



**HAL**  
open science

# Révision de l'Indice Diatomées de La Réunion (IDR) - Rapport final

Gilles Gassiole, François Delmas, Sébastien Boutry

## ► To cite this version:

Gilles Gassiole, François Delmas, Sébastien Boutry. Révision de l'Indice Diatomées de La Réunion (IDR) - Rapport final. Office Français de la Biodiversité. 2025. <hal-05469848>

**HAL Id: hal-05469848**

**<https://hal.science/hal-05469848v1>**

Submitted on 21 Jan 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License



**OFB**  
OFFICE FRANÇAIS  
DE LA BIODIVERSITÉ



Mars 2025

# Révision de l'Indice Diatomées de La Réunion (IDR)

- Rapport final



**INRAE**

Centre Nouvelle-Aquitaine Bordeaux  
Site de Cestas-Gazinet

#### Rédacteurs du rapport final

- MicPhyc : Gilles GASSIOLE
- INRAE : François DELMAS et Sébastien BOUTRY

#### Responsables scientifiques et techniques pour le suivi des actions

- OLE : Karoline RUFFIE & Mathieu QUITTET
- OFB : Hélène UDO & Eva THIERRY

#### Participants aux différents COPIL

Laëtitia FAIVRE (OCEA Consult'), Nicolas HETTE-TRONQUART (OFB), Thibault LEMBOUCHER (Univ. Lorraine, LIEC), Olivier MONNIER (OFB), Anne Sophie PAYET (OLE), Axel Rissac (OFB), Juliette ROSEBERY (INRAE), Pierre VALADE (OCEA Consult'), Philippe USSEGLIO-POLATERA (Univ. Lorraine, LIEC)

#### Citation

Gassiole G., Delmas F., Boutry S (2025) Révision de l'Indice Diatomée de La Réunion.

#### Mots clés

Diatomée, La Réunion, IDR, Indice de qualité d'eau, WA, TITAN2

# Sommaire

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>2</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>4</b>
<b>MATÉRIELS ET MÉTHODES</b> .....	<b>8</b>
SYNTHÈSE DES DONNÉES DES RAPPORTS PRÉCÉDENTS .....	8
PROCÉDURE APPLIQUÉE .....	8
<b>RÉSULTATS - DISCUSSION</b> .....	<b>19</b>
TABLE DE VALENCE .....	19
NOUVEL IDR .....	20
REPRÉSENTATIVITÉ ET FIABILITÉ DE L'IDR.....	22
CARTOGRAPHIE DES RÉSULTATS.....	22
CORRÉLATION DE SPEARMAN .....	26
OUTIL DIAGNOSTIQUE .....	27
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>28</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>30</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>32</b>

## Table des figures

Figure 1 : Nombre de prélèvements par année participant à l'étude (en rouge, ceux prélevés en mai et en turquoise, ceux prélevés en octobre) .....	4
Figure 2 : Localisation des stations prélevées (points rouges) avec leur code OLE. La ligne bleue montre la zonation IDR Est et Ouest. ....	5
Figure 3 : méthode TITAN : a) Partie gauche : principe de fonctionnement pour un taxon x ; b) Partie droite : Exemples de profils observés pour les 3 types de taxons possibles (schéma : Boutry, 2017) .....	6
Figure 4 : Trame abiotique de référence adoptée pour maîtriser la variation naturelle de l'IDR (Extrait de Boutry et al. 2014) .....	16
Figure 5 : Schéma récapitulatif du principe de conception des différentes classes d'état diatomique .....	16
Figure 6 : Boîtes à moustaches représentant la répartition des notes IDR, version originale et dernière version sur les stations de référence (les seuils de l'IDR2 sont en traits pleins alors que ceux de l'IDR1 sont en tirets).....	21
Figure 7 : Boîtes à moustaches représentant la répartition des notes IDR, version originale et dernière version sur les stations dont un apport en matière organique ou en nutriments est soupçonné (les seuils de l'IDR2 sont en traits pleins alors que ceux de l'IDR1 sont en tirets).....	21
Figure 8 : Boîtes à moustaches représentant la répartition des notes IDR, version originale et dernière version sur les stations reconnues comme subissant des apports conséquents en matière organique et nutriments (les seuils de l'IDR2 sont en traits pleins alors que ceux de l'IDR1 sont en tirets).....	22
Figure 9 : Cartographie de l'IDR nouvelle version selon les classes de qualité de 2008 à 2017. (TBE : bleu, BE : vert, EM : jaune, em : orange, ME : rouge).....	23
Figure 10 : Cartographie de l'IDR nouvelle version selon les classes de qualité de 2018 à 2022. (TBE : bleu, BE : vert, EM : jaune, em : orange, ME : rouge).....	24
Figure 11 : Cartographie de l'IDR 1 selon les classes de qualité de 2008 à 2011. (TBE : bleu, BE : vert, EM : jaune, em : orange, ME : rouge) .....	24
Figure 12 : Cartographie de l'IDR 1 selon les classes de qualité de 2012 à 2022. (TBE : bleu, BE : vert, EM : jaune, em : orange, ME : rouge) .....	25
Figure 13 : Coefficient de corrélation de Spearman entre les 2 formulations indicielles et les différents gradients abiotiques.....	27
Figure 14 : Exemples de diagrammes diagnostiques. De gauche à droite La rivière des Marsouins à Bébou en 2016, la Grande Rivière Saint Jean en aval de Quartier Français en 2020 et la Ravine du Gol en 2021. ....	27
Figure 15 : Synthèse de l'élaboration de l'IDR nouvelle version .....	28

## Table des tableaux

Tableau 1 : Seuils Titan utilisés et comparaison avec ceux trouvés par l'approche ARM .....	9
Tableau 2 : Détail par paramètre du score Titan2 des taxons retenus .....	10
Tableau 3 : Extrait de la table détail par paramètre du score WA des taxons retenus .....	11
Tableau 4 : Extrait de la table détail par paramètre du score total (Titan2 + WA) des taxons retenus .....	12
Tableau 5 : Principaux taxons d'alerte classés par occurrence décroissante sur les prélèvements correspondant aux stations de référence.....	13
Tableau 6 : Principaux taxons d'alerte classés par pourcentage d'occurrence décroissante sur les stations de référence par rapport à l'ensemble des stations. ....	14
Tableau 7 : Liste des taxons indiciels dotés d'une valence négative dans l'IDR mis à jour.....	19
Tableau 8 : Distribution des stations selon les différentes classes de qualité de l'IDR nouvelle version.....	20
Tableau 9 : Comparaison des classes de qualité de l'historique entre l'IDR original et le nouvel IDR .....	20

# Introduction

Le projet de révision et d'amélioration de l'Indice Diatomées Réunion a pour objectifs :

- d'intégrer les données diatomiques acquises à La Réunion de 2008 à 2022 dans la définition des classes de l'IDR et d'en évaluer l'impact sur l'indice ;
- de mieux comprendre la répartition des taxons en fonction de facteurs naturels et anthropiques.

Deux rapports intermédiaires ont permis :

- pour le premier, principalement de construire les tables de données et de les analyser notamment en vue de définir les taxons indiciaires à intégrer dans le nouvel IDR.
- pour le deuxième, de réaliser différentes analyses statistiques visant à préciser les caractéristiques autoécologiques (naturelles et liées aux altérations anthropiques) des taxons et des communautés diatomiques.

Ce rapport, quant à lui, détaille la méthodologie appliquée pour aboutir à la nouvelle version de l'IDR. Les évolutions en matière de bio-indication diatomique et de diagnostic complémentaire des effets des pollutions anthropiques subies par les communautés diatomiques sur les sites de réseaux de surveillance sont exploitées.

## Quelques rappels

Les données ayant permis le reversionnage de l'IDR intègrent les 345 inventaires historiques de l'IDR original (programme de recherche 2008 à 2010 et RCS 2011 et 2012) auxquelles se sont rajoutées les données du RCS de 2013 à 2022 et quelques inventaires supplémentaires de 2022. L'ensemble des données ayant permis de configurer le nouvel IDR2 représente un total de 677 inventaires.

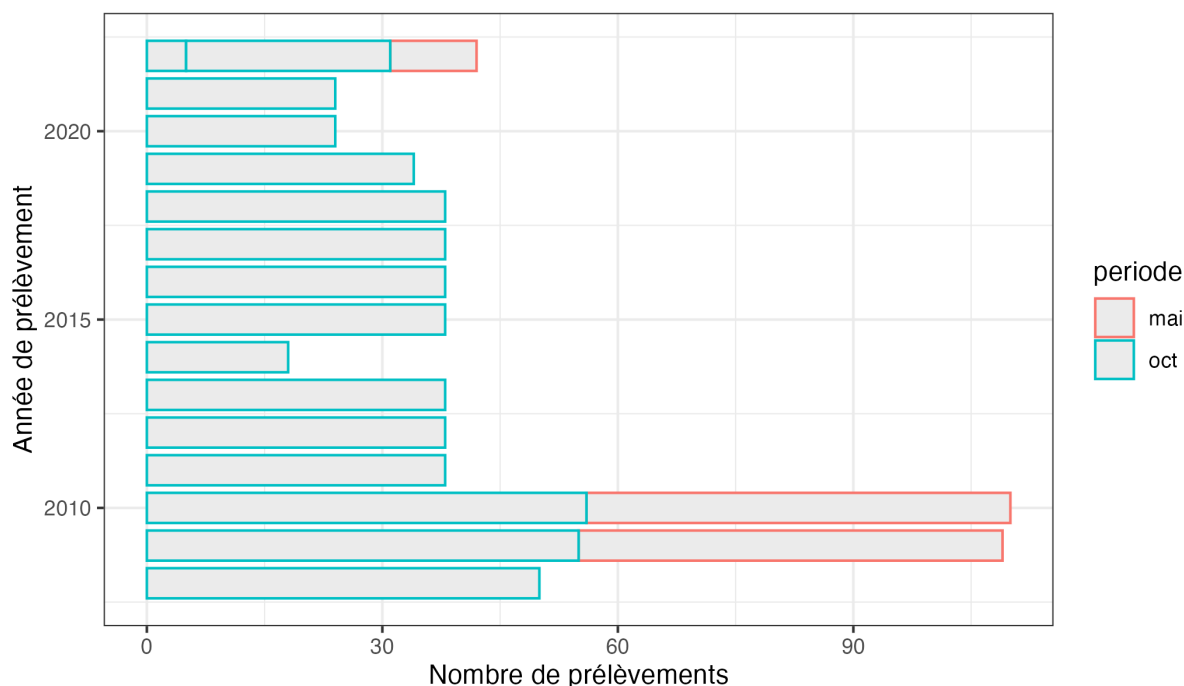


Figure 1 : Nombre de prélèvements par année participant à l'étude (en rouge, ceux prélevés en mai et en turquoise, ceux prélevés en octobre)

## Remarques

L'ensemble des inventaires constituant la base a été analysé par le même opérateur. Le nombre plus faible d'inventaires en 2014 s'explique par le fait que seuls 18 inventaires ont été repris par cet opérateur. Les autres inventaires de cette année-là, effectués par un autre analyste, avec quelques confusions au niveau de certaines déterminations (notamment la différenciation entre des espèces du genre *Nitzschia* de petites tailles ayant des valences écologiques très différentes) pouvaient entraîner un bruit conséquent au niveau des analyses statistiques. Il a été décidé de les supprimer de la base de données inventaires servant aux différents calculs.

En 2020 et 2021, la diminution du nombre d'analyses traduit une diminution du nombre de stations prélevées pour le RCS à partir de l'année 2020.

En mai 2022, quelques stations supplémentaires au RCS sont ajoutées correspondant aux stations altérées connues pour compléter la base de données avec des inventaires de stations perturbées et ainsi renforcer la recherche de taxons d'alerte.

La figure suivante présente la localisation des stations selon les hydroécorégions telles que redéfinies en 2021 (OLE 2021), et selon la zonation Est/Ouest utilisée pour l'IDR. 60 stations différentes durant la chronique ont été prélevées et sont représentées par 1 à 18 inventaires selon la station considérée.

