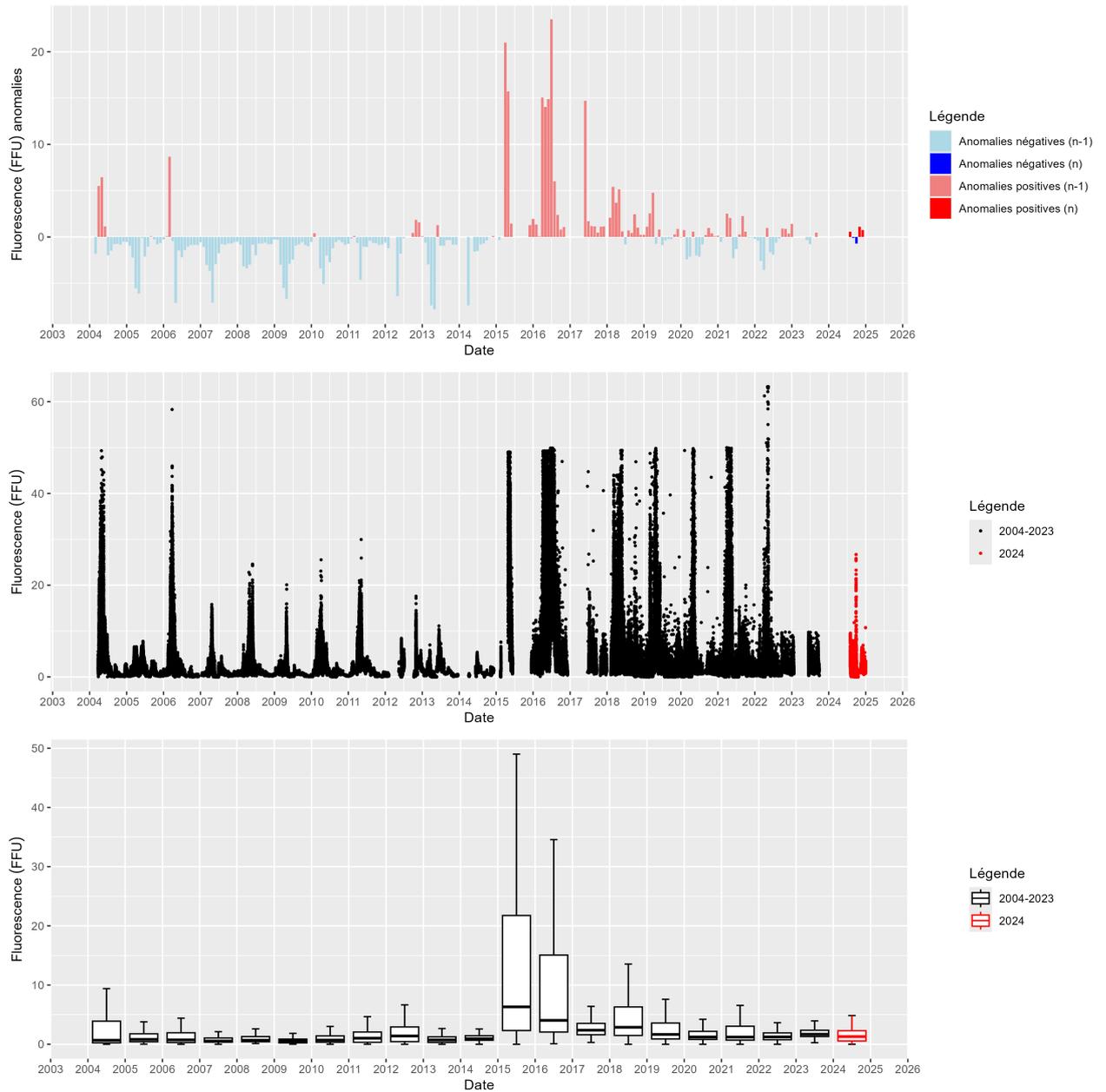


FIGURE 9 – Évolution de la fluorescence (FFU) mesurée par le système MAREL Carnot entre 2004 et 2024. Du haut vers le bas : écarts mensuels à la moyenne de la série, valeurs des mesures et boîtes à moustaches par année.

TABLEAU 7 – Statistiques - Fluorescence

Période	variable	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n	%NA
2004-2024	FLUO	0	0,5	3,2	6,8	1,1	2,5	116,6	546285	28,6
2024	FLUO	0	0,6	7,8	13,0	1,9	6,0	42,9	26352	40,8

Température

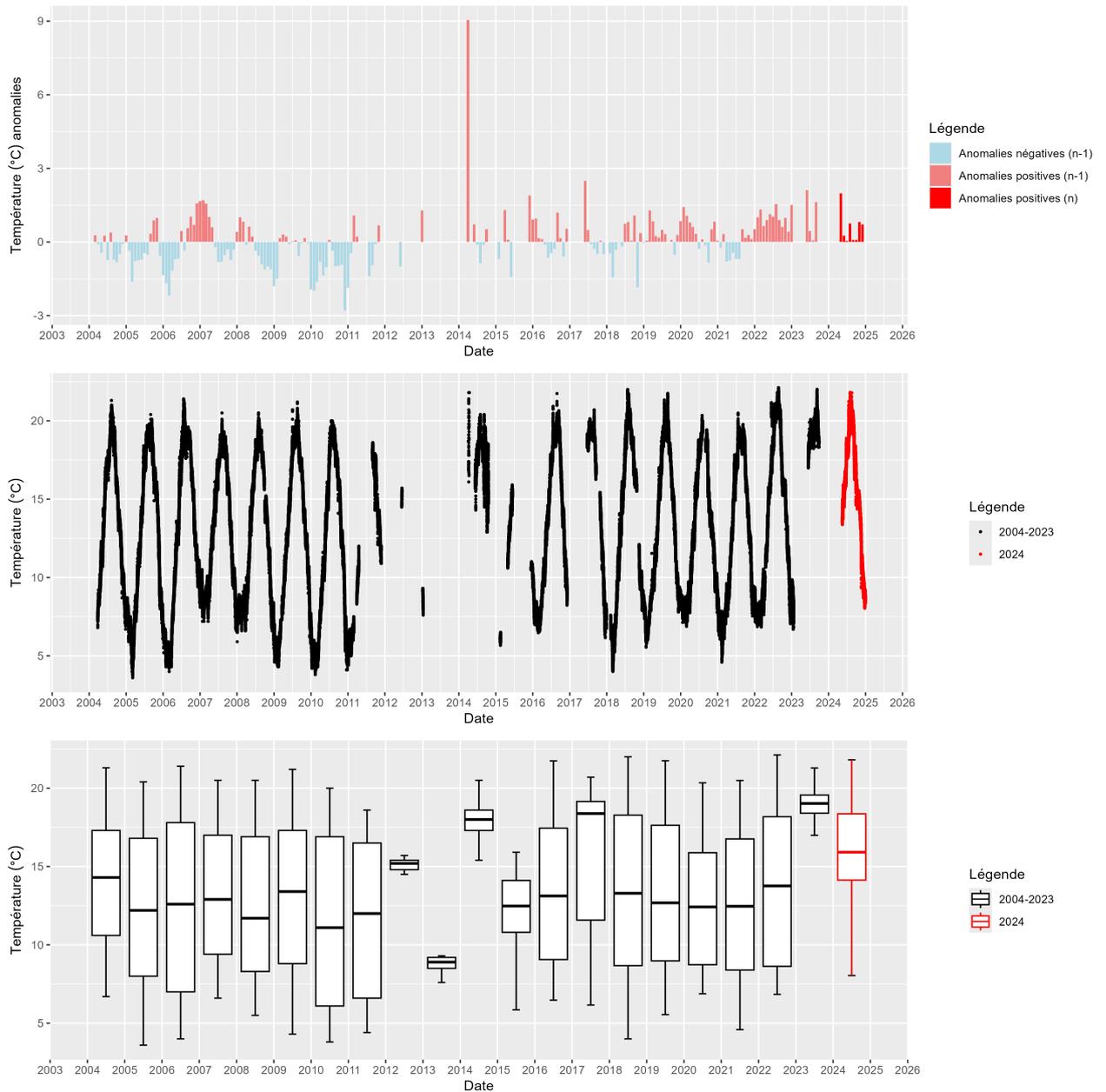


FIGURE 10 – Évolution de la température (°C) mesurée par le système MAREL Carnot entre 2004 et 2024. Du haut vers le bas : écarts mensuels à la moyenne de la série, valeurs des mesures et boîtes à moustaches par année.

TABLEAU 8 – Statistiques - Température

Période	variable	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n	%NA
2004-2024	TEMP_WATER	3,6	8,9	13,1	4,6	13,2	17,5	23,5	546285	32,5
2024	TEMP_WATER	8,0	14,1	15,8	3,5	15,9	18,4	21,8	26352	40,8

Salinité

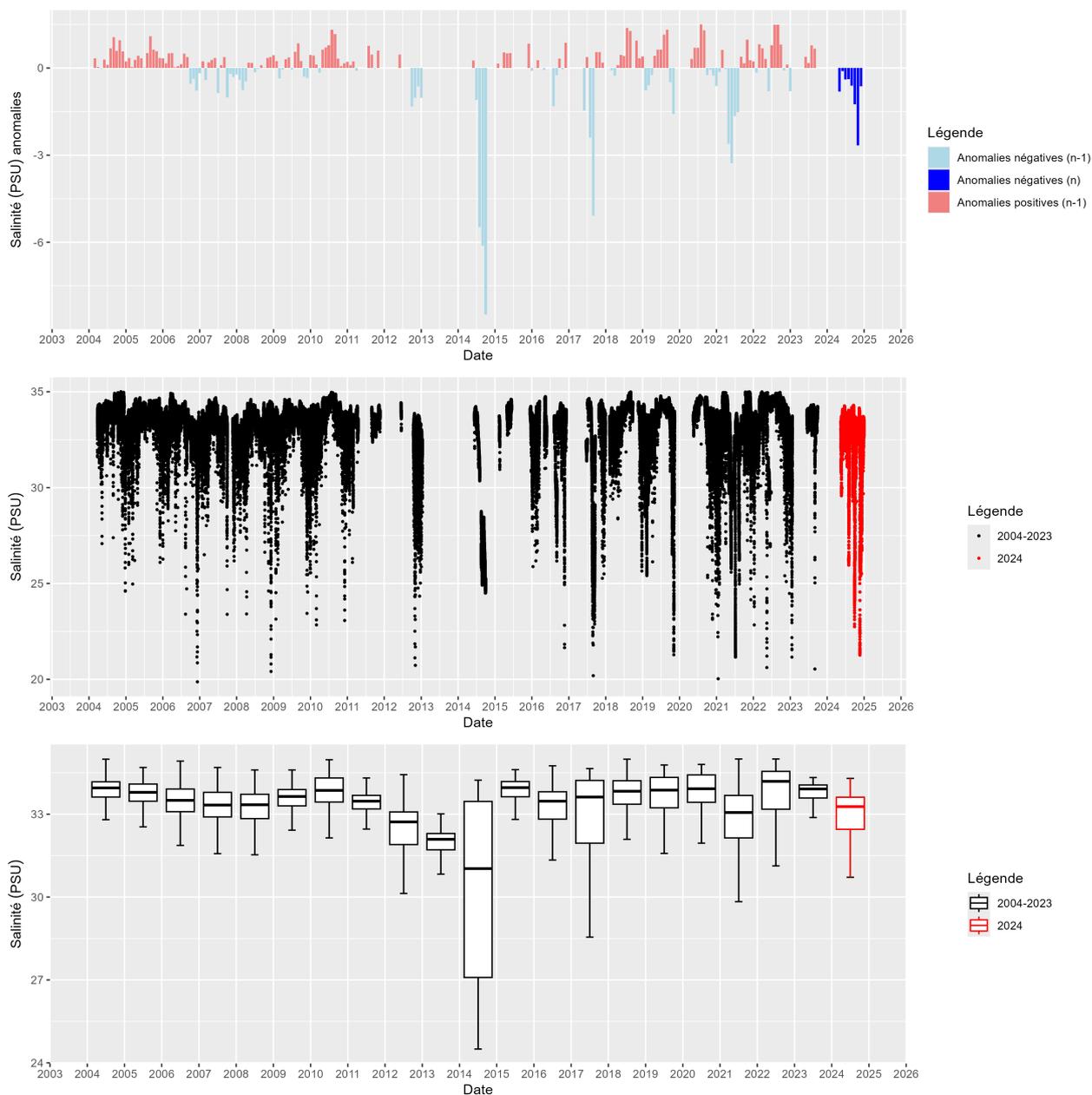


FIGURE 11 – Évolution de la salinité (PSU) mesurée par le système MAREL Carnot entre 2004 et 2024. Du haut vers le bas : écarts mensuels à la moyenne de la série, valeurs des mesures et boîtes à moustaches par année.