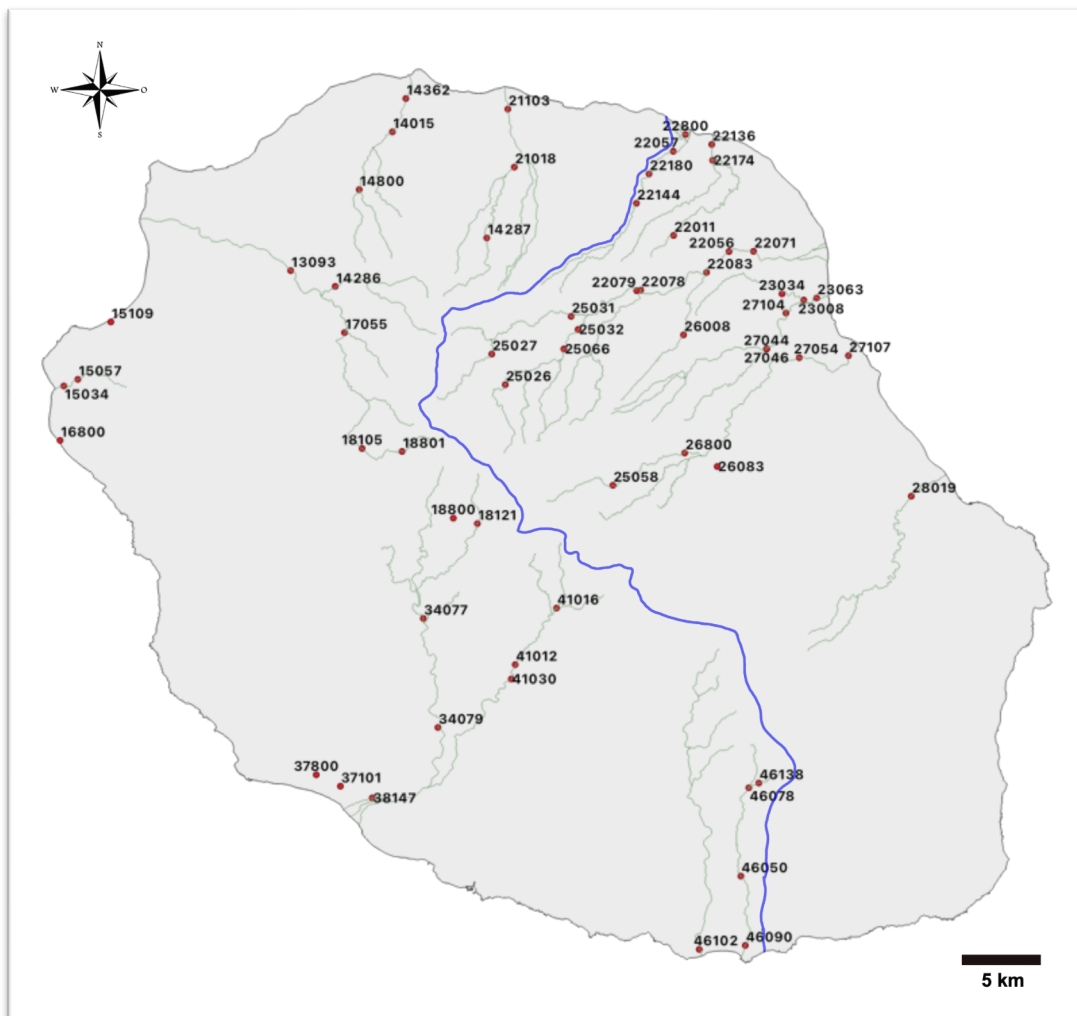


Figure 2 : Localisation des stations prélevées (points rouges) avec leur code OLE. La ligne bleue montre la zonation IDR Est et Ouest.

Lors de l'étude, différentes analyses statistiques ont été menées (cf. rapport intermédiaire B), notamment le calcul des moyennes pondérées (« Weighted Average abundances / WA ») et l'analyse TITAN2, sur lesquelles s'est appuyée la construction de l'IDR reversionné. Ces analyses permettent de mieux cerner les caractéristiques autoécologiques des différents taxons pour leur attribuer des valences et calculer l'indice.

La méthode des moyennes pondérées popularisée en paléolimnologie (ter Braak & van Dam 1989, Birks *et al.* 1990) est aussi beaucoup utilisée en autoécologie contemporaine des diatomées. De nombreux travaux sur des classifications de diatomées basées sur leur relation avec différentes variables environnementales ont ainsi été menés en utilisant les moyennes pondérées d'abondance (Cholnoky 1968, Lowe 1974, Salden 1978, Beaver 1981, de Wolf 1982, Sladeczek 1986, Denys 1991, Hofmann 1994, Denys 2004, Carayon *et al.* 2019). Les moyennes pondérées d'abondances permettent de donner une évaluation autoécologique quantitative des taxons inventoriés (Hall & Smol 1992, Pan *et al.* 1996). L'hypothèse de base, qui ne se confirme pas toujours, serait que les espèces ont une distribution unimodale symétrique le long des gradients environnementaux auxquels elles sont sensibles et que leur distribution peut être décrite par une valeur unique d'indication nommée optimum (Potapova *et al.* 2004). Ainsi, un taxon sera d'autant plus abondant sur les sites où la variable environnementale donnée est proche de l'optimum (ter Braak & van Dam 1989).

L'autre méthode utilisée est TITAN2 (Baker & King, 2010). Elle a été créée dans le but d'identifier des valeurs seuils critiques de paramètres environnementaux occasionnant le basculement de communautés biologiques d'un état donné vers une composition différente. Elle utilise en combinaison 2 méthodes biostatistiques préexistantes :

- l'indicateur INDVAL (Dufrêne & Legendre, 1997), qui attribue un score combinant les notions de spécificité ( $A_{kj}$ ) et de fidélité ( $B_{kj}$ ) pour caractériser l'affinité plus ou moins importante d'un taxon à chaque cluster d'une classification (ou, dans le cadre de la méthode TITAN, en fonction d'une partition binaire au long d'un gradient environnemental donné).
- La nCPA ou non-parametric Change Point Analysis (King & Richardson, 2003, Quian *et al.*, 2003), méthode non paramétrique voisine de celle utilisée pour l'élaboration des arbres de régression multivariés (De'Ath, 2002), qui ordonne et partitionne les observations au long d'un gradient environnemental. Il intervient ensuite une étape de ré-échantillonnage aléatoire (ou bootstrap) qui consolide et permet d'estimer l'incertitude des points de basculement calculés au niveau de la communauté multispécifique toute entière.

Le principe schématique de fonctionnement de TITAN est présenté en Figure 3 (partie gauche).

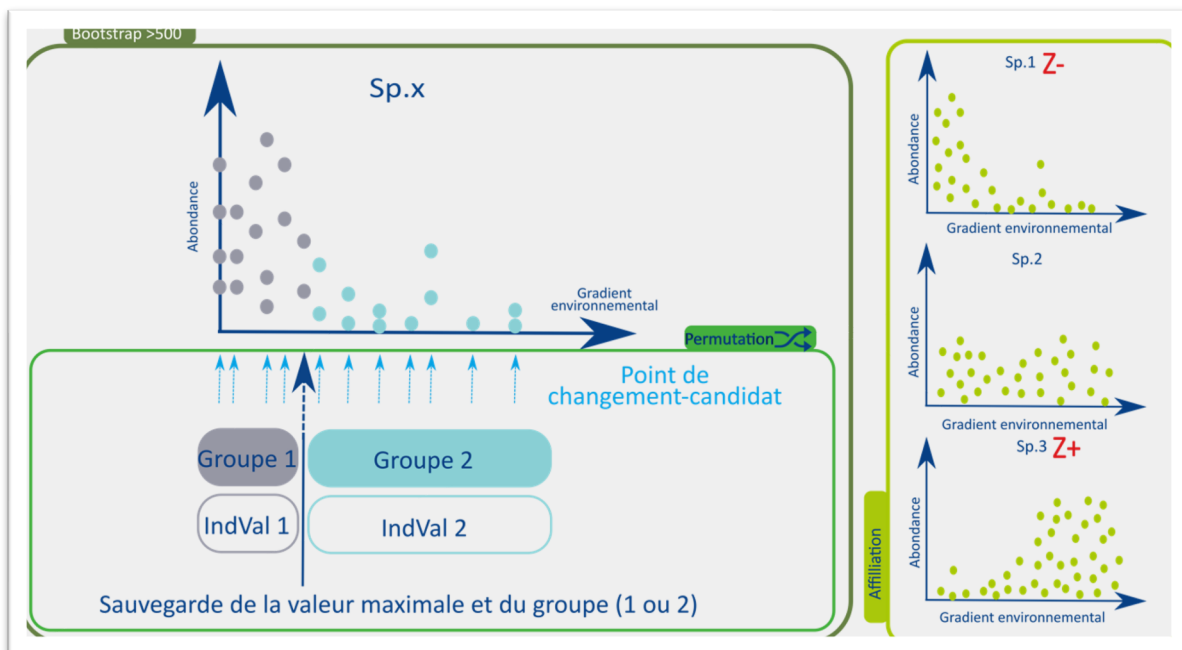


Figure 3 : méthode TITAN : a) Partie gauche : principe de fonctionnement pour un taxon x ; b) Partie droite : Exemples de profils observés pour les 3 types de taxons possibles (schéma : Boutry, 2017)

Il consiste à découper successivement en deux clusters un gradient environnemental donné (axe x), en faisant glisser progressivement le niveau de coupe d'une extrémité à l'autre de ce gradient au moyen de points de changement candidats (flèches bleues). TITAN permet d'une part d'identifier successivement des seuils de rupture dans la distribution de chaque espèce suffisamment présente dans le jeu de données (l'abondance du taxon étant portée par l'axe y) ; d'autre part, de repérer des seuils de basculement des communautés en fonction de l'évolution des valeurs du gradient environnemental considéré.

Vis-à-vis de la distribution d'une espèce donnée (Sp. x), ce balayage du gradient permet de calculer un score INDVAL qui reflète à la fois le niveau de spécificité et de fidélité du taxon pour chacun des 2 clusters définis par un niveau de coupe donné. Et ceci, à chacun des niveaux de coupe successivement balayés tout au long du gradient.

TITAN permet ainsi de classer trois catégories de taxons (partie droite de la Figure 3) :

- Taxon Z- (exemple du taxon Sp. 1), dont la répartition révèle une forte affinité avec la partie basse du gradient (autrement dit, espèce sensible à l'augmentation des valeurs du gradient),
- Taxon sans signification particulière vis-à-vis de ce gradient (exemple du taxon Sp. 2) : que sa répartition apparaisse complètement aléatoire, ou qu'elle ne soit pas jugée assez spécifique et fidèle (*ie* non atteinte de la valeur seuil de Z-score retenue pour sélectionner les taxons).
- Taxon Z+ (exemple du taxon Sp. 3), dont la répartition révèle une forte affinité avec l'accroissement des valeurs du paramètre (autrement dit, taxon tolérant à une augmentation de ce paramètre).

La dernière phase de l'analyse TITAN s'appuie sur le classement individuel de chaque taxon dans le gradient considéré pour en déduire un seuil de basculement de la communauté diatomique multispécifique dans ce même gradient ; une nouvelle procédure de bootstrap permettant de consolider statistiquement et d'établir la marge d'incertitude autour du seuil de basculement "Communauté" obtenu.

# Matériels et méthodes

## Synthèse des données des rapports précédents

---

Les différentes tables de données utilisées sont :

- une table synthétisant les données obtenues lors des calculs de moyennes pondérées (WA). Les optima et tolérances pour chaque paramètre et pour chaque taxon ayant pu être calculés sont indiqués. Ces valeurs ont été calculées grâce au package rioja (Juggins 2023) sous R (R core team 2024).
- une table générale sur les taxons avec notamment leur code à 4 lettres, dénomination, statut et valence IDR version 1. Les informations de cette table proviennent du guide méthodologique (Eulin et al. 2018) et sont repris dans le SEEE (système d'évaluation de l'état des eaux).
- une table de données générales calculées sur les taxons avec leur occurrence, abondance relative générale...
- une table synthétisant les résultats TITAN2 pour les différents taxons.
- une table inventaires qui regroupent les différents inventaires diatomiques de La Réunion utilisés avec code station, code diatomée et abondance brute. Ces inventaires sont ceux effectués sur le réseau OLE (RCS, recherche et supplémentaires) de 2008 à 2022 (explication dans le rapport n° 1).
- une table qui regroupe les différents codes utilisés pour chaque station/campagne avec notamment la date de prélèvement, le code station de l'OLE...
- une table station notamment avec code OLE, coordonnées GPS et zone HER diatomées Réunion.
- une table avec les stations choisies comme stations de référence pour l'élaboration de l'IDR1.

Ces données regroupent donc les informations concernant les taxons, les inventaires diatomiques et les stations prélevées. Ces tables selon les jointures utilisées permettent d'appliquer les procédures utilisées pour l'élaboration de l'IDR2.

## Procédure appliquée

---

### La nouvelle table de valence

Dans un premier temps, une sélection des futurs taxons indiciaires est menée.

#### Règle 1

Cette règle s'applique pour déterminer les taxons qui ne seront pas pris en compte dans le calcul du futur IDR vis-à-vis de leur occurrence et leur abondance relative. Ils sont constitués par :

- les taxons dont l'occurrence est inférieure à 3 sur l'ensemble de l'historique,
- les taxons dont l'abondance relative maximale ne dépasse pas 2 %.

Cette première sélection aboutit à 93 taxons non pris en compte, i.e. sans valence. Il reste donc 273 taxons indiciaires potentiels.

#### Règle 2

Les neuf mêmes paramètres physico-chimiques utilisés pour la conception de l'IDR1 sont choisis pour cette mise à jour de l'indice. Il s'agit de la DBO, la DCO, la saturation en oxygène, la concentration en MES, l'azote Kjeldahl, les nitrites, les nitrates, les orthophosphates et le phosphore total.

En vue d'aborder cette révision indiciaire, il était important de garder en tête que les informations abiotiques ayant servi à calculer les préférences autoécologiques des taxons vis-à-vis des paramètres physico-chimiques ci-dessus listés reposent sur une stratégie de prélèvement(s) ponctuel(s), qui est peu

intégrative de la dimension temporelle. Les calculs de condition moyenne effectués vis-à-vis de ces paramètres sur les stations d'études peuvent donc manquer un peu de représentativité et de robustesse par rapport à l'ambiance physico-chimique intégrée réelle à laquelle ont été soumis les biofilms diatomiques *in situ*. De même, le recul encore modeste acquis sur certains taxons assez peu représentés en occurrences et/ou en abondances cumulées à l'échelle du jeu de données complet, même s'il permet une première approche des préférences autoécologiques qu'ils présentent sur le peu de couples (stations x dates) où on les trouve, ne permet pas encore de définir celles-ci avec une grande certitude.

Dans ce contexte encore peu établi, il nous a semblé utile et plus solide sur le plan scientifique d'aborder la fixation des valences indicielles des taxons via deux méthodes aux bases méthodologiques et conceptuelles assez radicalement différentes, mais qui sont toutes deux des méthodes éprouvées, publiées et aux vertus largement reconnues par la communauté scientifique. Ainsi, malgré les limites présentées par les données disponibles, l'intervention successive de TITAN2 et des WA a permis de s'appuyer sur un cumul de deux métriques différentes porteuses de sens, en vue de conforter l'affectation des valences attribuées aux taxons indiciels réunionnais pour les calculs du nouvel indice.

Dans un premier temps, l'analyse TITAN2 a permis de sélectionner un certain nombre de taxons (rapport intermédiaire B) ainsi que les seuils (Tableau 1) utilisés pour chaque paramètre. Ces seuils sont proches de ceux trouvés par l'approche des arbres de régression multivariable présentée dans le rapport intermédiaire B.

Tableau 1 : Seuils Titan utilisés et comparaison avec ceux trouvés par l'approche ARM

<b>Paramètres IDR</b>	<b>Seuils Titan retenus</b>	<b>Seuils ARM</b>
<b>DBO</b>	<b>2,08</b>	<b>2,146</b>
<b>DCO</b>	<b>27,10</b>	<b>24</b>
<b>MES</b>	<b>6,02</b>	<b>6,025</b>
<b>Azote Kjeldahl</b>	<b>2,30</b>	<b>2,3</b>
<b>Nitrites</b>	<b>0,07</b>	<b>0,05983</b>
<b>Nitrates</b>	<b>4,06</b>	<b>5,105</b>
<b>Taux de saturation en oxygène</b>	<b>59,97</b>	<b>51,47</b>
<b>Orthophosphates</b>	<b>0,53</b>	<b>0,4325</b>
<b>Phosphore total</b>	<b>0,25</b>	<b>0,2535</b>

Un poids de 1 est donné pour chaque taxon et chaque paramètre sorti par cette analyse. L'addition de ces attributions donne un score total TITAN2 pour chaque taxon (Tableau 2).

Tableau 2 : Détail par paramètre du score Titan2 des taxons retenus

Code métier	DBO	DCO	MES	Azote Kjeldahl	Nitrites	Nitrates	Taux de saturation en oxygène	Orthophosphates	Phosphore total	Score total Titan2
ADEG	1	0	0	1	0	1	1	0	0	4
CMEN	1	0	0	1	1	0	1	1	0	5
ESBM	1	1	0	1	1	0	1	1	1	7
FMER	1	0	0	0	0	1	0	0	1	3
GPAS	1	0	0	1	1	0	1	1	1	6
HGHA	1	0	0	1	0	0	0	1	1	4
NAFR	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2
NAS7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
NBRL	1	0	0	0	0	0	0	1	1	3
NINC	1	0	0	1	1	0	0	0	1	4
NSN1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	7
NUMB	1	1	1	1	1	0	1	1	1	8
NVEN	1	0	1	0	0	0	1	1	0	4
NZSU	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2
NZX0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	4
PTDE	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2
SMN1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	3
TAPI	1	0	0	1	0	1	1	0	0	4
DPUE	1	1	1	0	0	0	1	1	0	5
CATO	0	1	1	0	0	0	1	1	0	4
MAPE	0	1	1	1	1	0	1	1	1	7
NFIC	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
NMIC	0	1	1	0	1	0	1	0	1	5
NRIE	0	1	1	0	0	0	1	0	1	4
NXX0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2
FPYG	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
HLAC	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
KAAM	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
NNYS	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2
NOBT	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
NSLC	0	0	1	0	1	1	0	0	0	3
FSAP	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
NAS8	0	0	0	0	1	1	1	1	0	4
PIN2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
NXX1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
COC2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
FVUL	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
GO2C	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
GYAC	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
HVEN	0	0	0	0	0	1	0	1	1	3
LHUN	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
NAS3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
NBIA	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
NERI	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
NESC	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
NSIA	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
SPIN	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
GOMZ	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
SSEM	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
TGRA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

On mobilise ensuite une deuxième méthode un peu moins sélective (la méthode des WA), qui permet de faire ressortir un nombre plus important de taxons d'alerte.

Les seuils TITAN2 sont utilisés sur l'optimum obtenu lors des calculs de WA pour chaque couple taxon/paramètre. Un poids de 1 est attribué pour chaque taxon lié au paramètre sélectionné. Le même principe est appliqué sur la somme (optimum + tolérance WA), mais dans ce cas de dépassement du seuil le poids de 0,25 est affecté au taxon. L'addition de toutes ces attributions permet de donner un score total WA pour chaque taxon indicier (Tableau 3).

Tableau 3 : Extrait de la table détail par paramètre du score WA des taxons retenus

Code métier	DBO	DCO	MES	Azote Kjeldahl	Nitrites	Nitrates	Taux de saturation en oxygène	Orthophosphates	Phosphore total	Score total WA
ACOP	0,25	0,25	1	0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	2,75
ACTC	1	1	1	0	0	1	1	1	0	6
ADEG	1	0,25	1	1	1	1	1	1	0,25	7,5
ARPT	0,25	0	0	0	0	0,25	0	0	0	0,5
CATO	1	1	1	1	0,25	0	1	1	1	7,25
CMEN	0,25	0,25	0,25	0,25	1	0,25	1	1	0	4,25
CYM6	0,25	0	0,25	0	0	1	0,25	0	0	1,75
DPUE	1	1	1	1	1	0,25	1	1	1	8,25
EPRO	0,25	0	0	0	0	0,25	0	0	0	0,5
ESBM	0,25	0,25	1	1	1	1	1	1	0,25	6,75
FMER	0,25	0	1	0,25	0,25	1	1	1	0,25	5
FPYG	1	1	1	1	1	0,25	1	1	1	8,25
FRU6	0,25	0	0	0	0	0	0	0	1	1,25
FSAP	0,25	0,25	0,25	1	1	0	1	1	0	4,75
GGRA	0,25	1	1	0,25	0,25	0	1	1	1	5,75
GNEI	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25
GODH	1	1	1	1	0,25	0	1	1	1	7,25
GODN	1	1	1	0,25	1	0	1	1	1	7,25
GOM4	0,25	0,25	1	0	1	0,25	1	1	0,25	5

Enfin, en vue d'obtenir le résultat intégratif de ces deux métriques, qui permettra de fixer la valence finale du taxon dans l'IDR2, un score total égal à la somme du score TITAN2 et du score total WA est alors effectué, tous paramètres confondus

Tableau 4 : Extrait de la table détail par paramètre du score total (Titan2 + WA) des taxons retenus

Code métier	Score total TITAN2	Score total WA	Score total
NUMB	8	8,25	<b>16,25</b>
NSN1	7	8,25	<b>15,25</b>
ESBM	7	6,75	<b>13,75</b>
MAPE	7	6,75	<b>13,75</b>
DPUJ	5	8,25	<b>13,25</b>
GPAS	6	6	<b>12</b>
NMIC	5	6,75	<b>11,75</b>
ADEG	4	7,5	<b>11,5</b>
NAS8	4	7,5	<b>11,5</b>
NINC	4	7,5	<b>11,5</b>
NRIE	4	7,5	<b>11,5</b>
NZX0	4	7,5	<b>11,5</b>
CATO	4	7,25	<b>11,25</b>
NBRL	3	8,25	<b>11,25</b>
NSLC	3	8,25	<b>11,25</b>
NXX0	2	9	<b>11</b>
NVEN	4	6,75	<b>10,75</b>
HGHA	4	6,5	<b>10,5</b>
NNYS	2	8,25	<b>10,25</b>
NZSU	2	8	<b>10</b>
CMEN	5	4,25	<b>9,25</b>
FPYG	1	8,25	<b>9,25</b>
FSAP	4	4,75	<b>8,75</b>
SMN1	3	5,75	<b>8,75</b>
HVEN	3	5,5	<b>8,5</b>
PIN2	1	7,5	<b>8,5</b>
KAAM	1	7,25	<b>8,25</b>
TGRA	1	7,25	<b>8,25</b>
FMER	3	5	<b>8</b>
NFIC	2	6	<b>8</b>
HLAC	1	6,75	<b>7,75</b>
NOBT	1	6,75	<b>7,75</b>
GODH	0	7,25	<b>7,25</b>
GODN	0	7,25	<b>7,25</b>
NZX3	0	7,25	<b>7,25</b>
PSSB	0	7,25	<b>7,25</b>
STHE	0	7,25	<b>7,25</b>
TAPI	4	3,25	<b>7,25</b>
NZX2	0	7	<b>7</b>
NZS2	0	6,25	<b>6,25</b>