TABLEAU 9 – Statistiques - Salinité

Période	variable	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n	%NA
2004-2024	SALI	15,0	33,0	33,3	1,4	33,6	34,0	35,0	546285	40,3
2024	SALI	21,3	32,5	32,6	1,8	33,3	33,6	34,3	26352	47,6

Conductivité

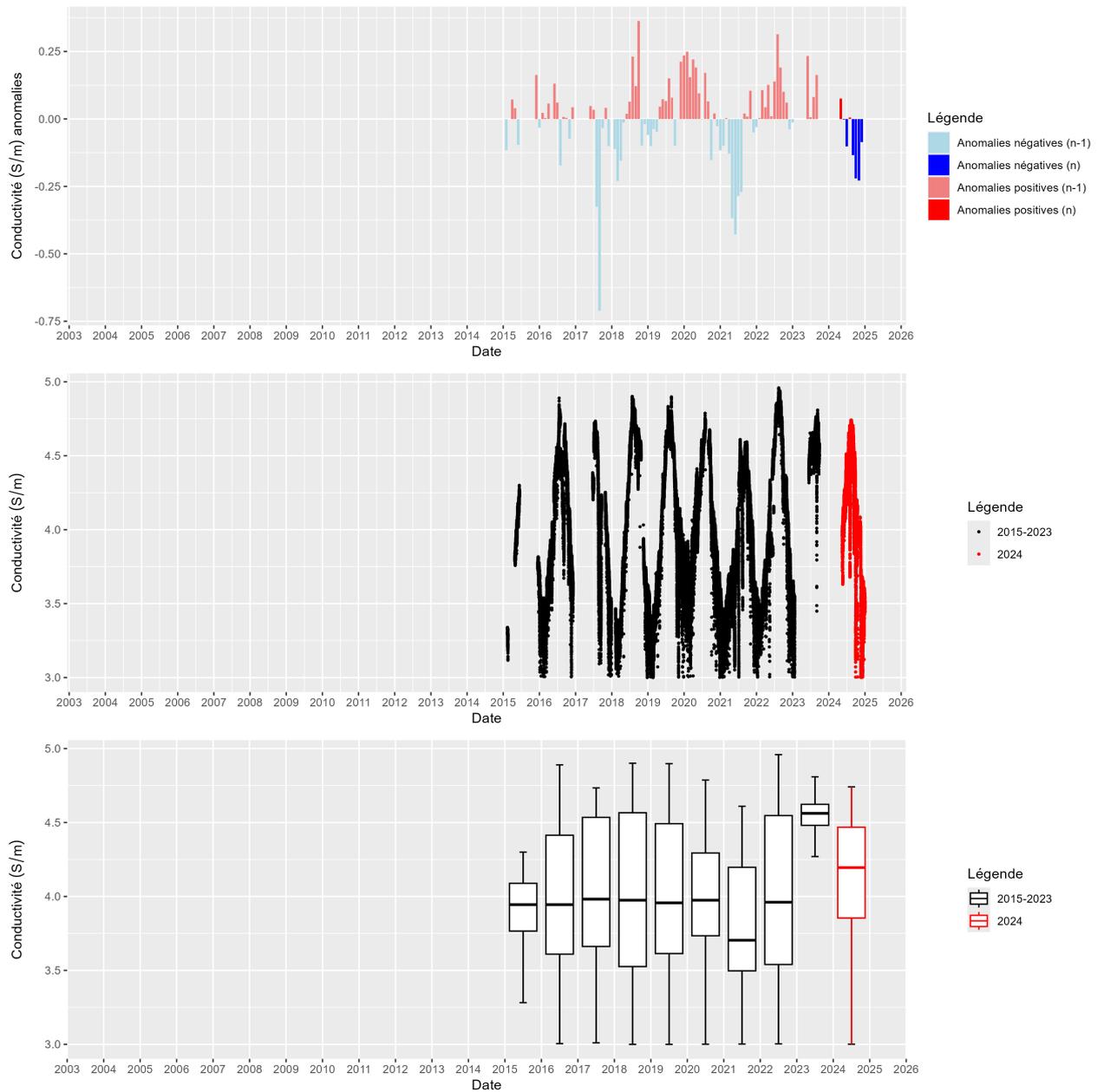


FIGURE 12 – Évolution de la conductivité (S/m) mesurée par le système MAREL Carnot entre 2004 et 2024. Du haut vers le bas : écarts mensuels à la moyenne de la série, valeurs des mesures et boîtes à moustaches par année.

TABLEAU 10 – Statistiques - Conductivité

Période	variable	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n	%NA
2004-2024	CONDUCTIVITY	3	3,6	4,0	0,5	4,0	4,5	5,0	546285	67,6
2024	CONDUCTIVITY	3	3,9	4,1	0,4	4,2	4,5	4,7	26352	47,8

Irradiance

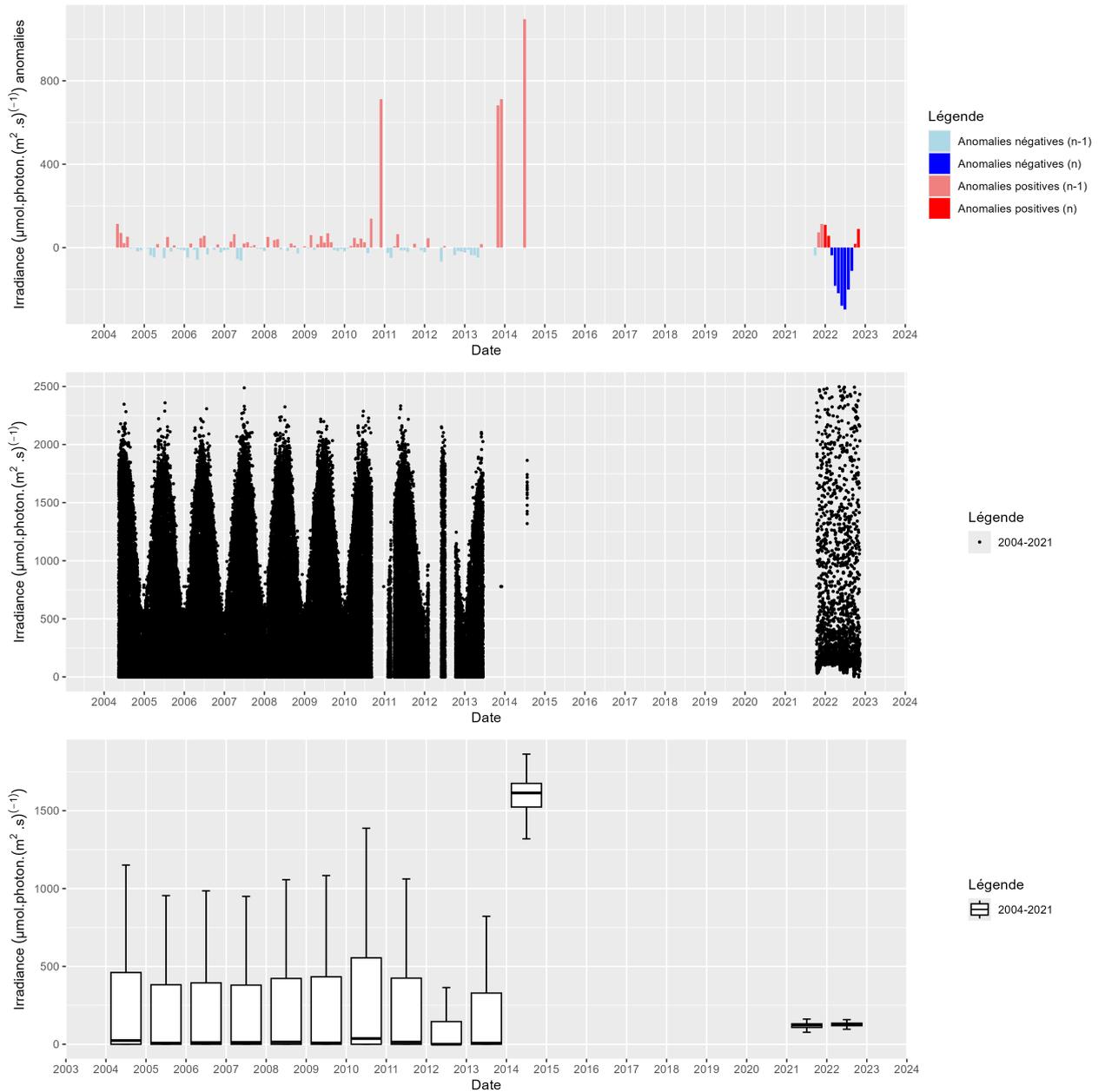


FIGURE 13 – Évolution de l'irradiance ($\mu\text{mol.photon.}(\text{m}^2.\text{s})^{-1}$) mesurée par le système MAREL Carnot entre 2004 et 2024. Du haut vers le bas : écarts mensuels à la moyenne de la série, valeurs des mesures et boîtes à moustaches par année.

TABLEAU 11 – Statistiques - Irradiance

Période	variable	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n	%NA
2004-2024	IRRADIANCE	0	0	280.9	459.5	34.7	361.8	2497.3	546285	64,2
2024	IRRADIANCE	-	-	-	-	-	-	-	26352	100,0

Phosphate

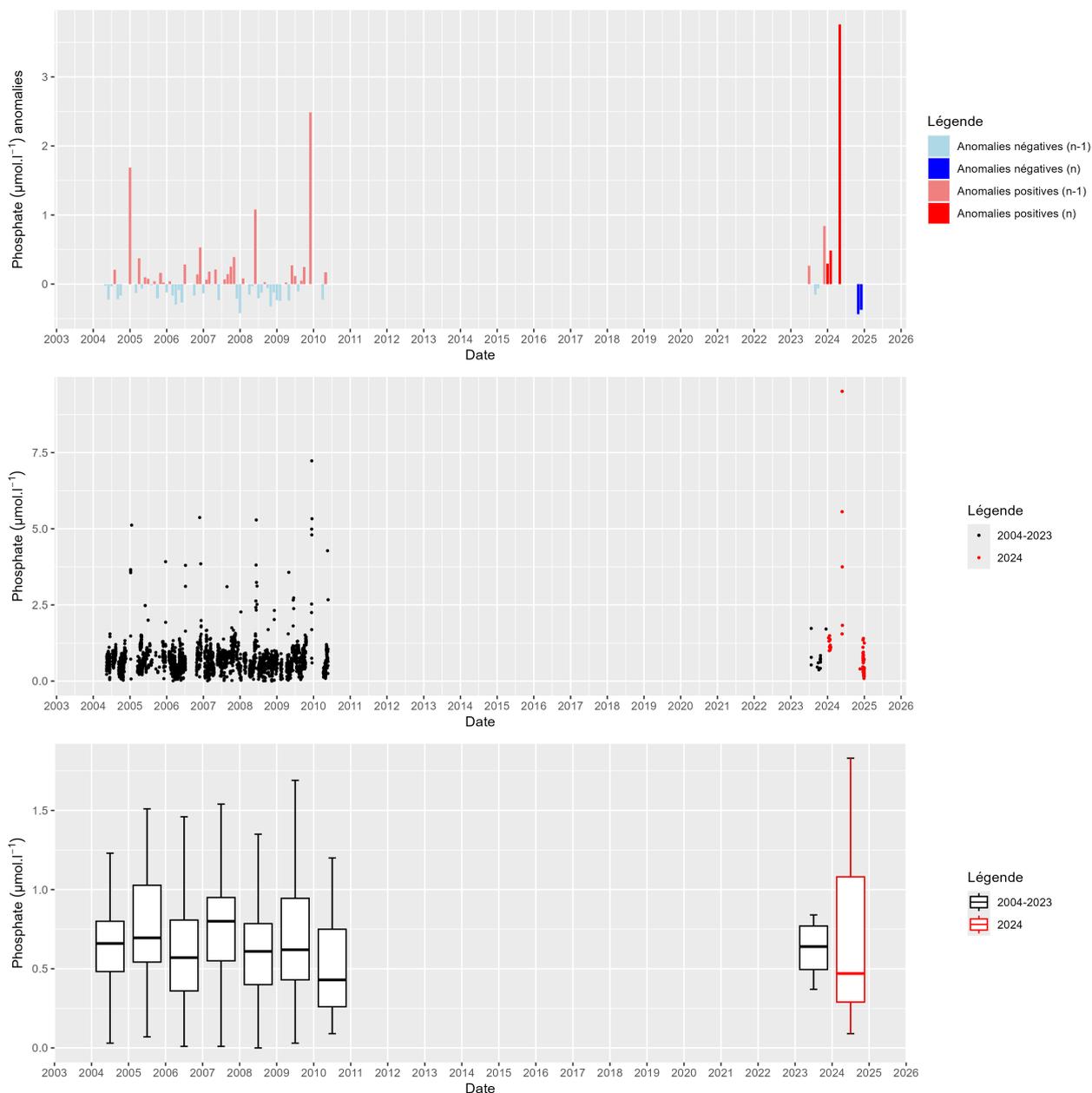


FIGURE 14 – Évolution de la concentration en phosphate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) mesurée par le système MAREL Carnot entre 2004 et 2024. Du haut vers le bas : écarts mensuels à la moyenne de la série, valeurs des mesures et boîtes à moustaches par année.