Code métier	Score total TITAN2	Score total WA	Score total
ACTC	0	6	<b>6</b>
NIFR	0	6	<b>6</b>
NXX1	1	5	<b>6</b>
PTDE	2	4	<b>6</b>
GGRA	0	5,75	<b>5,75</b>
NAS4	0	5,75	<b>5,75</b>
NAFR	2	3,25	<b>5,25</b>
GOM4	0	5	<b>5</b>
SPIN	1	4	<b>5</b>
RHOS	0	4,75	<b>4,75</b>
NIPU	0	4,5	<b>4,5</b>
LGOE	0	4,5	<b>4,5</b>
NAS3	1	3,5	<b>4,5</b>
LMUT	0	4,25	<b>4,25</b>
NJUA	0	4,25	<b>4,25</b>
NUP3	0	4	<b>4</b>
PTD6	0	4	<b>4</b>
TDEB	0	4	<b>4</b>
NAS7	1	2,75	<b>3,75</b>
NXX8	0	3,75	<b>3,75</b>
NZY7	0	3,75	<b>3,75</b>
ACOP	0	2,75	<b>2,75</b>
GOMZ	1	1,75	<b>2,75</b>
NXX6	0	2,5	<b>2,5</b>
NAS9	0	2,5	<b>2,5</b>
NZZ9	0	2,5	<b>2,5</b>
SSEM	1	1,25	<b>2,25</b>
KAPG	0	2	<b>2</b>
SPUP	0	2	<b>2</b>
COC2	1	1	<b>2</b>
FVUL	1	1	<b>2</b>
NBIA	1	1	<b>2</b>
NESC	1	1	<b>2</b>
CYM6	0	1,75	<b>1,75</b>
NERI	1	0,75	<b>1,75</b>
LHUN	1	0,75	<b>1,75</b>
NCLA	0	1,5	<b>1,5</b>
GOAH	0	1,5	<b>1,5</b>
NFIL	0	1,5	<b>1,5</b>
FRU6	0	1,25	<b>1,25</b>

Code métier	Score total TITAN2	Score total WA	Score total
NANT	0	1,25	<b>1,25</b>
DCOF	0	1,25	<b>1,25</b>
DSUN	0	1,25	<b>1,25</b>
NZS7	0	1,25	<b>1,25</b>
NZZ2	0	1,25	<b>1,25</b>
SEL1	0	1,25	<b>1,25</b>
GO2C	1	0,25	<b>1,25</b>
GYAC	1	0,25	<b>1,25</b>
NSIA	1	0,25	<b>1,25</b>
RGIB	0	1	<b>1</b>
NZS6	0	1	<b>1</b>
FRA7	0	1	<b>1</b>
SEL3	0	1	<b>1</b>
AMP1	0	1	<b>1</b>
PIN1	0	1	<b>1</b>
AMP2	0	1	<b>1</b>
NXX7	0	1	<b>1</b>
NZX1	0	1	<b>1</b>
GODS	0	1	<b>1</b>
CRT1	0	1	<b>1</b>
APED	0	1	<b>1</b>
EOMI	0	1	<b>1</b>
NROS	0	1	<b>1</b>
GOMD	0	1	<b>1</b>
GPAP	0	1	<b>1</b>
NPAL	0	1	<b>1</b>
GCRE	0	1	<b>1</b>
CHS3	0	1	<b>1</b>
DDST	0	1	<b>1</b>
ENS5	0	1	<b>1</b>
FRA6	0	1	<b>1</b>
NZY1	0	0,75	<b>0,75</b>
ARPT	0	0,5	<b>0,5</b>
EPRO	0	0,5	<b>0,5</b>
GSC2	0	0,5	<b>0,5</b>
CHHI	0	0,5	<b>0,5</b>
CMLF	0	0,5	<b>0,5</b>
CPED	0	0,5	<b>0,5</b>
ENS2	0	0,5	<b>0,5</b>
GPAP	0	0,5	<b>0,5</b>

196 taxons sur les 273 retenus après l'application de la règle 1 ont un score supérieur à 0. Ceux dont le score est égal à 0, correspondant à 77 taxons, sont automatiquement dotés d'une valence +.

### Règle 3

La sélection des taxons « halins » se fait à partir de leur présence sur les stations présentant des intrusions marines, mais aussi selon leur WA lié à l'ion chlorure ainsi qu'à dire d'expert. De même que pour la première version de l'IDR, une valence « halin » leur est attribuée, et ces taxons ne participent ni à l'assise indicielle de l'inventaire, ni au calcul de l'IDR révisé. Il s'agit des taxons: *Fallacia meridionalis* (FMER), *Karayevia* sp. 1\_Atlas\_Reunion\_2019 (KAAM), *Nitzschia filiformis* var. *conferta* (NFIC), *Nitzschia filiformis* (NFIL), *Navicula salinicola* (NSLC), *Nitzschia* sp. 27\_Atlas\_Reunion\_2019 (NZY7), *Pseudostaurosira* sp. 1\_Atlas\_Reunion\_2019 (PSSB), *Seminavis* sp. 1\_Atlas\_Reunion\_2019 (SMN1) et *Tryblionella granulata* (TGRA).

Nota : Ces neuf taxons faisaient déjà partie des taxons « halins » dans l'IDR1.

### Règle 4

Une nouvelle sélection intervient pour lister les taxons d'alerte de l'IDR2 et pour les placer dans les différents niveaux d'alerte en fonction du score qu'ils atteignent :

– les taxons halins sont sortis de la liste des scores. Il leur est attribué la valence « halin » et ils ne prennent pas part au calcul indiciel.

– les taxons ne répondant pas à la règle 1 (dépassement des seuils d'occurrence et d'abondance relative) sont sortis du calcul.

On obtient alors la table qui regroupe les taxons indiciels de l'IDR2.

Le but est alors d'attribuer le statut indiciel IDR2, soit Taxon + ou l'une des 3 classes -.

Une discrétisation selon les scores totaux (WA+TITAN2) est alors effectuée. La méthode kmeans est utilisée et permet de trouver les seuils de séparation pour l'attribution de sa classe au taxon :

- Taxon + si score total WA + TITAN2 < 0,875
- Taxon 1- de 0,875 à < 3,25
- Taxon 2- de 3,25 à < 8,125
- Taxon 3- supérieur ou égal à 8,125.

Tout taxon ayant au moins une alerte par TITAN2 (score total Titan) est donc pris en compte et devient au moins taxon d'alerte 1-.

### Règle 5

Une dernière sélection est faite sur la liste des taxons indiciels. Son but est de discriminer les « faux » taxons négatifs de l'indice (i.e. ceux non liés à une perturbation anthropique).

Pour cela une hypothèse émise est que si un taxon est présent plus d'une fois sur deux sur les inventaires d'une station de référence alors celui-ci ne peut marquer une perturbation anthropique et sa présence est naturelle. C'est le cas pour un seul taxon, il est codé EOMI (*Eolimna minima*) (Fig. 4). De plus celui-ci est largement répandu à La Réunion (présent sur plus de 70% des stations prélevées) et ne se retrouve pas comme taxon avec une abondance dominante sur les stations les plus perturbées.

Tableau 5 : Principaux taxons d'alerte classés par occurrence décroissante sur les prélèvements correspondant aux stations de référence

Code métier	Occurrence sur station de référence (150)	Pourcentage d'occurrence sur station de référence
<b>EOMI</b>	<b>90</b>	<b>60,00</b>
APED	33	22,00
SSEM	24	16,00
MAPE	21	14,00
NAFR	13	8,67
RGIB	12	8,00
NPAL	11	7,33
FSAP	7	4,67
NESC	7	4,67

De même si l'occurrence d'un taxon classé antérieurement avec une valence négative est supérieure à 50% sur une station de référence par rapport à son occurrence totale alors il n'est pas taxon d'alerte. C'est le cas des taxons en gras de la figure 5, *Humidophila* sp. 2\_Atlas\_Reunion\_2019 (DDST), *Frustulia* sp. 6\_Atlas\_Reunion\_2019 (FRU6), *Navicula* sp. 18\_Atlas\_Reunion\_2019 (NXX8) et *Nitzschia* sp. 2\_Atlas\_Reunion\_2019 (NZS2). Ces taxons ayant un poids lié à la saturation en oxygène pourraient être liés plus au faciès d'écoulement naturel lentique de la station plutôt qu'à un manque d'oxygène provoqué par l'homme.

Tableau 6 : Principaux taxons d'alerte classés par pourcentage d'occurrence décroissante sur les stations de référence par rapport à l'ensemble des stations.

Code métier	Occurrence sur station référence	Occurrence totale	pourcentage d'occurrence sur station référence
<b>DDST</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>80,00</b>
<b>FRU6</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>71,43</b>
<b>NXX8</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>66,67</b>
<b>NZS2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>66,67</b>
GOMD	1	2	50,00
GGRA	2	5	40,00
RGIB	12	30	40,00
CHS3	1	3	33,33
FRAG	1	3	33,33
NZS7	3	9	33,33
LMUT	4	15	26,67
NIPU	1	4	25,00

Ainsi les cinq taxons cités initialement classés taxon 1- sont reclassés en taxons +.

## Table de valence

L'application de ces règles aboutit à la table de valence des taxons indicels du nouvel IDR.

## Le calcul de l'IDR

La formule de l'IDR version originale est utilisée.

Le calcul de l'IDR est détaillé ci-dessous (Eulin et al. 2018). Il se fait en trois étapes :

### Etape 1

$$\begin{aligned}
 IDR_{site} = & \left( \frac{Occ^+}{Rspe^{profils}} * \sum Ab_{relative}^+ \right) \\
 & - \left( \frac{Occ^-}{Rspe^{profils}} * \sum Ab_{relative}^- \right) \\
 & - 3 * \left( \frac{Occ^{--}}{Rspe^{profils}} * \sum Ab_{relative}^{--} \right) \\
 & - 5 * \left( \frac{Occ^{---}}{Rspe^{profils}} * \sum Ab_{relative}^{---} \right)
 \end{aligned}$$

$Occ^{+,--,---}$  : occurrence des taxons possédant un attribut

$Rspe^{profils}$  : richesse spécifique des taxons possédant un profil dans l'échantillon

$\sum Ab_{relative}^{+,--,---}$  : abondance des taxons qui se caractérisent par l'attribut choisi

### Etape 2

Pondération de l'IDR par rapport à la somme des abondances relatives des taxons ayant un attribut.

$$IDR = \frac{IDR_{site}}{\sum Ab_{relative}^{profils}} * 100$$

### Etape 3

Un changement s'opère au niveau de la normalisation de la note IDR sur 20 par rapport à la version originale. Antérieurement, l'amplitude brute sur laquelle était recalculée la note IDR sur 20 était calée sur la plus basse note brute obtenue sur toute la chronique historique de l'époque. Mais depuis, il a pu être rencontré quelques notes brutes « plus basses » que ce minimum historique, induisant des notes finales sur 20 négatives. Le choix a été fait de renormaliser l'IDR sur 20 pour que dorénavant, il soit bien compris entre 0 et 20 avec l'impossibilité de notes négatives. A cet effet, la valeur brute minimale calée sur -330 pour l'IDR1 a été changée en -500 pour l'IDR2.

Normalisation de l'indice sur 20.

$$IDR_{20} = \frac{IDR + 500}{100 + 500} * 20$$

La formule de l'indice et la table de valence des taxons étant maintenant disponibles, l'IDR version 2 peut donc être calculé.

## Calcul d'EQR et attribution des classes de qualité

Comme dans la version originale, les deux HER, Ouest et Est sont conservées. Les EQR et les seuils de classes de qualité doivent donc être recalculés pour chacune des HER diatomées. Les stations de référence choisies dans la première version sont les mêmes dans la nouvelle.

La trame abiotique choisie pour maîtriser la variation naturelle de l'IDR est représentée sur la figure 4.