TABLEAU 12 – Statistiques - Phosphates

Période	variable	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n	%NA
2004-2024	PO4	0,0	0,4	0,7	0,7	0,7	0,9	10,0	546285	99,5
2024	PO4	0,1	0,3	0,9	1,3	0,5	1,1	9,5	26352	99,7

Nitrite + Nitrate

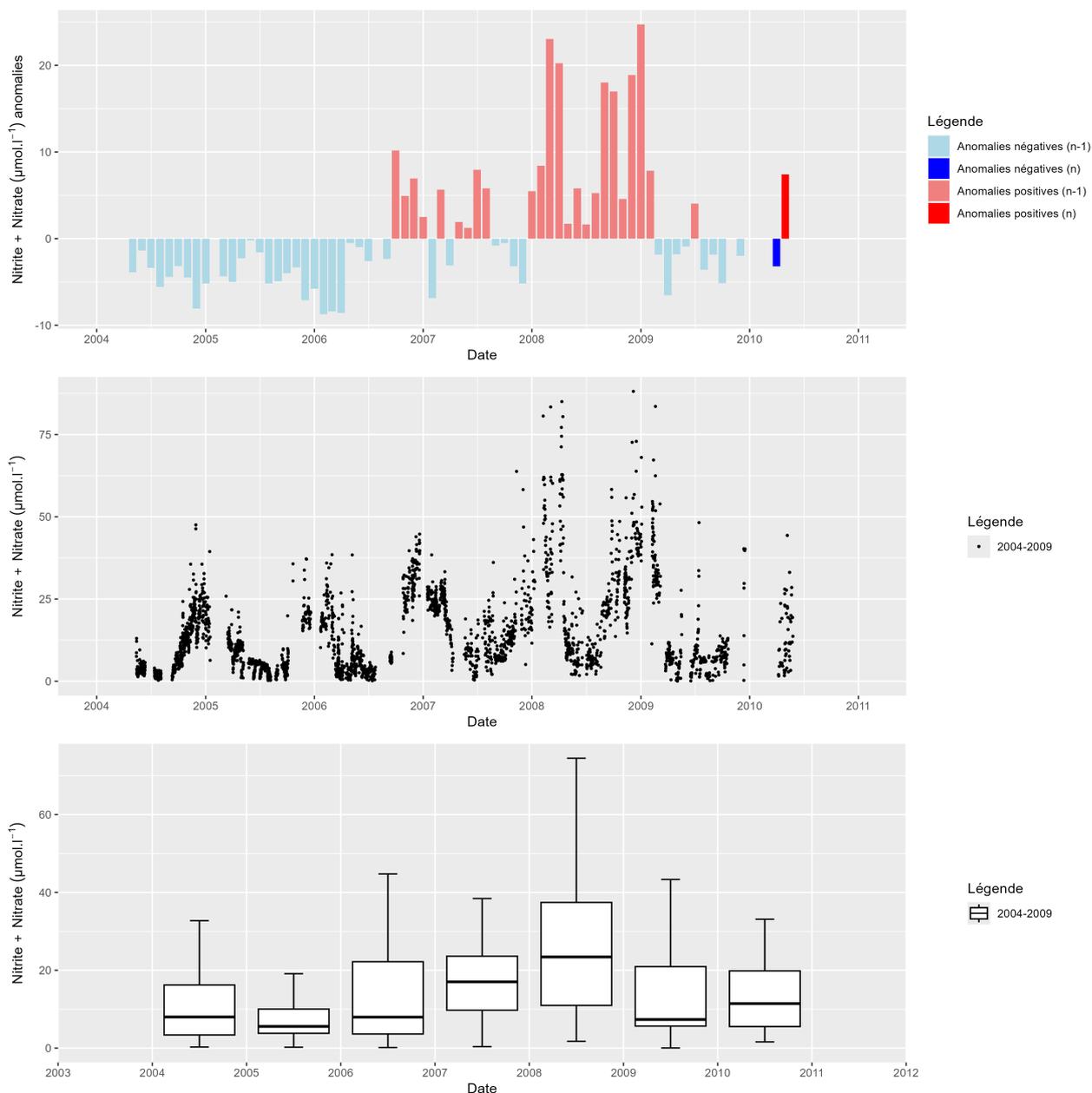


FIGURE 15 – Évolution de la concentration en nitrate et nitrite ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) mesurée par le système MAREL Carnot entre 2004 et 2024. Du haut vers le bas : écarts mensuels à la moyenne de la série, valeurs des mesures et boîtes à moustaches par année.

TABLEAU 13 – Statistiques - Nitrite + Nitrate

Période	variable	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n	%NA
2004-2024	NTRZ	0	5.2	15.2	13.7	10.9	21.9	98.9	546285	99,4
2024	NTRZ	-	-	-	-	-	-	-	26352	100,0

Silicate

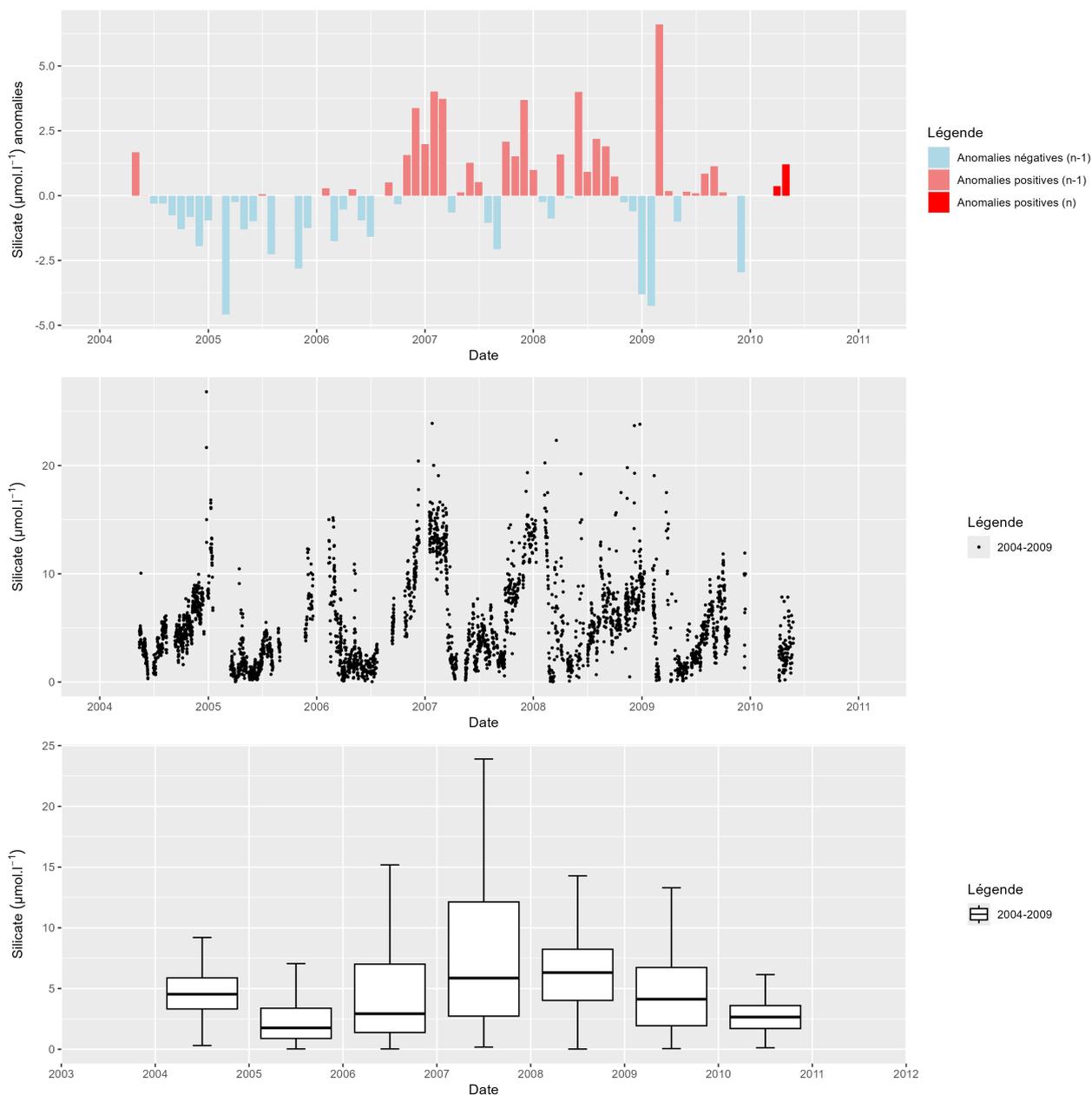


FIGURE 16 – Évolution de la concentration en silicate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) mesurée par le système MAREL Carnot entre 2004 et 2024. Du haut vers le bas : écarts mensuels à la moyenne de la série, valeurs des mesures et boîtes à moustaches par année.

TABLEAU 14 – Statistiques - Silicate

Période	variable	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n	%NA
2004-2024	SIOH	0	2	5.1	4.1	4.1	7.3	39.2	546285	99,4
2024	SIOH	-	-	-	-	-	-	-	26352	100,0

3.2 Valorisation des données

Rapports de fonctionnement du système MAREL Carnot

Les informations relatives aux périodes de fonctionnement précédentes sont disponibles dans les rapports suivant, soit téléchargeables sur le site du laboratoire Environnement & ressources du centre Ifremer Manche Mer du Nord : <https://manchemerdunord.ifremer.fr/Environnement/LER-Boulogne-sur-Mer/Surveillance-et-Observation/MAREL-Carnot/Valorisations-Marel-Carnot> pour les plus anciens (2006 à 2011) ou via la base Archimer (<http://archimer.ifremer.fr/>) depuis 2012 (voir DOI associés aux références).

Lefebvre A. & M. Répécaud, 2006. MAREL Carnot - Partie 1 : Bilan de la mise en place d'un système de mesures automatisées à haute fréquence en zone côtière de Boulogne-sur-Mer. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/06.09, 18 pages + CD ROM.

Lefebvre A., 2007. MAREL Carnot : Partie 2 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Données de l'année 2006. Ifremer/RST.LER.BL/07.08, 44 pages.

Lefebvre A., 2008. MAREL Carnot : Partie 3 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Données de l'année 2007. Ifremer/RST.LER.BL/08.04, 23 pages.

Lefebvre A., 2010. MAREL Carnot : Rapport n° 4 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2009. Ifremer/RST.LER.BL/10.08, 20 pages.

Lefebvre A., 2011. MAREL Carnot : Rapport n°5 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2010. Ifremer/RST.LER.BL/11.04, 19 p.