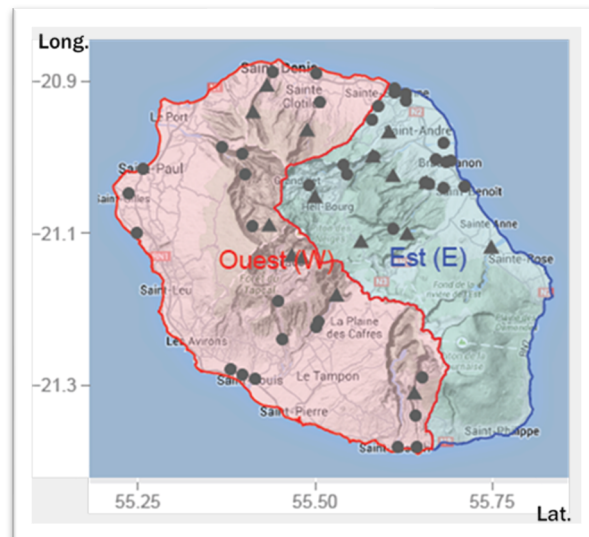


Figure 4 : Trame abiotique de référence adoptée pour maîtriser la variation naturelle de l'IDR (Extrait de Boutry et al. 2014)

Les différents calculs pour aboutir à la classe de qualité suivent le même principe général que pour l'IDR original.

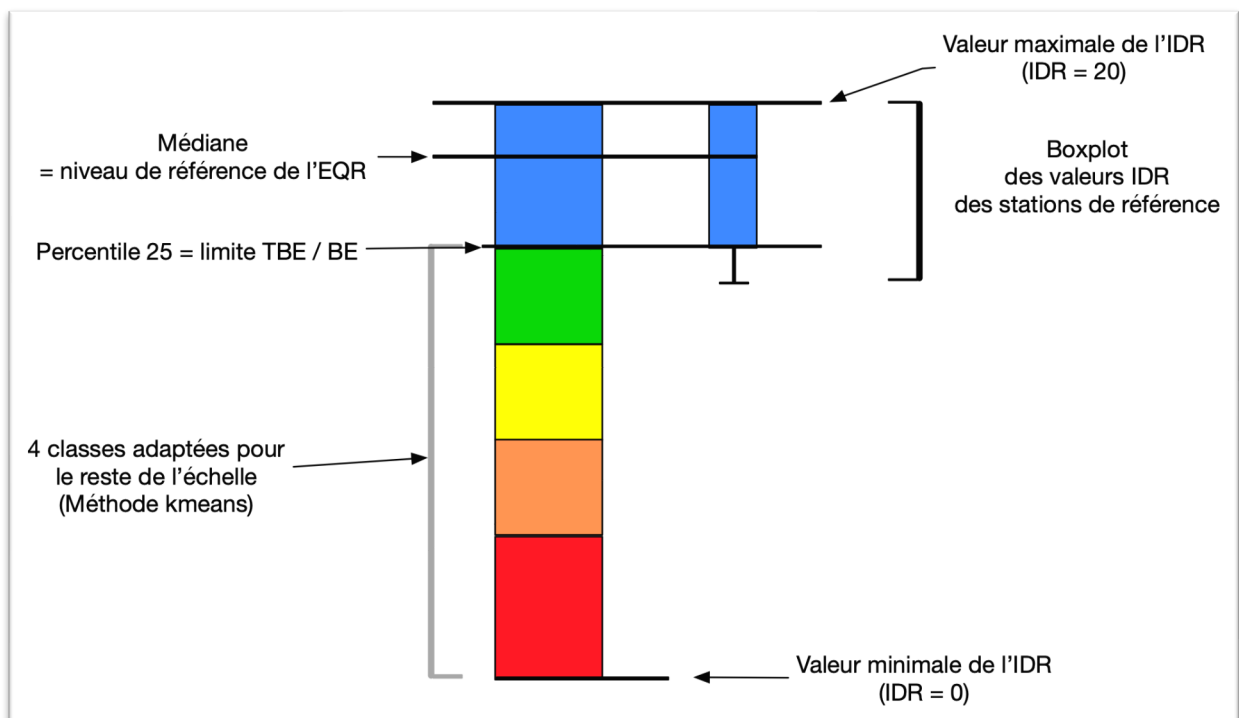


Figure 5 : Schéma récapitulatif du principe de conception des différentes classes d'état diatomique

## Calcul de la note de référence

La note de référence de chaque HER, comme dans la version précédente, correspond à la médiane des notes sur les stations de référence de l'HER considérée.

Pour l'HER Est, elle est égale à 20 et à 19,669 pour l'HER Ouest.

## Choix des seuils des classes de qualité

Les percentiles 20, 25 et 30 ont été calculés pour déterminer le seuil TBE/BE. Le choix s'est porté sur le percentile 25 qui donnait des résultats semblant les plus réalistes pour les deux HERs (à dire d'expert). Pour attribuer les seuils des autres classes, plusieurs méthodes de discrétisation ont été essayées en utilisant le package R classInt. La discrétisation par la méthode des kmeans est choisie car elle permet une bonne séparation des classes avec une distribution des stations dans les différentes classes de qualité se rapprochant notamment de celle de l>IDR1. Les résultats obtenus sont synthétisés dans les tableaux ci-dessous.

Le seuil de limite de classes TBE-BE est de 19,483 pour l'HER Ouest et de 19,749 pour l'HER Est.

Comme dans le cas de l>IDR1, la détermination de l'Ecological Quality Ratio (EQR) de l>IDR correspond à un écart à une note de référence :

$$EQR_{IDR} = \frac{IDR_{20}}{IDR_{référence}}$$

$IDR_{référence}$  : si la station de mesure appartient à l'aire géographique Est, l' $IDR_{référence}$  est de 20 ; si la station de mesure appartient à l'aire géographique Ouest, l' $IDR_{référence}$  est de 19,669.

Selon la région considérée, les **grilles de classes de qualité** sont différentes et présentées ci-dessous.

### Région Ouest

$EQR \geq 0,9905$	$IDR \geq 19,483$	Qualité très bonne
$0,9905 > EQR \geq 0,9456$	$19,483 > IDR \geq 18,599$	Qualité bonne
$0,9456 > EQR \geq 0,7936$	$18,599 > IDR \geq 15,609$	Qualité moyenne
$0,7936 > EQR \geq 0,4872$	$15,609 > IDR \geq 9,583$	Qualité médiocre
$EQR < 0,4872$	$IDR < 9,583$	Qualité mauvaise

## Région Est

$EQR \geq 0,9874$	$IDR \geq 19,748$	Qualité très bonne
$0,9874 > EQR \geq 0,9608$	$19,748 > IDR \geq 19,216$	Qualité bonne
$0,9608 > EQR \geq 0,8997$	$19,216 > IDR \geq 17,994$	Qualité moyenne
$0,8997 > EQR \geq 0,3906$	$17,994 > IDR \geq 7,812$	Qualité médiocre
$EQR < 0,3906$	$IDR < 7,812$	Qualité mauvaise

Les taxons d’alerte jouent un rôle primordial dans le calcul de l’IDR. En effet, la valeur maximale de l’IDR (20) est « dégradée » par leur présence et abondance dans l’inventaire.

### Outil diagnostique

Un outil diagnostique est proposé permettant de pointer les paramètres de l’IDR ayant le plus de poids pour un inventaire donné et de fournir ainsi une interprétation complémentaire à la note IDR et la classe associée d’état diatomique obtenue.

Le graphe choisi est un diagramme en barre présenté de manière circulaire. Il prend en compte l’abondance relative des taxons d’alerte « négatifs », ainsi que la métrique pour laquelle ils ont un signal TITAN2 et WA. Les données ont fait l’objet d’une transformation racine carrée pour permettre une meilleure visualisation des niveaux modérés d’altération.

# Résultats - Discussion

## Table de valence

La table de valence du nouvel IDR est fournie en annexe ainsi que la comparaison avec la table antérieure de l'IDR1.

Les 366 taxons inventoriés se répartissent en 102 non indiciels (dont 9 halins) et 264 indiciels dont (183 taxons +, 34 taxons 1-, 23 taxons 2- et 24 taxon 3-).

Pour synthétiser les résultats, ne sont listés ci-dessous que les taxons d'alerte (i.e. qui présentent une valence négative).

Taxon 1-		Taxon 2-		Taxon 3-	
Code métier	Dénomination du taxon	Code métier	Dénomination du taxon	Code métier	Dénomination du taxon
ACOP	<i>Amphora</i> sp. 3_Atlas_Reunion_2019	GGRA	<i>Gomphonema graciledictum</i>	ADEG	<i>Achnanthydium exiguum</i>
APED	<i>Amphora pediculus</i>	GOM4	<i>Gomphonema</i> sp. 4_Atlas_Reunion_2019	CATO	<i>Cyclotella atomus</i>
CHS3	<i>Chamaepinnularia</i> sp. 3_Atlas_Reunion_2019	HLAC	<i>Halamphora acutiuscula</i>	CMEN	<i>Cyclotella meneghiniana</i>
COC2	<i>Cocconeis</i> sp. 2_Atlas_Reunion_2019	LGOE	<i>Luticola goeppertiana</i>	DPUE	<i>Diploneis puella</i>
CYM6	<i>Cymbella</i> sp. 6	LMUT	<i>Luticola mutica</i>	ESBM	<i>Craticula subminuscula</i>
DCOF	<i>Diademsis confervacea</i>	NAFR	<i>Nitzschia amphibia</i> f. <i>frauenfeldii</i>	FPYG	<i>Fallacia pygmaea</i>
DSUN	<i>Denticula sundaysensis</i>	NAS3	<i>Navicula</i> sp. 3_Atlas_Reunion_2019	FSAP	<i>Fistulifera saprophila</i>
FRA6	<i>Fragilaria</i> sp. 6_Atlas_Reunion_2019	NAS4	<i>Navicula</i> sp. 4_Atlas_Reunion_2019	GPAS	<i>Gomphonema saprophilum</i>
FVUL	<i>Frustulia vulgaris</i>	NAS7	<i>Navicula</i> sp. 7_Atlas_Reunion_2019	HGHA	<i>Halamphora ghanensis</i>
GCRE	<i>Placogeia creolorum</i>	NIFR	<i>Nitzschia frustulum</i> var. <i>frustulum</i>	HVEN	<i>Halamphora veneta</i>
GO2C	<i>Gomphonema</i> sp. 25	NIPU	<i>Nitzschia</i> sp. 37_Atlas_Reunion_2019	MAPE	<i>Mayamaea permitis</i>
GOAH	<i>Gomphosphenia</i> sp. 1_Atlas_Reunion_2019	NJUA	<i>Navicula</i> sp. 23_Atlas_Reunion_2019	NAS8	<i>Navicula</i> sp. 8_Atlas_Reunion_2019
GOMD	<i>Gomphonema</i> sp. 12_Atlas_Reunion_2019	NOBT	<i>Nitzschia obtusa</i>	NBRL	<i>Navicula</i> sp. 20_Atlas_Reunion_2019
GOMZ	<i>Gomphonema</i> sp. 11_Atlas_Reunion_2019	NXX1	<i>Navicula</i> sp. 11_Atlas_Reunion_2019	NINC	<i>Nitzschia inconspicua</i>
GPAR	<i>Gomphonema parvulum</i>	NZX2	<i>Nitzschia</i> sp. 32_Atlas_Reunion_2019	NMIC	<i>Nitzschia microcephala</i>
GYAC	<i>Gyrosigma acuminatum</i>	NZX3	<i>Nitzschia</i> sp. 33_Atlas_Reunion_2019	NNYS	<i>Nitzschia nyassensis</i>
KAPG	<i>Kolbesia gessneri</i>	PTD6	<i>Planothidium</i> sp. 6_Atlas_Reunion_2019	NRIE	<i>Navicula riediana</i>
LHUN	<i>Lemnicola hungarica</i>	PTDE	<i>Planothidium delicatilum</i>	NSN1	<i>Nitzschia</i> sp. nov. 1_Atlas_Reunion_2019
NANT	<i>Navicula antonii</i>	RHOS	<i>Rhopalodia</i> sp. 1_Atlas_Reunion_2019	NUMB	<i>Nitzschia umbonata</i>
NBIA	<i>Nitzschia biacrula</i>	SPIN	<i>Staurisirella</i> sp. 1_Atlas_Reunion_2019	NVEN	<i>Navicula veneta</i>
NCLA	<i>Nitzschia clausii</i>	STHE	<i>Stauroneis</i> sp. 1_Atlas_Reunion_2019	NXX0	<i>Navicula</i> sp. 10_Atlas_Reunion_2019
NERI	<i>Navicula erifuga</i>	TAPI	<i>Tryblionella apiculata</i>	NZSU	<i>Nitzschia supralitorea</i>
NESC	<i>Navicula escambia</i>	TDEB	<i>Tryblionella debilis</i>	NZX0	<i>Nitzschia</i> sp. 30_Atlas_Reunion_2019
NPAL	<i>Nitzschia palea</i>			PIN2	<i>Pinnularia</i> sp. 2_Atlas_Reunion_2019
NROS	<i>Navicula rostellata</i>				
NSIA	<i>Navicula simulata</i>				
NXX6	<i>Navicula</i> sp. 16_Atlas_Reunion_2019				
NZS7	<i>Nitzschia</i> sp. 7_Atlas_Reunion_2019				
NZZ2	<i>Nitzschia</i> sp. 12_Atlas_Reunion_2019				
NZZ9	<i>Nitzschia</i> sp. 19_Atlas_Reunion_2019				
RGIB	<i>Epithemia gibba</i>				
SEL1	<i>Sellaphora</i> sp. 1_Atlas_Reunion_2019				
SPUP	<i>Sellaphora pupula</i>				
SSEM	<i>Sellaphora seminulum</i>				

Tableau 7 : Liste des taxons indiciels dotés d'une valence négative dans l'IDR mis à jour.