Lefebvre A., Rousseeuw Kévin, Caillault Émilie, 2012. MAREL Carnot : Rapport n°6 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer) Bilan de l'année 2011. Ifremer/RST.LER.BL/12.05, 36 p. <https://archimer-intranet.ifremer.fr/doc/00087/19835/>

Lefebvre A., Rousseeuw K., 2013. MAREL Carnot : Rapport n° 7 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2012. Ifremer/RST.LER.BL/13.09, 25 p. <https://archimer-intranet.ifremer.fr/doc/00152/26280/>

Lefebvre A., Rousseeuw K., 2014. MAREL Carnot - Rapport n° 8 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2013. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/14.02, 28 p. <https://archimer-intranet.ifremer.fr/doc/00183/29432/>

Lefebvre A., Devreker D., 2015. MAREL Carnot : Rapport n° 9 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2014. Ifremer/RST.LER.BL/15.06, 37 pages. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00280/39136/>

Lefebvre A., Poisson-Caillault E., 2016. MAREL Carnot : Rapport n° 10 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2015. Ifremer/RST.LER.BL/16.06, 26 pages. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00340/45160/>

Lefebvre A., Poisson-Caillault E., 2017. MAREL Carnot : Rapport n° 11 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Opérations lors de l'année 2016. Ifremer/RST.LER.BL/17.06, 24 pages. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00437/54869/>

Lefebvre A., Poisson-Caillault E., Grassi K., 2018. MAREL Carnot : Rapport n° 12 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan 2017. Ref. Ifremer/RST.LER.BL/18.05. Ifremer. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00441/55258/>

Lefebvre A., Grassi K., 2019. MAREL Carnot : Rapport n° 13 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan 2018. Ref. Ifremer/RST.LER.BL/19.08. Ifremer.

Lefebvre A., Grassi K., 2020. MAREL Carnot : Rapport n°14 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan 2019. Ref. ODE/UL/RST.LER.BL/20.05. Ifremer. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00642/75445/>

Halawi-Ghosn R., Lefebvre A., 2023. Report of the MAREL Carnot station : Report n°15 : A high frequency monitoring station in an anthropogenically influenced coastal zone (Boulogne-sur-Mer). Period

2020-2022. Ref. RST ODE/UL/LER-BL/23.01. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00819/93052/>

Lefebvre A., Devreker D., 2024. MAREL CARNOT : Rapport n°16 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique. Bilan de l'année 2023. Ref. IFREMER/ODE/COAST/LERBL/24.06. 39p. Ifremer. <https://doi.org/10.13155/100307>

Ces rapports sont téléchargeables sur le site du laboratoire Environnement & ressources du centre Ifremer Manche Mer du Nord : <https://manchemerdunord.ifremer.fr/Environnement/LER-Boulogne-sur-Mer/Surveillance-et-Observation/MAREL-Carnot/Valorisations-Marel-Carnot> ou via la base Archimer (<http://archimer.ifremer.fr/>).

Jeu de données MAREL CARNOT

Un "Data Paper" (Halawi et al. 2023) a été publié dans Earth System Science Data pour détailler les caractéristiques du jeu de données produit par MAREL Carnot. L'objectif de cet article est de décrire le jeu de données de MAREL Carnot et de montrer comment il peut être utilisé pour plusieurs objectifs de recherche. Dans cet article, plusieurs paramètres physiques, chimiques et biologiques mesurés par cette station sont présentés. Il démontre également que le jeu de données MAREL Carnot peut être utilisé pour évaluer des états environnementaux ou écologiques et mener des recherches dans le domaine de l'écologie du phytoplancton marin et de l'océanographie. En outre, il montre que cet ensemble de données peut indirectement contribuer à l'amélioration des stratégies européennes de gestion de l'environnement.

Utilisation des données issues du système MAREL Carnot

La valorisation et la diffusion des données MAREL Carnot via son numéro DOI (<http://www.seanoe.org/data/00286/39754/>) associé au Data Paper permet aujourd'hui d'accroître son utilisation à des fins de Recherche mais aussi d'Enseignement et de soutien aux besoins de la Société (études environnementales).

Valorisations scientifiques

[Travaux en lien direct avec MAREL Carnot ou en lien avec les observations à Haute Fréquence]

Publication dans des revus avec comité de lecture [3]

Halawi G. R., Poisson-Caillault E., Charria G., Bonnat A., Repecaud M., Facq J-V, Quéméner L., Duquesne V., Blondel C., Lefebvre A. (2023). MAREL Carnot data and metadata from Coriolis Data Center. Earth System Science Data. 15 (9). 4205-4218. <https://doi.org/10.5194/essd-15-4205-2023>, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00819/93113/>

Aardema H.M., Rijkeboer M., Lefebvre A., Veen A., Kromkamp J.C. (2018) High resolution in situ measurements of phytoplankton photosynthesis and abundance in the Dutch North Sea. Open Science, <https://doi.org/10.5194/os-2018-21>.

Thi-Thu-Hong Phan, Émilie Caillault, André Bigand. Comparative Study on Univariate Forecasting Methods for Meteorological Time Series. 2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Sep 2018, Rome, France. IEEE, pp.2380-2384, doi:10.23919/EUSIPCO.2018.8553576

Colloques internationaux [10]

Artigas L.F., Hubert Z., Gallot C., Lizon F., Louchart A., Robache K., Veghaeghe F., Dédécker C., Créach V., Lefebvre A., Halawi Ghosn R., Devreker D., Facq J.-V., Répécaud M., Wacquet G., Claquin P., Poisson Caillault E., Debusschere E., Deneudt K., Lagaisse R., Moltermans J., Rombouts I., Owe Möller K., Macovei V., Rühl S., Voynova Y. G. (2023). Multiscale harmonised automated observations of phytoplankton biomass, diversity and productivity dynamics in the English Channel and North Sea as part of the coastal Pilot Super Site approach (JERICO S3). 10th EuroGOOS International Conference "European operational oceanography for the ocean we want – addressing the UN Ocean Decade Challenges", 03-05/10/2023, Galway, Ireland.

Lefebvre A., Halawi Ghosn R., Poisson-Caillault E., 2022. Machine Learning & Harmful Phytoplankton Blooms : Towards an expert Forecasting, Warning, and Decision-Support Numerical System. International Statistical Ecology Conference, Cape Town in South Africa. From 27 June until 1 July 2022 (Online).

Carrat M., Halawi Ghosn R., Hébert P.-A., Lefebvre A., Poisson-Caillault E., 2022. Incremental clustering of high frequency coastal and marine observations for the detection of changes in the environmental states and phytoplankton communities and, early warning of HABs. 11th Ferry Box Workshop, 28-29 September 2022, HEREON, Geesthacht, Allemagne.

Artigas L.F., Hubert Z., Gallot C., Louchart A., Epinoux A., Robache K., Verhaeghe F., Bonato S., Dédécker C., Lebourg E., Bruaut M., Didry M., Lizon F., Lefebvre A., 2022. English Channel and Southern North Sea phytoplankton monitoring applying automated approaches. JERICO S3 joint PSS/IRS workshop, 26-27 September 2022, HEREON, Geesthacht, Germany.

Poisson-caillault E., Phan T.-T.-H., Lefebvre A., 2022. Missing data, DTW-based imputation. IA for water : a joint RAINSMORE/SWOT workshop on the use of Artificial Intelligence for time series and images processing for Hydrometeorological applications, 24-28 October 2022, Fortaleza, Brasil.

Louchart A., Lefebvre A., Wacquet G., Artigas L.F., 2018. Spatial distribution of phytoplankton communities in the English Channel by applying innovative techniques. Third JERICO-NEXT Workshop on Phytoplankton Automated Observation. March 19-21, 2018 - M.I.O., Marseille, France.

Louchart A., Lizon F., Lefebvre A., Artigas L.F., 2018. Spatial distribution of phytoplankton communities in the eastern English Channel during spring bloom. Third JERICO-NEXT Workshop on Phytoplankton Automated Observation. March 19-21, 2018 - M.I.O., Marseille, France.

Lefebvre A., Grassi K., Phan T.T.H., Devreker D., Bigand A., Poisson-Caillault E., 2018. Automated tools for analyzing outputs of automated sensors : High frequency Data. Third JERICO-NEXT Workshop on Phytoplankton Automated Observation. March 19-21, 2018 - M.I.O., Marseille, France.

Poisson-Caillault E., Grassi K., Phan T.T.H., Dezecache C., Prygiel J., and Lefebvre A., 2018. DTWBI and uHMM R-packages for multivariate time series preprocessing and interpretation. Colloque Earth science meeting, 22-26 oct 2018, Lille, France.

Grassi K., Devreker D., Bigand A., Poisson-Caillault E., Lefebvre A., 2018. Trend analysis (TTA tools) and unsupervised clustering (uHMM tools) to characterize environmental events from low and high Frequency data series. General Assembly H2020 JERICO-NEXT. Sept 24-27, 2018 - Galway, Ireland.

Poisson-Caillault E., Dezecache C., Phan T.T.H., Grassi K., Prygiel J., Lefebvre A., 2018. Data completion, characterization of environmental states and dynamics using multiparameter time series : DTWBI, DTWUMI & uHMM R-packages. General Assembly H2020 JERICO-NEXT. Sept 24-27, 2018 - Galway, Ireland.

Communications, Colloques nationaux [6]

Halawi Ghosn R., Poisson Caillault E., Wacquet G., Lefebvre A. (2023). Utilisation de l'apprentissage automatique pour caractériser la dynamique du phytoplancton et prévoir les efflorescences algales nuisibles. Colloque EGHYMANCHE 2023, Ecologie marine, Géosciences et Hydrodynamique sur la façade Manche - Mer du Nord, 5-7 juillet 2023, Wimereux.

Halawi Ghosn R., Poisson-Caillault E., Lefebvre A., 2022. Machine Learning and Harmful Phytoplankton : Definition of Environmental States Favorable for Blooms, Bloom Dynamics, and Development of an Expert Forecasting, Warning and Decision Making System. Assemblée Générale du SNO COAST-HF de l'IR ILICO, 12-13 octobre 2022, Marseille.

Poisson Caillault E., Bigand A., Lefebvre A., 2018. Time series segmentation and learning. Journée Intelligence Artificielle du laboratoire Informatique et Signal de la Côte d'Opale, ULCO/LISIC, 18 juin 2018, Calais.

Phan H., Poisson Caillault E., Lefebvre A., Bigand A., 2018. Multivariate times series completion by unsupervised and supervised way. Journée Intelligence Artificielle du laboratoire Informatique et Signal de la Côte d'Opale, ULCO/LISIC, 18 juin 2018, Calais.

Grassi K., Poisson Caillault E., Bigand A., Lefebvre A., 2018. Multi-level spectral clustering for extreme event discovery. Journée Intelligence Artificielle du laboratoire Informatique et Signal de la Côte d'Opale, ULCO/LISIC, 18 juin 2018, Calais.

Grassi K., Dezecache C., Phan T.T.H., Poisson-Caillault E., Bigand A., Lefebvre A., 2018. High Frequency Observation and Characterization of the Marine Environment : Completion and Spectral Clustering of Multivariate Time Series. Journée CPER MARCO- Fête de la science- 11 oct 2018, Boulogne-sur-mer, France

Grassi K., Poisson-Caillault E., Phan T.T.H., Dezecache C., Devreker D., Bigand A., Lefebvre A., 2018. Méthodes et outils numériques innovants pour l'exploitation des données d'observation (haute et basse fréquences) du milieu marin. Journée MMN, 20 Novembre 2018. Haras, France.

Encadrement de stage, CDD [2]

Dezecache C., 2018. CDD Cadre Ecologie Numérique. Projet CPER MARCO Axe 1 (16/08/2018 au 14/02//2020).

Lizzul-Jurse M., 2018. CDD Technicien Métrologie. Projet CPER MARCO Axe 1 (24/05 au 12/10/2018).

Encadrement de thèse [2]

Grassi K., Thèse 2017-2020. Titre : Caractérisation de la dynamique de la biomasse phytoplanctonique par définition d'états environnementaux multicritères avec apprentissage profond semi-supervisé et classification spectrale à partir de données hautes fréquences. Directeur de thèse : A. Lefebvre (Ifremer). Encadrants : E. Poisson-Caillault, A. Bigand (ULCO/LISIC). Financement CIFRE (WeatherForce, Toulon)

Halawi Ghosn R., Thèse 2021-2024. Titre : Machine Learning et Phytoplancton nuisible : définition des états environnementaux favorables aux efflorescences et de leurs dynamiques, et développement d'un système numérique expert de prévision, d'alerte et d'aide à la décision. Directeur de thèse : A. Lefebvre (Ifremer). Encadrants : E. Poisson-Caillault, G. Charria (ODE/LOPS). Co-financement Ifremer/OFB



- **H2020 JERICO-Next – WP4 – JRAP1**

A l'échelle européenne, dans la continuité de la démarche scientifique engagée dans le cadre du projet InterReg IVa-2 Mers DYMAPHY (2010-2014), le LER/BL et ses partenaires étaient impliqués dans le projet H2020 JERICO-Next (New European eXpertise for coastal observatories) et plus particulièrement dans les axes 3 et 4 dédiés respectivement (i) au développement de technologies et de méthodologies, avec pour notre groupe un projet orienté vers le développement et la mise en œuvre de plateformes automatisées pour l'observation du phytoplancton et (ii) à des cas d'étude en Manche et en mer du Nord. Il s'agira pour notre groupe de travailler à l'étude de l'eutrophisation, des blooms d'algues nuisibles et à la diversité du plancton. Le système MAREL Carnot devrait servir de plateforme test à une campagne de mesures à haute résolution couplant le système à un cytomètre en flux et à un analyseur spectral. Ce projet s'inscrit dans le cadre des besoins d'amélioration des connaissances en lien avec la mise en œuvre de la DCSMM (Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin, 2010/56/EU).

Le projet JERICO-Next est terminé ; la prochaine étape sera de labeliser JERICO en tant qu'infrastructure de recherche (IR) à l'échelle Européenne. D'ici 2030, l'IR-JERICO sera la référence européenne des observations scientifiques à long terme et des services associés pour les systèmes marins côtiers européens et la convergence entre la terre, la haute mer et l'atmosphère ; renforçant ainsi l'excellence et l'expertise de la recherche européenne au profit de la société.

- **Thèse de Raed HALAWI GHOSN (2021-2024)**

Le titre du sujet de thèse est « Machine Learning et Phytoplancton nuisible : définition des états environnementaux favorables aux efflorescences et de leurs dynamiques, et développement d'un système numérique expert de prévision, d'alerte et d'aide à la décision ».

- Directeur de thèse : Alain Lefebvre (HDR, Ifremer)
- Encadrants de thèse : Emilie Poisson-Caillault (Dr, MCF, ULCO), Guillaume Charria (ODE/LOPS)
- Laboratoire/unité, département d'accueil : Département Océanographie et Dynamique des Ecosystèmes, Unité Littoral, Laboratoire Environnement et Ressources de Boulogne-sur-Mer
- Ecole doctorale de rattachement : UPJV EDSTS 585, Sciences, Technologies, Santé. Ce projet de thèse est soutenu financièrement par l'Ifremer et l'Office Français de la Biodiversité (OFB) dans le cadre de la convention de subvention N°OFB.21.0578.

Résumé : Les écosystèmes marins côtiers évoluent considérablement en réponse aux changements dans la structure et l'intensité des pressions anthropogéniques qui s'exercent sur eux depuis des décennies. Les voies de la dégradation et de la restauration ne suivent plus toujours les schémas prévus, ce qui complique la définition des pratiques de gestion.

Cette recherche vise à caractériser la dynamique de l'environnement côtier, et plus particulièrement celle du phytoplancton (y compris les efflorescences nuisibles ou toxiques), en réponse à ces forces à différentes échelles de temps et d'espace, depuis les événements récurrents jusqu'aux événements extrêmes, afin de comprendre les processus associés et de classer un ensemble de facteurs de contrôle et de définir des indicateurs et des scénarios pour évaluer cette réponse.

Notre approche consiste à intégrer différentes méthodes d'apprentissage automatique dans un méta-programme qui permet (i) d'optimiser les données d'observation multi-sources et multi-échelles grâce

à l'utilisation de méthodes de complétion de données, (ii) de définir les états environnementaux aussi précisément que possible et de former une base d'apprentissage via une approche profonde (classification spectrale multi-niveaux), et (iii) de développer un modèle qui sera au cœur du système numérique expert pour la prévision des efflorescences algales nuisibles.

L'originalité de ce travail réside dans la mise en œuvre de méthodes optimisées issues de l'apprentissage automatique couplées à une approche multi-sources, multi-paramètres et multi-échelles anticipant les besoins des systèmes d'observation intégrés de demain. L'approche numérique proposée a l'avantage d'optimiser la phase de prétraitement des données afin d'exploiter le maximum d'informations disponibles et permet même de proposer des séries expertes inutiles en l'état. Outre l'amélioration des connaissances sur la dynamique des proliférations de phytoplancton, en particulier des proliférations d'algues nuisibles ou toxiques, et de l'eutrophisation, cette recherche devrait constituer une étape importante dans l'adaptation aux évolutions technologiques liées à la surveillance et à l'évaluation. L'objectif de ce projet est de fournir un système numérique complet et innovant pour l'observation de l'environnement marin, combinant (i) la classification d'états environnementaux multicritères, (ii) l'alerte, et (iii) la prédiction. Cette définition des états environnementaux et de leur dynamique devrait également permettre d'améliorer l'expertise lors des phases d'évaluation de l'état écologique ou environnemental telles que définies par les directives européennes. Pour atteindre les objectifs ci-dessus, plusieurs jeux de données (de la basse résolution à la haute résolution) seront utilisés, y compris le jeu de données Carnot de MAREL.



CPER IDEAL

Approche intégrée des défis maritimes et littoraux, 2021-2027

Financement : Région Hauts-de-France

Porteur : IFREMER (Benoit Gaurier, REM-RDT-LHYMAR)

Partenaire(s) : ULCO, Université d'Artois, Université Picardie Jules Verne, Université de Lille, CNRS, ANSES

Objectifs : Le projet IDEaL a pour objectif de rendre la région Hauts-de-France incontournable et unique aux niveaux national et européen en couvrant l'ensemble des problématiques liées aux ressources marines vivantes, de l'étude de l'environnement et des ressources marines jusqu'à leur valorisation et commercialisation. Deux plateformes d'expertise marine s'appuyant sur des compétences complémentaires seront mises en place pour aborder de façon pertinente et innovante les défis liés aux enjeux de la conservation et de la gestion écosystémique des ressources marines et de leurs valorisations dans un environnement sous contraintes : la plateforme halieutique dédiée à l'expertise biologique, l'innovation et la valorisation des ressources marines vivantes ; la plateforme technologique marine dédiée à l'expertise environnementale, l'instrumentation marine, l'expérimentation et le développement technologique.

Cette plateforme sera constituée de 2 plateaux. Le LER-BL co-pilote le Plateau « Observation, Géovisualisation et Télédétection » de cette plateforme (Alain Lefebvre, ODE-UL-LER-BL).

Autres informations

Le système MAREL Carnot est identifié comme l'un des dispositifs de collecte de données pertinents pour les besoins du plan de gestion du Parc Marins des Estuaires Picards et de la Mer d'Opale.

Par ailleurs, dans le cadre de la mise en œuvre du Programme de Surveillance de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) et plus particulièrement pour les programmes Eutrophisation et Habitats Pélagiques, les systèmes automatisés de mesures à haute fréquence ont été identifiés comme des dispositifs pertinents afin d'améliorer les évaluations couramment réalisées via des approches conventionnelles à basse fréquence (Lefebvre, 2013).

Bibliographie

La liste ci-dessous correspond aux documents cités dans ce rapport ou aux documents de base utiles pour l'interprétation des résultats ou aux documents relatifs à des mesures à haute fréquence. Cette liste n'est pas exhaustive mais permet aux personnes intéressées de disposer d'un minimum de documents pour appréhender le sujet de la mesure à haute fréquence.

Aminot, A., Kirkwood, D. et Kérouel, R., 1997. Determination of ammonia in seawater by the indophenol-blue method : evaluation of the ICES NUTS I/C 5 questionnaire. *Marine Chemistry*, 56 : 59-75.

Aminot A. & R. Kérouel, 2004. Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses. Éd. Ifremer, 336 p.

Aminot, A., Kérouel, R. et Birot D., 2001. A flow injection-fluorometric method for the determination of ammonium in fresh and saline waters with a view to in situ analysis. *Water Research*, 35 (7) :1777-1785.

Brylinski J.-M. & Lagadeuc Y., 1990. L'interface eaux côtières/eaux du large dans le Pas-de-Calais (côte française) : une zone frontale. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 311, Série II, p. 535-540.

Caillault E., Lefebvre A., Ternynck P., 2016. Interface uHMM : Une interface utilisateur graphique sous R, pour construire un modèle de Markov caché non supervisé. Convention ULCO/LISIC-AEAP. Rapport ULCO/LISIC, 16 pages. Duval P., 2009. Étude à haute fréquence de la dynamique de l'écosystème côtier sous influence anthropique : contexte des efflorescences de la prymnésiofycée *Phaeocystis globosa* au large de Boulogne-sur-Mer. Ifremer/TMR.LER.BL/09.06, 44 pages (Encadrement A. Lefebvre).

Derot J., 2014. Utilisation des données de MAREL Carnot pour la compréhension des mécanismes des extrêmes dans la qualité des eaux à Boulogne-sur-mer. Thèse de doctorat de l'université de Lille I.

Forney G. J., "The Viterbi Algorithm," *Proceedings of the IEEE*, vol. 61, no. 3, pp. 268-278, 1973

Halawi G. R., Poisson-Caillault E., Charria G., Bonnat A., Repecaud M., Facq J-V, Quéméner L., Duquesne V., Blondel C., Lefebvre A. (2023). MAREL Carnot data and metadata from Coriolis Data Center. *Earth System Science Data*. 15 (9). 4205-4218. <https://doi.org/10.5194/essd-15-4205-2023>, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00819/93113/>

Hartigan J.A. & Wong M.A., "A K-means Clustering Algorithm" vol. 28, no.1, pp. 100-108, 1979.

Hébert C. & A Lefebvre, 2004. Circulation des masses d'eau dans la rade de Boulogne-sur-Mer – Étude préalable à l'implantation de la station de mesures automatisées MAREL Carnot - Rapport Ifremer DEL/BL/RST/04/08, 18 pages.

Ihaka R. & R. Gentleman, 1996. R : a language for data analysis and graphics. *J. Comput. Graphics Stat.*, 5 : 299-314.

Lefebvre A., Répécaud M., Facq J.-V., Lefebvre G. & B. Hitier, 2002. Projet d'implantation de la station de mesures automatisées MAREL dans le port de Boulogne-sur-Mer - Mesures in situ et résultats du modèle d'advection-diffusion Mars 2D. Rapport Ifremer DEL/BL/RST/02/07, 51 pages.

Lefebvre A. & M. Répécaud, 2006. MAREL Carnot - Partie 1 : Bilan de la mise en place d'un système de mesures automatisées à haute fréquence en zone côtière de Boulogne-sur-Mer. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/06.09, 18 pages + CD ROM.

Lefebvre A., 2007. MAREL Carnot : Partie 2 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Données de l'année 2006. Ifremer/RST.LER.BL/07.08, 44 pages.

Lefebvre A., 2008. MAREL Carnot : Partie 3 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Données de l'année 2007. Ifremer/RST.LER.BL/08.04, 23 pages.

Lefebvre A., 2010. MAREL Carnot : Rapport n° 4 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2009. Ifremer/RST.LER.BL/10.08, 20 pages.

Lefebvre A., 2011. MAREL Carnot : Rapport n°5 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2010. Ifremer/RST.LER.BL/11.04, 19 p.