## Nouvel IDR

Les différentes notes calculées IDR nouvelle version obtenues sont fournies en annexe.

Tableau 8 : Distribution des stations selon les différentes classes de qualité de l'IDR nouvelle version

HER Ouest (354 stations)				HER Est (323 stations)			
Classe de qualité	nombre de station	Pourcentage de stations		Classe de qualité	nombre de station	Pourcentage de stations	
TBE	203	57,3	80,8	TBE	122	37,8	78,6
BE	83	23,5		BE	132	40,9	
EM	37	10,5		EM	65	20,1	
em	15	4,2	19,2	em	4	1,2	21,4
ME	16	4,5		ME	0	0,0	

Le pourcentage de stations au-dessus du seuil de bon état était de 89,6 % pour l'HER Est (164 stations) et de 79,0 % pour l'HER Ouest (181 stations) concernant l'IDR version originale.

Tableau 9 : Comparaison des classes de qualité de l'historique entre l'IDR original et le nouvel IDR

HER Ouest (354 stations)				HER Est (323 stations)			
classe de qualité IDR1	classe de qualité IDR2	Nombre de station	% de stations	classe de qualité IDR1	classe de qualité IDR2	Nombre de station	% de stations
Identique							
TBE	TBE	188	85,0	TBE	TBE	112	78,0
BE	BE	50		BE	BE	99	
EM	EM	35		EM	EM	40	
em	em	13		em	em	1	
ME	ME	15					
Augmentation d'une classe							
BE	TBE	15	9,9	BE	TBE	10	3,1
EM	BE	17		EM	BE	33	18,9
em	EM	1		BE	EM	25	
ME	em	2		EM	em	3	
Diminution d'une classe							
TBE	BE	16	5,1				
BE	EM	1		18			
em	ME	1					

Les changements de classe observés entre les deux indices ne sont jamais supérieurs de plus d'une classe de qualité. Vis-à-vis du seuil de bon état :

- Pour l'HER Est que 7,7 % stations se détériorent en passant à la nouvelle version de l'indice, ce qui semble mieux coller à la réalité du terrain.
- Pour l'HER Ouest, 4,8 % s'améliorent et une seule station se détériore en passant à la nouvelle version de l'indice, ce qui reste une faible proportion de stations.

Une comparaison selon les classes de qualité est faite selon les deux IDR sur les stations de référence, les stations reconnues comme présentant des apports en matière organique et en nutriments et les stations semblant les plus polluées.

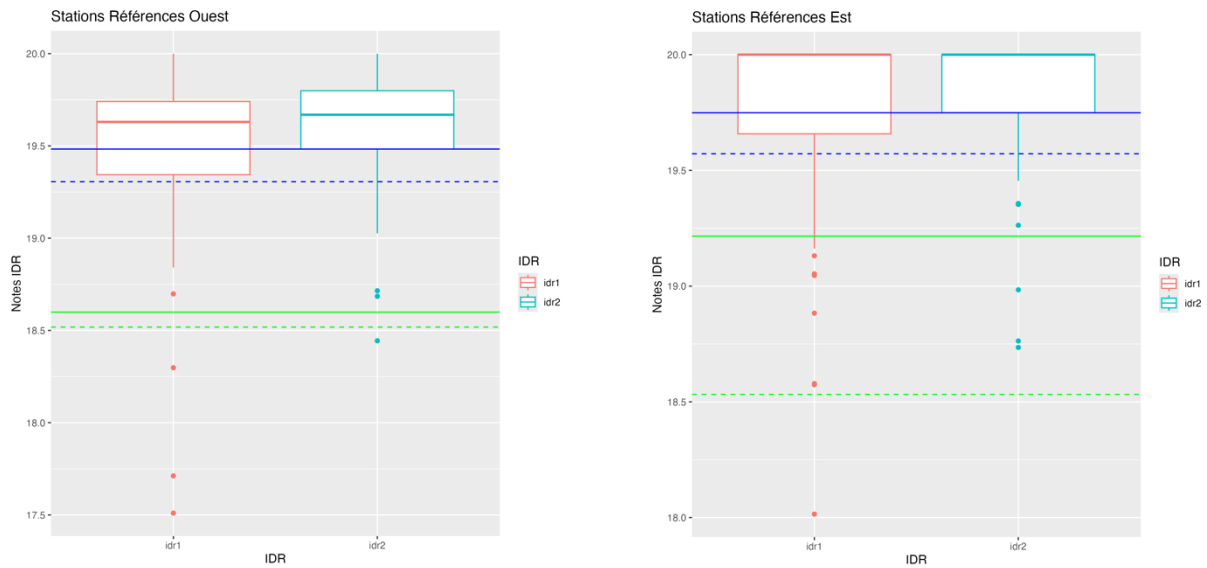


Figure 6 : Boîtes à moustaches représentant la répartition des notes IDR, version originale et dernière version sur les stations de référence (les seuils de l'IDR2 sont en traits pleins alors que ceux de l'IDR1 sont en tirets)

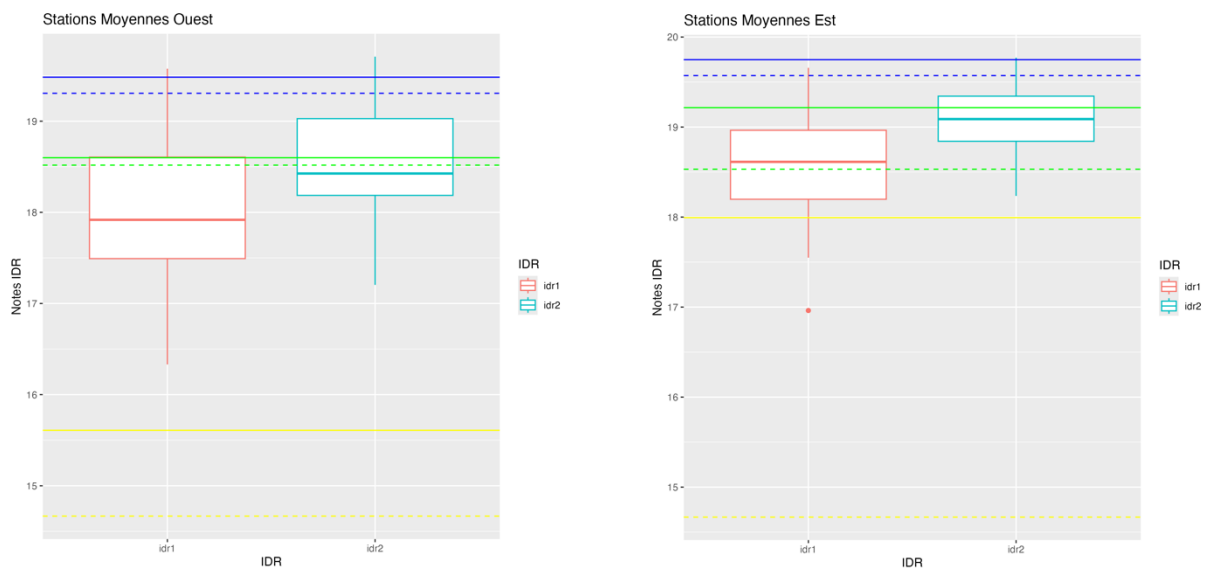


Figure 7 : Boîtes à moustaches représentant la répartition des notes IDR, version originale et dernière version sur les stations dont un apport en matière organique ou en nutriments est soupçonné (les seuils de l'IDR2 sont en traits pleins alors que ceux de l'IDR1 sont en tirets)

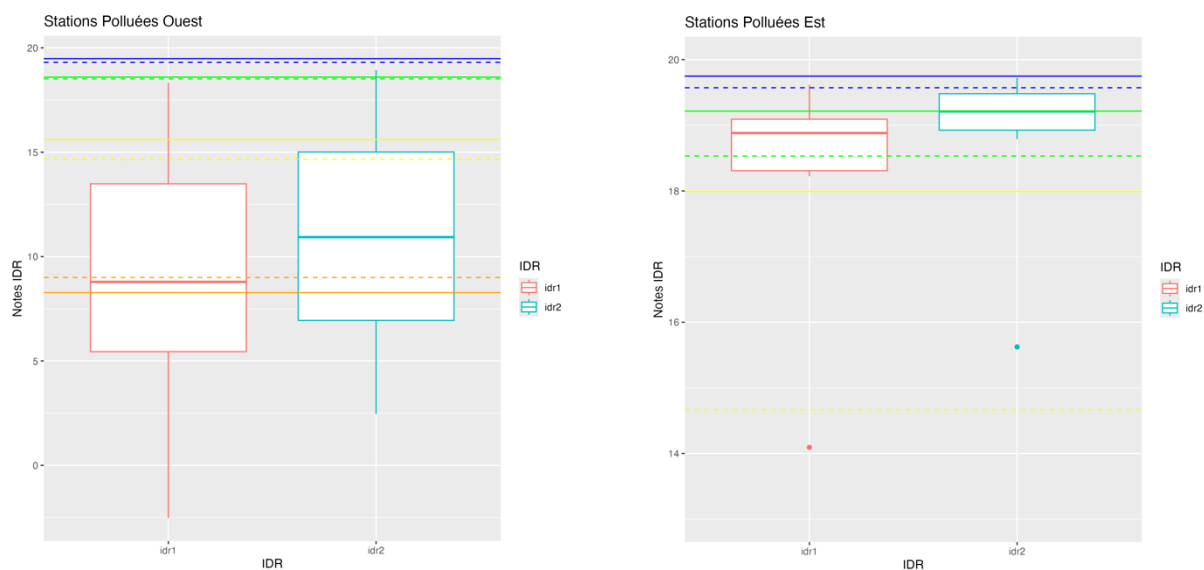


Figure 8 : Boîtes à moustaches représentant la répartition des notes IDR, version originale et dernière version sur les stations reconnues comme subissant des apports conséquents en matière organique et nutriments (les seuils de l'IDR2 sont en traits pleins alors que ceux de l'IDR1 sont en tirets)

## Représentativité et fiabilité de l'IDR

En suivant la même logique que l'IDR première version, des réserves sur la fiabilité du résultat due à l'assise indicielle peuvent être émises. Selon la fréquence relative des taxons indiciaires :

- si le dénombrement des taxons indiciaires est supérieur à 90 % (i.e. > 450 unités diatomiques si le total comptabilisé est de 500) alors l'IDR est représentatif.
- si le dénombrement des taxons indiciaires est compris entre 90 et 75 % (i.e. entre 450 et 375 unités diatomiques si le total comptabilisé est de 500) alors le calcul indiciel a une fiabilité réduite.
- Si le dénombrement des taxons indiciaires est inférieur à 75 % (i.e. < 375 unités diatomiques si le total comptabilisé est de 500) alors le calcul d'IDR est non valide.