- Lefebvre A., Rousseeuw Kévin, Caillault Émilie, 2012. MAREL Carnot : Rapport n°6 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer) Bilan de l'année 2011. Ifremer/RST.LER.BL/12.05, 36 p.
- Lefebvre A., Rousseeuw K., 2013. MAREL Carnot : Rapport n° 7 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2012. Ifremer/RST.LER.BL/13.09, 25 p.
- Lefebvre A., 2013. Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (2008/56/CE) - Programme de surveillance - Livrable 5 : Proposition scientifique et technique de paramètres et de dispositifs de suivis associés. Rapport Ifremer ODE/RST/LERBL/13.02, 60 pages.
- Lefebvre A., Rousseeuw K., 2014. MAREL Carnot - Rapport n° 8 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2013. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/14.02, 28 p.
- Lefebvre A., Devreker D., 2015. MAREL Carnot : Rapport n° 9 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2014. Ifremer/RST.LER.BL/15.06, 37 pages.
- Lefebvre A., Guiselin N., Barbet F., Artigas L. F. Long-term hydrological and phytoplankton monitoring (1992-2007) of three potentially eutrophicated systems in the eastern English Channel and the southern bight of the North Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 68(10) : 2029-2043.
- Lefebvre A., Poisson-Caillault E., 2016. MAREL Carnot : Rapport n° 10 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2015. Ifremer/RST.LER.BL/16.06, 26 pages.
- Lefebvre A., Poisson-Caillault E., 2017. MAREL Carnot : Rapport n° 11 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Opérations lors de l'année 2016. Ifremer/RST.LER.BL/17.06, 24 pages.
- Lefebvre A., Poisson-Caillault E., Rousseeuw K., Hamad D., Soudant D., Soudant A., Gohin F., Répécaud M., 2016. La station instrumentée MAREL Carnot : retours d'expérience de 10 ans d'observation à haute fréquence d'une zone côtière sous influence anthropique. In *Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier*, Schmitt, F.G. et Lefebvre A. (Eds.) CNRS Editions, 2016, pp. 17-30.
- Legendre L. & P. Legendre, 1998. *Numerical Ecology*. Elsevier, Amsterdam, 853 p.
- Liao T.W., "Clustering of time series data – survey", *Pattern Recognition*, vol.38, no.11, pp. 1857-1874, Nov 2005.
- Plat, T., Denman, K. L., 1975. Turbulent structure function in turbulent shear flows. *Ann, Rev, Ecol, Syst*, 6, 189-210.
- Rabiner L., "A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition", *Proceedings of the IEEE*, 1989.
- Rousseeuw K., É. Caillault, A. Lefebvre, and D. Hamad, "Monitoring system of phytoplankton blooms by using unsupervised classifier and time modeling," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2013 IEEE International, July 2013, pp. 3962–3965
- Rousseeuw K., Poisson Caillault É., Lefebvre A., Hamad D., 2013. Detection of contrasted physico-chemical and biological environmental status using unsupervised classification tools. 5th FerryBox Workshop, Helsinki, Finland, 24-25 April 2013.
- Rousseeuw K., Poisson-Caillault E., Lefebvre A., Hamad D., 2015. Hybrid Hidden Markov Model for Marine Environment Monitoring. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8 (1), 204-213.
- Rousseeuw K., Caillault E., Lefebvre A., Hamad D., 2016. Modèle de Markov caché hybridé pour la surveillance de l'environnement marin. In *Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier*, Schmitt, F.G. et Lefebvre A. (Eds.) CNRS Editions, 2016, pp. 111-120.
- Samen F., Aoustin Y., Repecaud M., Rolin J.F., Woerther P., 2010. Monitoring à Haute Fréquence pour la surveillance du milieu littoral. Rapport Ifremer RDT/IPR/10/074, 158 p.
- Schmitt, F. G., 2005. Relating lagrangian passive scalar scaling exponents to eulerien scaling exponents in turbulence. *European Physical Journal*, B48, 129-137.

Schmitt F. G., Lefebvre A. (Eds.), 2016. Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier, CNRS Editions. ISBN 978-2-271-08592-4.

Schmitt F. G., Zongo S. B., Lefebvre A., 2016. Dynamiques multi-échelles et extrêmes dans les ratios stochiométriques mesurés en Manche orientale : MAREL Carnot et SOMLIT. In Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier, Schmitt, F.G. et Lefebvre A. (Eds.) CNRS Editions, 2016, pp. 91-98.

Soudant A., Soudant D., Lefebvre A., 2008. Influence de la période et de la fréquence d'échantillonnage sur le percentile 90 de la fluorescence. Ifremer/R.INT. DOP/DYNECO/VIGIES2008.17, 36 p.

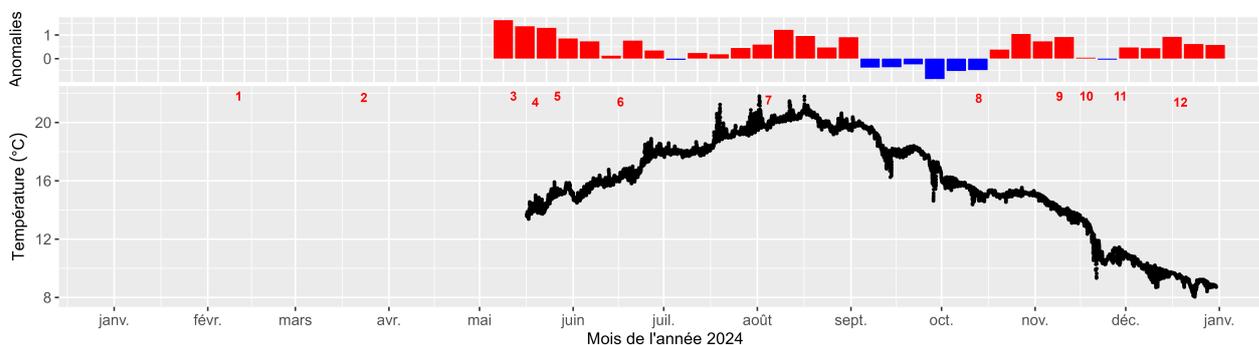
Viterbi A., "Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm," Information Theory, IEEE Transactions on, 1967

Zongo S., 2010. Fluctuations multi-échelles dans les séries temporelles biogéochimiques à moyen et long terme en milieu marin côtier. Thèse de doctorat de l'université de Lille I, 308 pages.

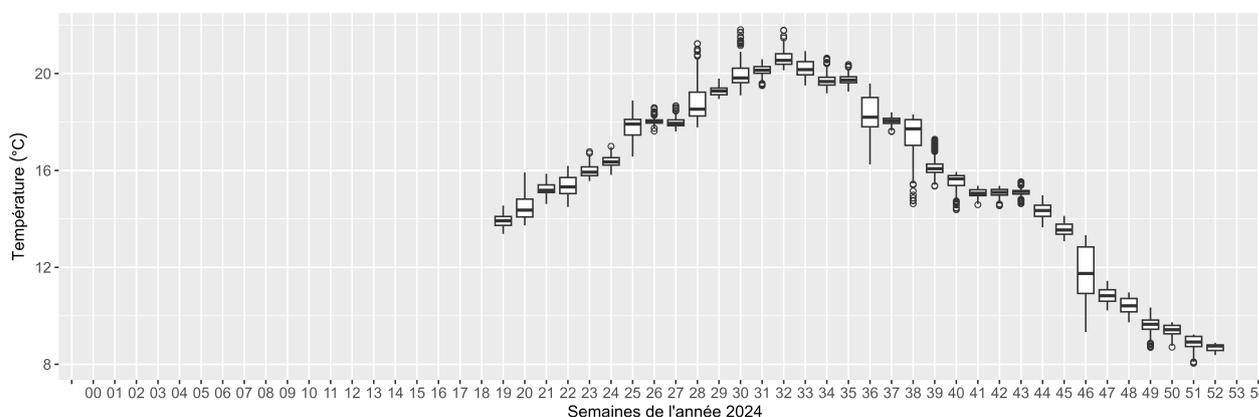
Annexes

Analyse des paramètres au cours de la dernière année de disponibilité des données

Température et liste des événements sur la station MAREL Carnot



Évolution de la température (°C) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données. Les numéros en rouges correspondent aux différents événements survenus sur la Station Marel Carnot au cours de l'année 2024 et détaillés dans le tableau ci-dessous.

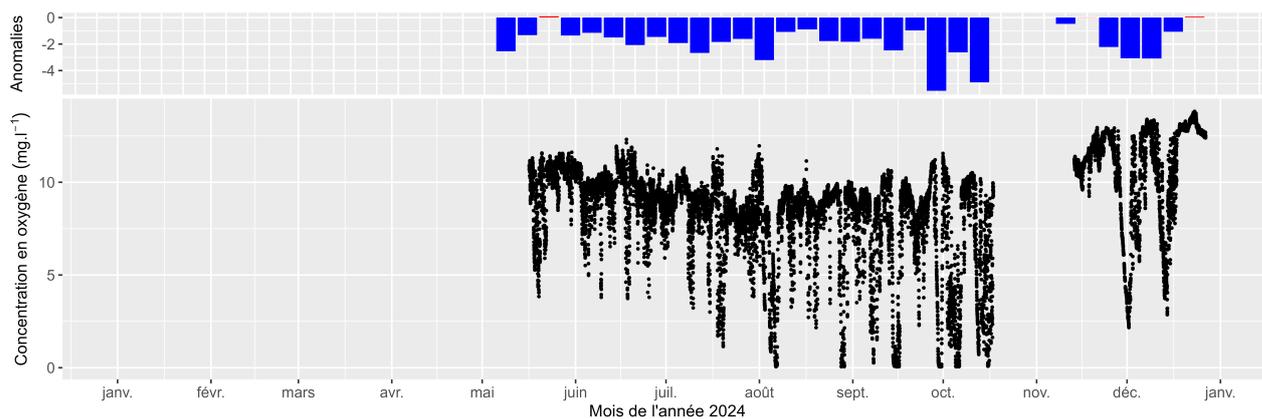


Boîtes à moustaches hebdomadaires de la température (°C) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

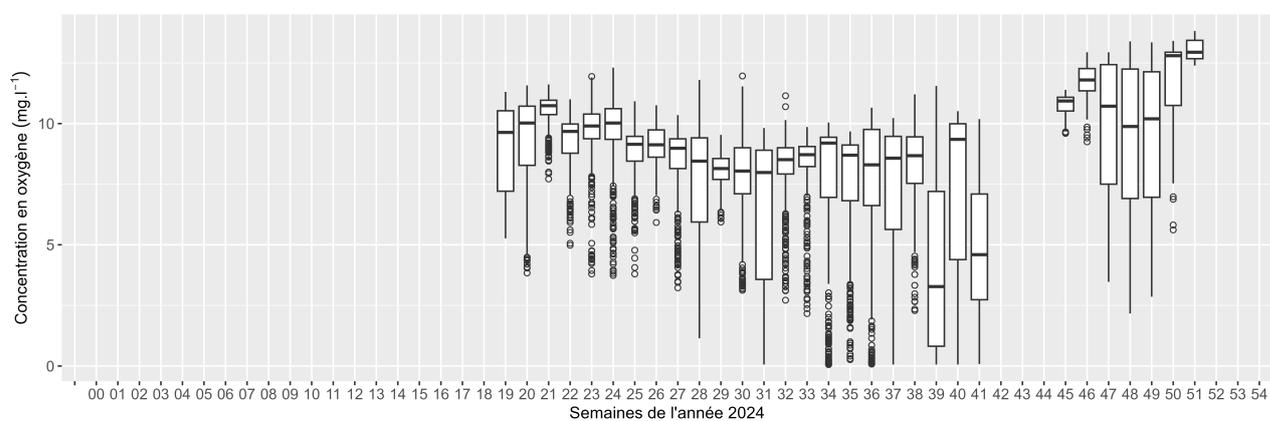
Événements sur la station MAREL Carnot

Dates	NKE	WIZ
1 2024-02-15	Remise en route du générateur	
2 2024-03-20	Disfct du câble d'alim et de trans des données	
3 2024-05-16	début fct	
4 2024-05-16	Mauvaise calibration	
5 2024-05-23		début fct
6 2024-06-13		fin fct
7 2024-08-01	début fct	
8 2024-10-17	Dérive capteur	
9 2024-11-13	début fct	début fct
10 2024-11-13		Mauvaise calibration
11 2024-12-04		fin fct
12 2024-12-17		début fct

Oxygène

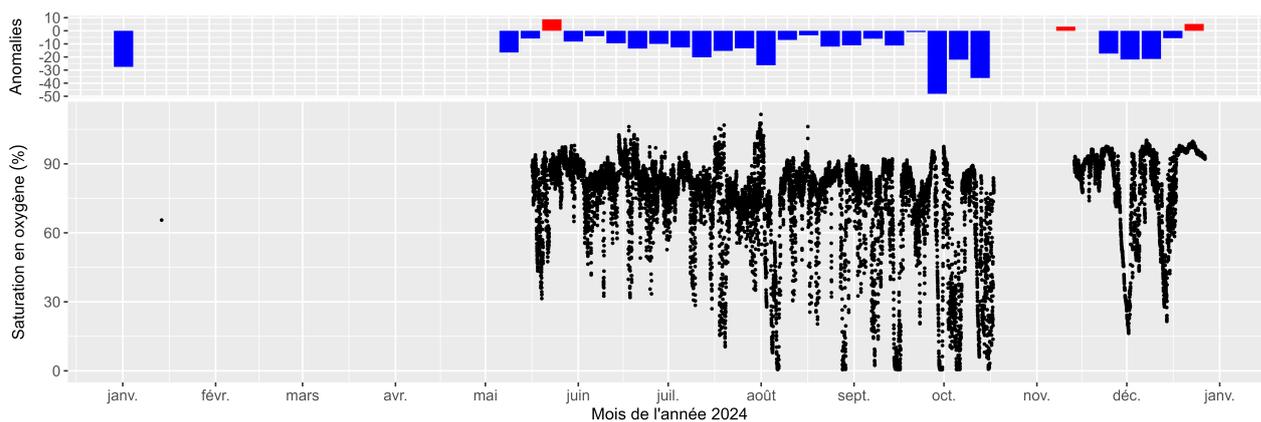


Évolution de la concentration en oxygène dissous (mg.l⁻¹) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

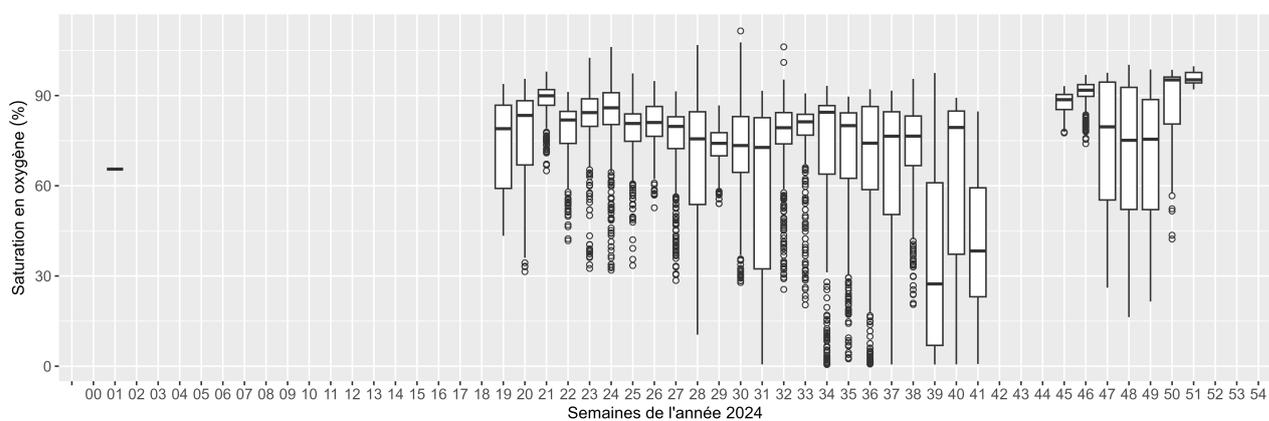


Boîtes à moustaches hebdomadaires de la concentration en oxygène dissous (mg.l⁻¹) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

Oxygène Saturation

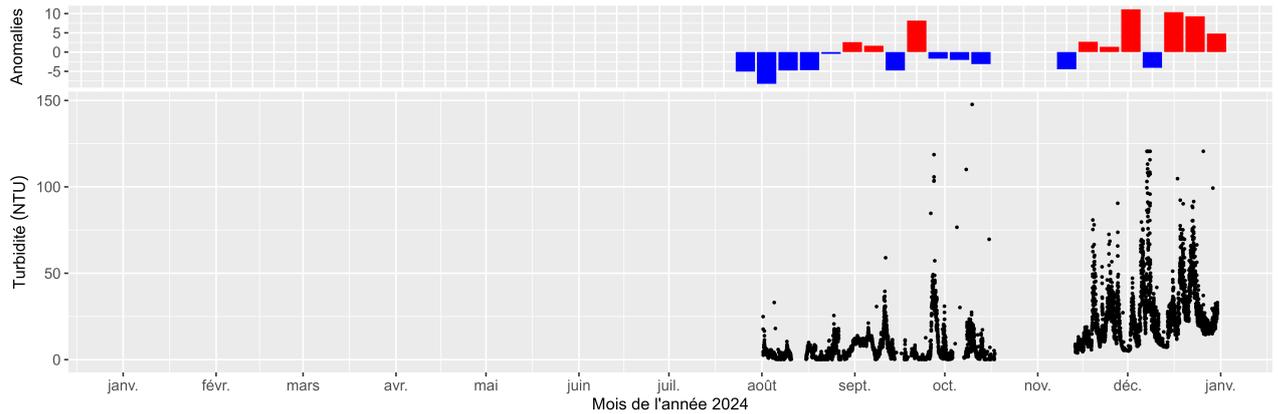


Évolution de la saturation en oxygène (%) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

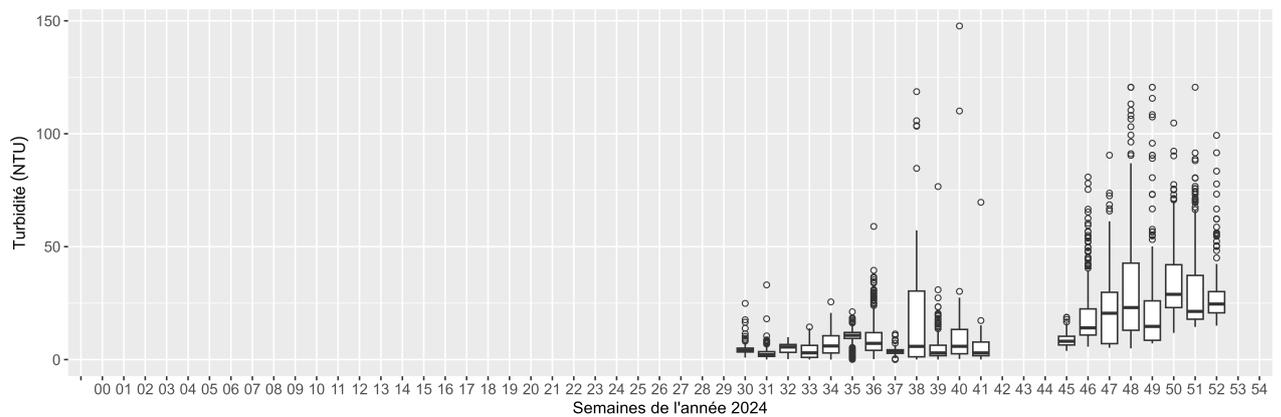


Boîtes à moustaches hebdomadaires de la saturation en oxygène (%) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

Turbidité



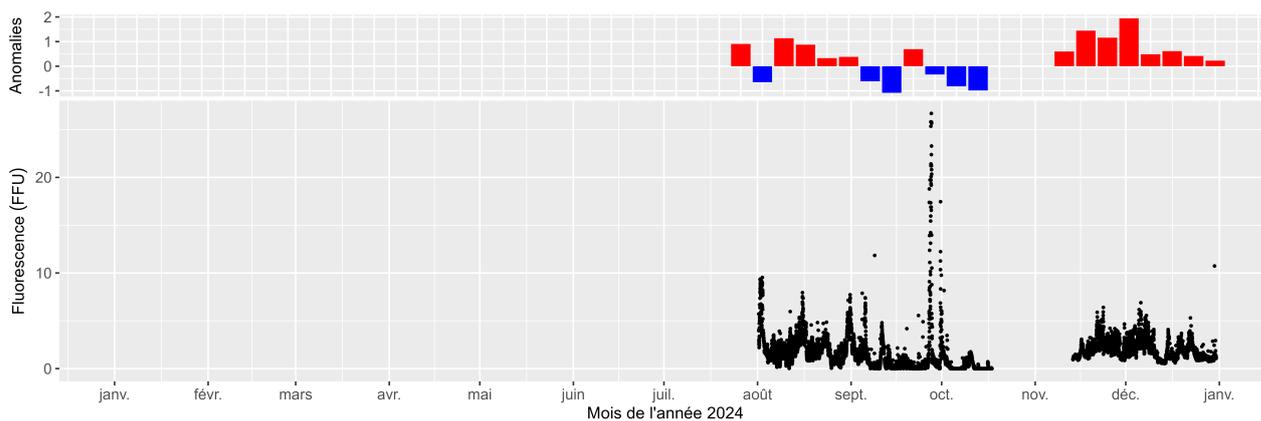
Évolution de la turbidité (NTU) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.



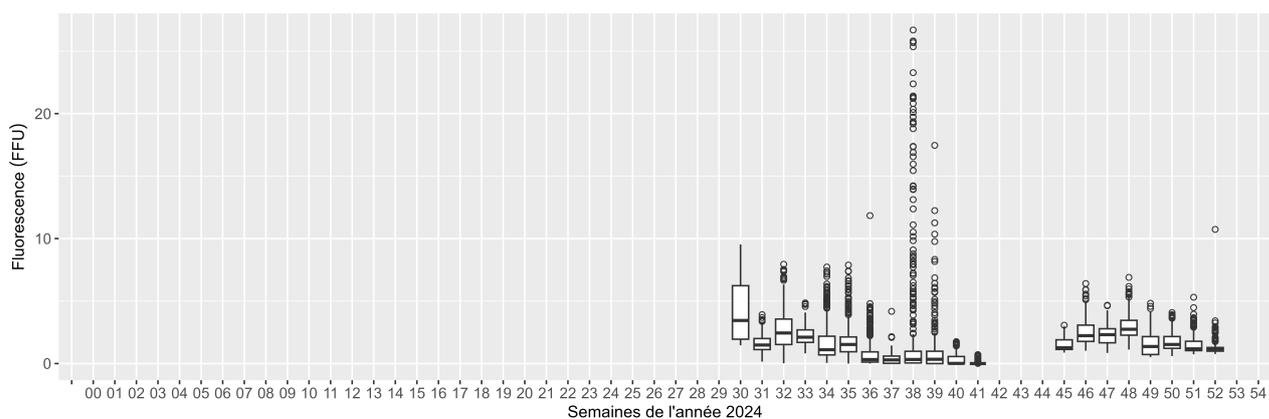
Boîtes à moustaches hebdomadaires de la turbidité (NTU) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

La forte anomalie positive observée en juillet peut être due au passage de la drague dans le port de Boulogne-sur-Mer.

Fluorescence

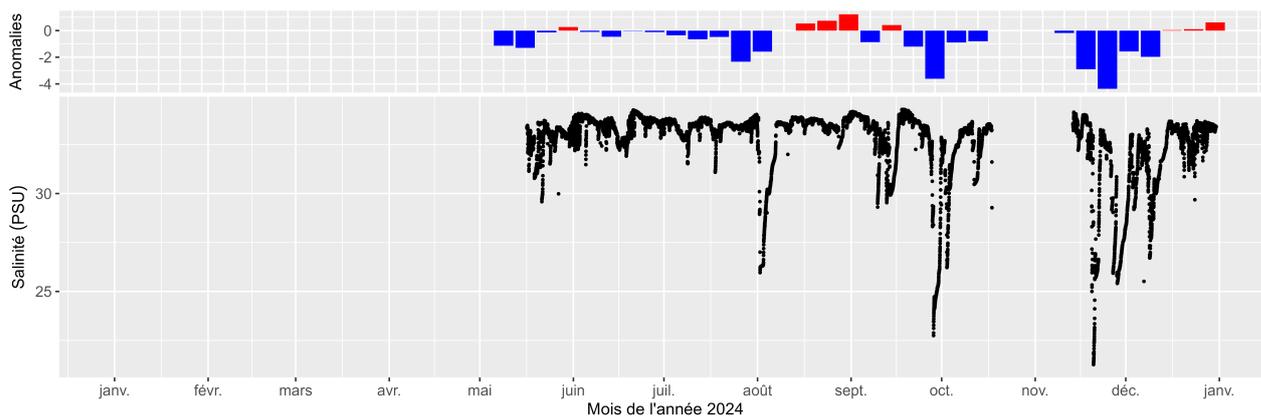


Évolution de la fluorescence (FFU) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