Le tableau suivant présente les résultats obtenus selon les deux versions de l'IDR.

Fiabilité	IDR version originale	IDR nouvelle version
Représentative	662 soit 97,8 %	670 soit 99,0 %
Réduite	8 soit 1,2 %	5 soit 0,7 %
Invalide	7 soit 1,0 %	2 soit 0,3 %

Pour le nouvel IDR, les relevés produisant des calculs à fiabilité dégradée sont réduits de plus de moitié. Les calculs non représentatifs ne concernent plus que des stations sous influence marine plus ou moins marquée selon les dates, qui représentent des conditions-limites par rapport au domaine d'application légitime de la méthode. Les cas de fiabilité défectueuse s'expliquent par la présence plus ou moins forte de taxons halins qui viennent altérer l'assise indicielle des relevés concernés.

## Cartographie des résultats

La cartographie des classes de qualité diatomique par campagne obtenues selon l'IDR nouvelle version par campagne est illustrée ci-dessous.

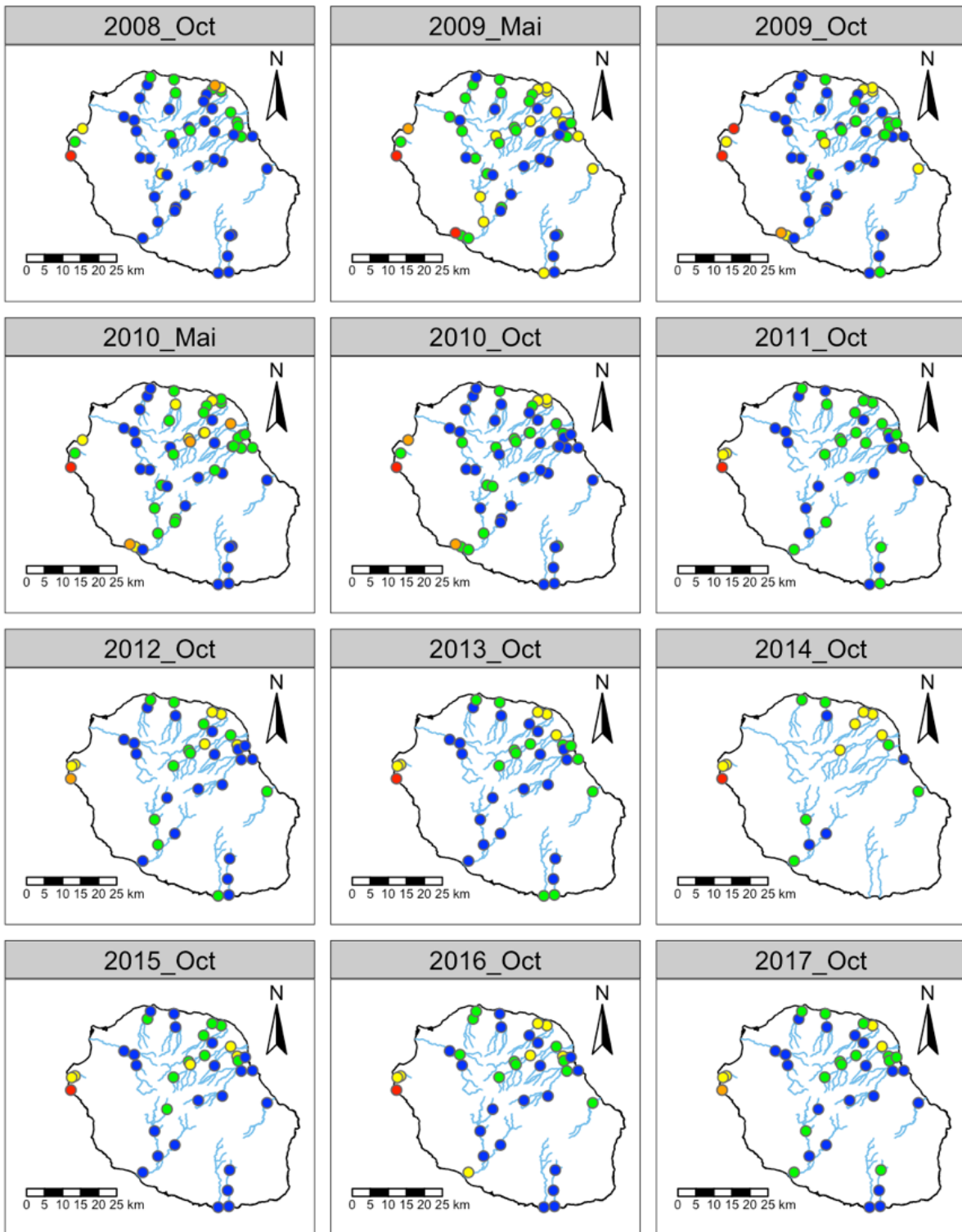


Figure 9 : Cartographie de l'IDR nouvelle version selon les classes de qualité de 2008 à 2017. (TBE : bleu, BE : vert, EM : jaune, em : orange, ME : rouge)

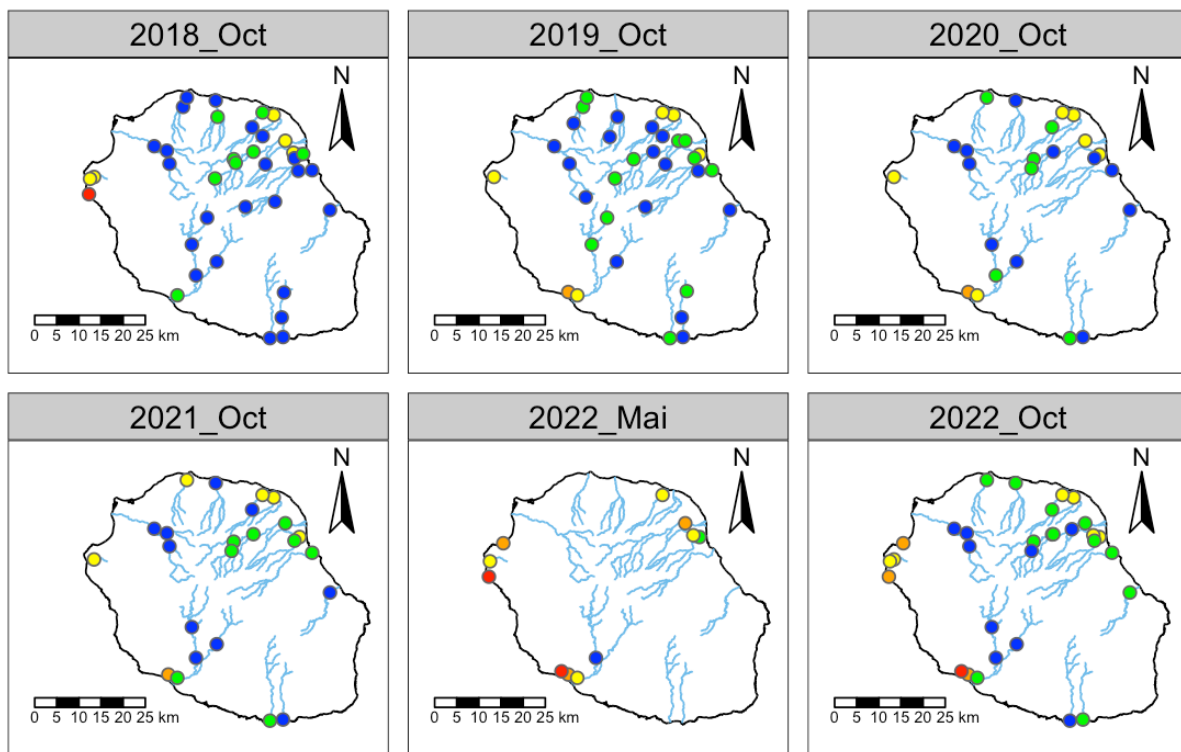


Figure 10 : Cartographie de l'IDR nouvelle version selon les classes de qualité de 2018 à 2022. (TBE : bleu, BE : vert, EM : jaune, em : orange, ME : rouge)

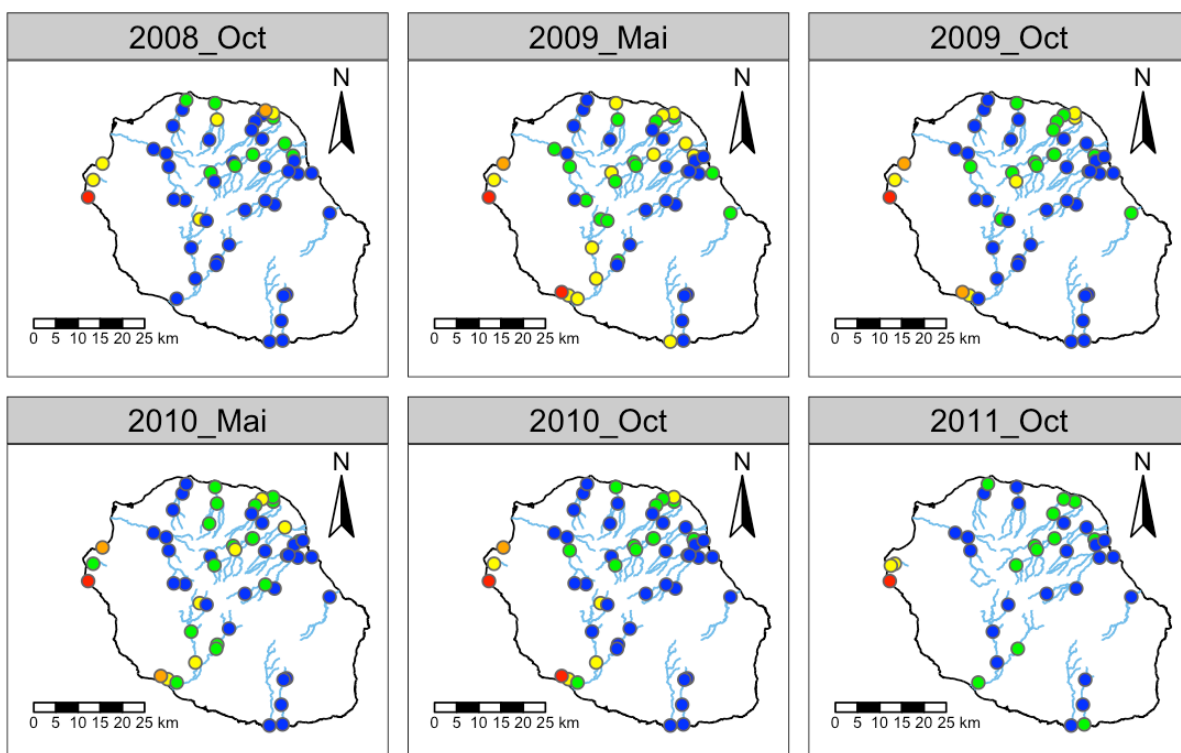


Figure 11 : Cartographie de l'IDR 1 selon les classes de qualité de 2008 à 2011. (TBE : bleu, BE : vert, EM : jaune, em : orange, ME : rouge)