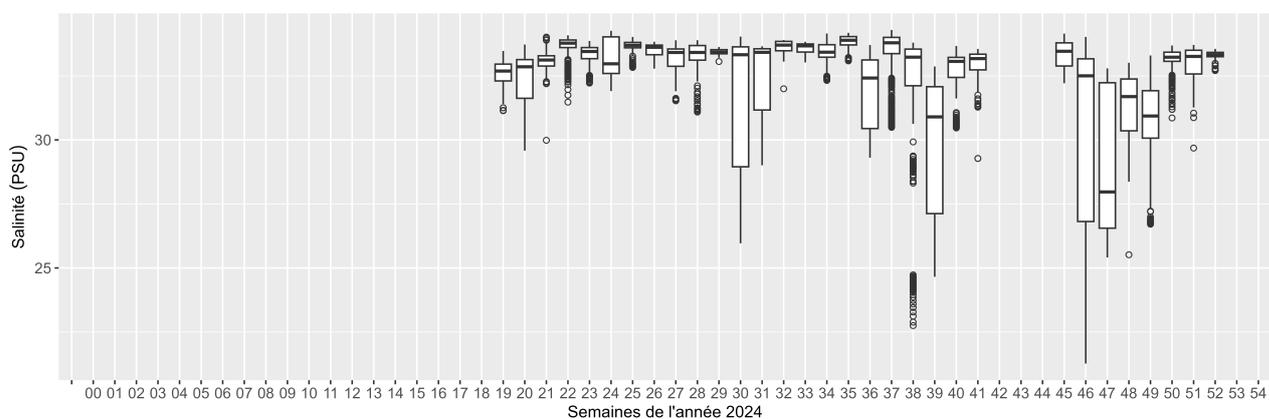


Boîtes à moustaches hebdomadaires de la fluorescence (FFU) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

Salinité

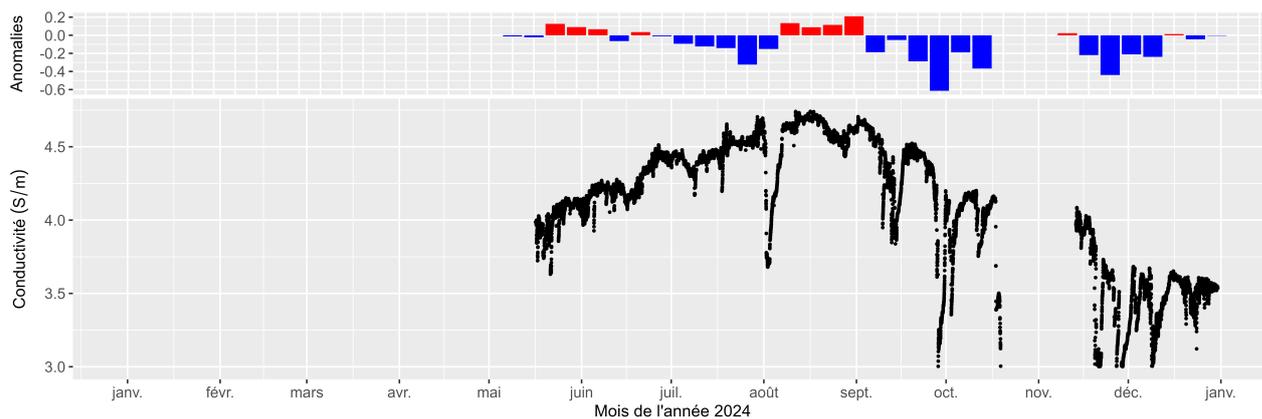


Évolution de la salinité (PSU) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

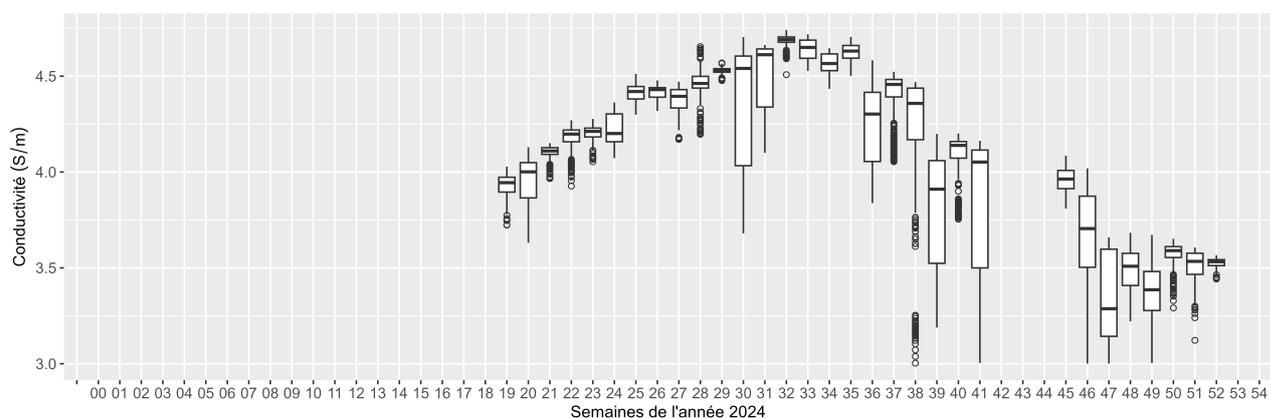


Boîtes à moustaches hebdomadaires de la salinité (PSU) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données

Conductivité

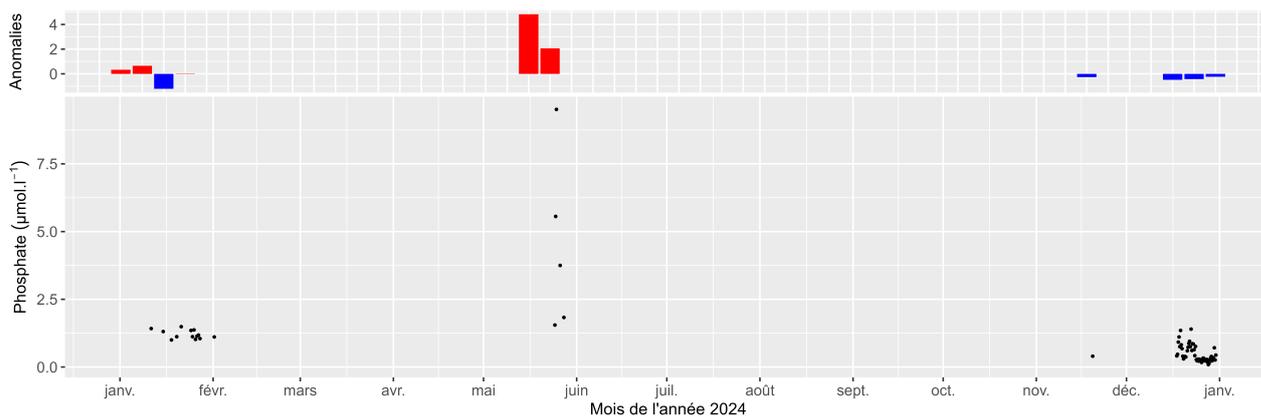


Évolution de la conductivité (S/m) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

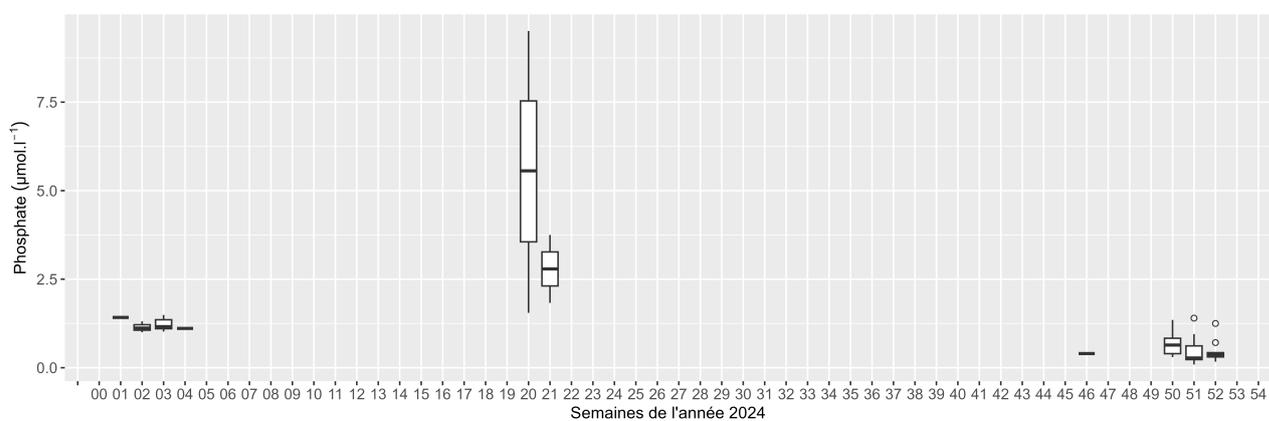


Boîtes à moustaches hebdomadaires de la conductivité (S/m) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

Phosphate

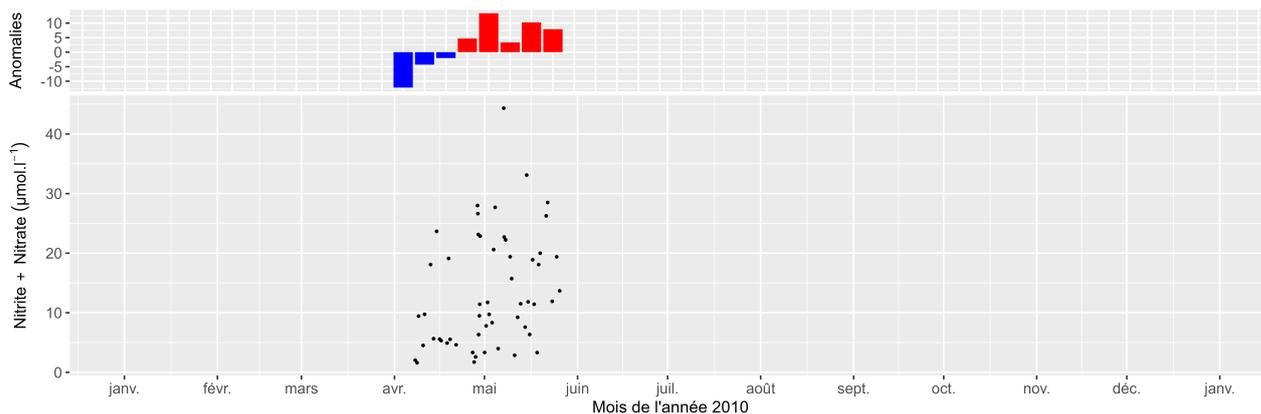


Évolution de la concentration en phosphate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

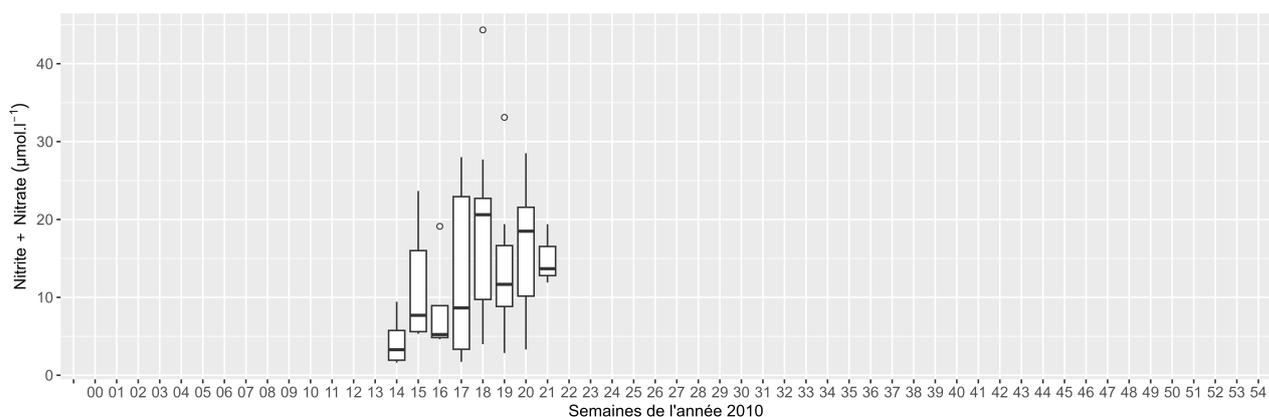


Boîtes à moustaches hebdomadaires de la concentration en phosphate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.

Nitrate + Nitrite



Évolution de la concentration en nitrate et nitrite ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.



Boîtes à moustaches hebdomadaires de la concentration en nitrate et nitrite ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) mesurée par le système MAREL Carnot au cours de la dernière année de disponibilité des données.