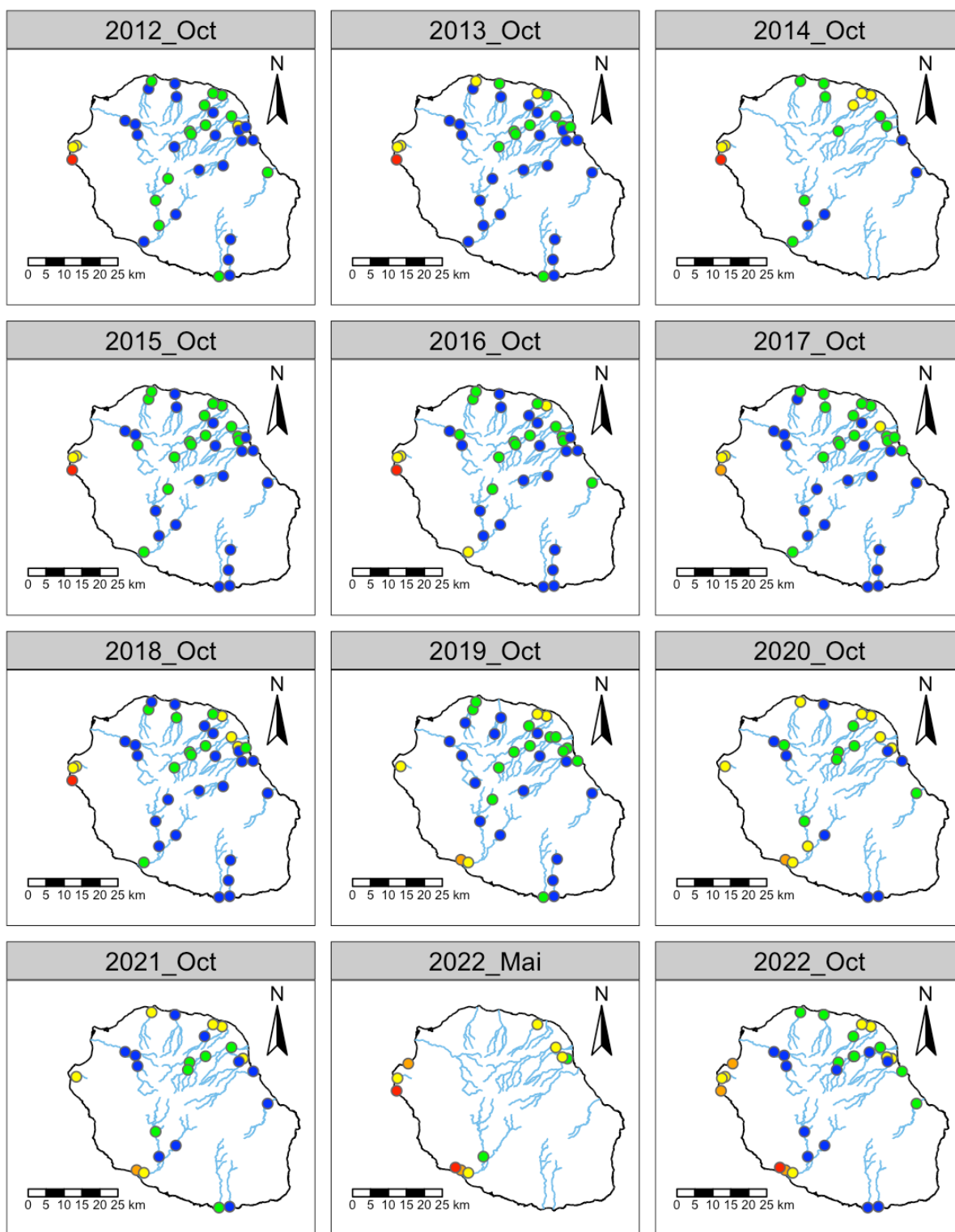


Figure 12 : Cartographie de l'IDR 1 selon les classes de qualité de 2012 à 2022. (TBE : bleu, BE : vert, EM : jaune, em : orange, ME : rouge)

Sur la base de cette nouvelle formulation indicielle, ces représentations cartographiques conduisent à des résultats d'évaluation globalement proches de ceux obtenus avec l'IDR1, et consistants par rapport à l'état chimique et écologique des stations tel que connu des experts locaux et services gestionnaires. En particulier, les évaluations révélatrices d'impacts sur l'état diatomique, ainsi que leur gradation, correspondent bien aux stations sur lesquelles les plus fortes altérations d'origine anthropique sont connues sur le terrain. Cette bonne continuité des résultats d'évaluation après révision de l'indice, les

différences s'appuyant surtout sur une meilleure assise en espèces indicielles et une meilleure connaissance de leur écologie (cf. prise de recul lié à l'augmentation conséquente du référentiel de données disponible), est un argument très favorable en faveur de l'adoption de cet indice re-versionné.

## Corrélation de Spearman

---

Le coefficient de corrélation de Spearman entre les résultats obtenus par l'ancien et le nouvel indice est très élevé et est égal à 0,94. Il montre que les deux formulations indicielles donnent des résultats globalement très convergents. Là aussi, les petites différences observées sont plutôt à mettre à l'actif de la nouvelle version d'IDR. En effet, le recul-données plus important a à la fois permis de compléter la liste des taxons indiciels et de cerner leur profil écologique de façon plus judicieuse.

Par contre, les corrélations entre les 2 versions d'IDR et chaque paramètre abiotique pris individuellement restent nettement plus faibles, ce qui est normal. En effet, la contribution relative de chaque gradient mono-paramétrique à la note finale de l'indice est variable dans chaque situation particulière de terrain (aspect spatial lié au lieu d'implantation de la station, aspect temporel pouvant faire varier la nature et le niveau relatif des pollutions qu'il subit). La note indicielle est une intégration composite mono-métrique destinée à rendre compte de façon globale de l'influence de neuf gradients de pollution différents, et à mesurer l'altération résultante occasionnée sur l'état diatomique. Ce résultat globalisé s'éloigne forcément du tracé précis de perturbation biologique occasionné par chaque gradient abiotique individuel, ce qui génère une augmentation des résidus vis-à-vis de chacun d'eux (d'où ces coefficients de Spearman atténués obtenus vis-à-vis de chaque paramètre individuel).

Ceci dit, la plupart des paramètres d'altération présentent une corrélation très hautement significative et logiquement négative avec le référentiel de notes indicielles (les valeurs fortes du gradient d'altération provoquant logiquement une baisse de la note indicielle, à l'exception de la saturation en O<sub>2</sub> dont l'augmentation occasionne au contraire une corrélation positive avec la note indicielle). Pour deux paramètres assez fortement bruités en contexte tropical, les corrélations sont nettement moindres :

- le carbone organique, qui présente la particularité de pouvoir être constitué d'une part très variable d'origine naturelle/Vs d'origine anthropique selon le lieu et selon la saison, et dont la relation avec l'IDR2 comme avec l'IDR1 n'est pas significative au seuil de 5% ;
- la DBO<sub>5</sub>, paramètre très évolutif dans l'échantillon et dont les résultats d'analyse peuvent être fortement influencés et floutés par les conditions climatiques et la performance de la chaîne de froid lors de la mission de prélèvement, ainsi que par le délai avant stockage réfrigéré au laboratoire et le délai de réalisation effective de l'analyse. La corrélation est cependant significative au seuil de 5%.

Au bilan, les résultats détaillés obtenus par les deux versions d'IDR restent très similaires vis-à-vis de ces neuf paramètres, à quelques nuances près, et les analyses de significativité conduisent à des résultats exactement identiques, illustrant à nouveau la grande similarité de ces deux versions d'outil et constituant à nouveau un élément a priori très favorable en vue de permettre la substitution de l'ancienne version par la nouvelle.

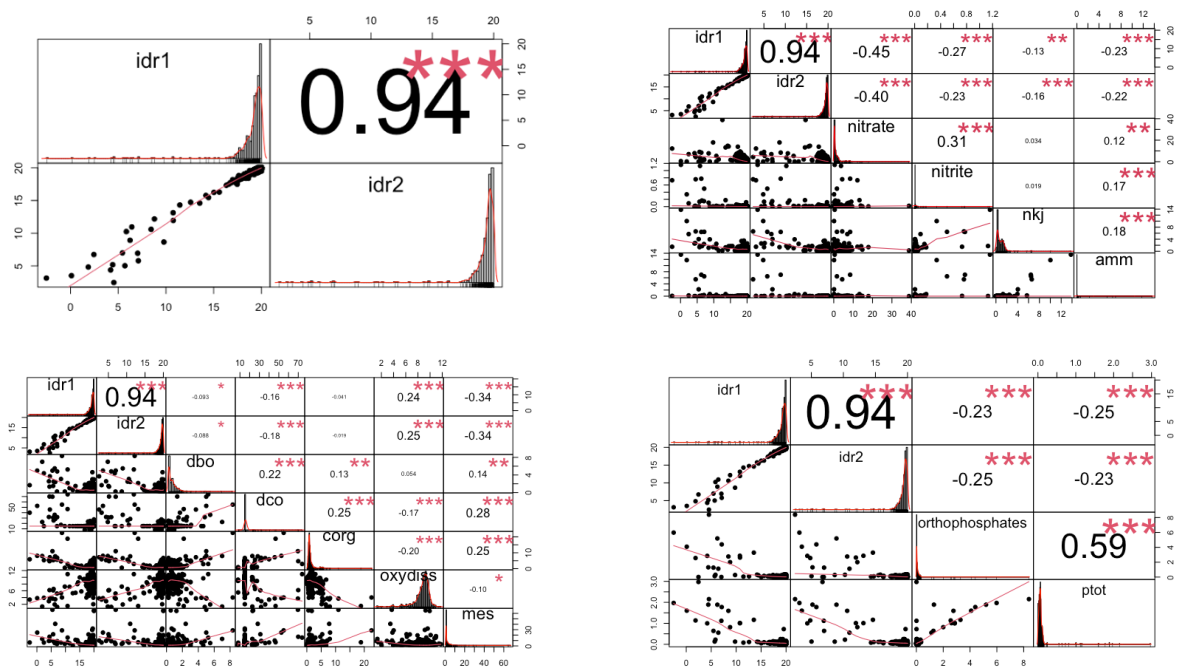


Figure 13 : Coefficient de corrélation de Spearman entre les 2 formulations indicielles et les différents gradients abiotiques

## Outil diagnostique

L'outil diagnostique proposé permet de pointer les paramètres de l'IDR ayant le plus de poids pour un inventaire donné et de fournir ainsi une interprétation complémentaire à la note IDR et la classe associée d'état diatomique obtenue.

La figure 12 illustre le cas de trois situations bien différentes : une station de référence (TBE) , une station moyennement polluée (EM) et une station polluée (em).

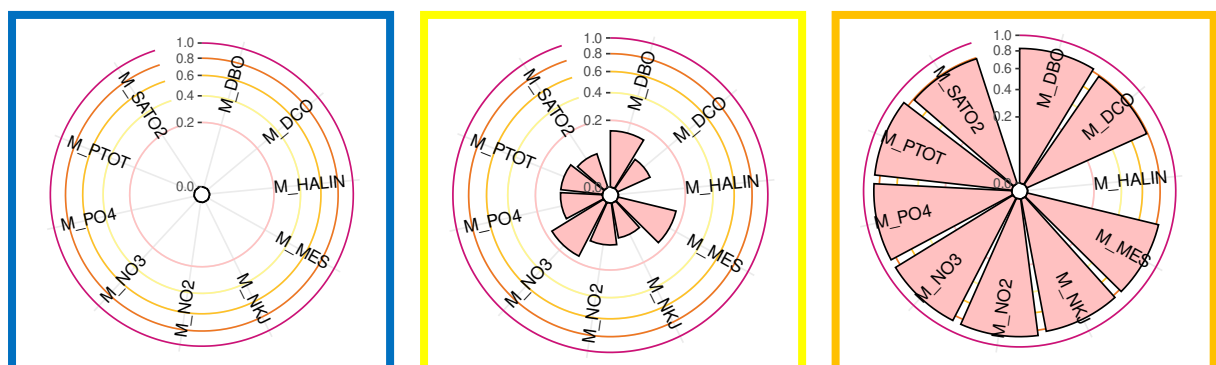


Figure 14 : Exemples de diagrammes diagnostiques. De gauche à droite La rivière des Marsouins à Bébou en 2016, la Grande Rivière Saint Jean en aval de Quartier Français en 2020 et la Ravine du Gol en 2021.

L'ensemble des graphes diagnostiques est fourni en annexe.

# Conclusion

Le synopsis ci-dessous synthétise l'ensemble des opérations menées pour la révision de l'IDR.

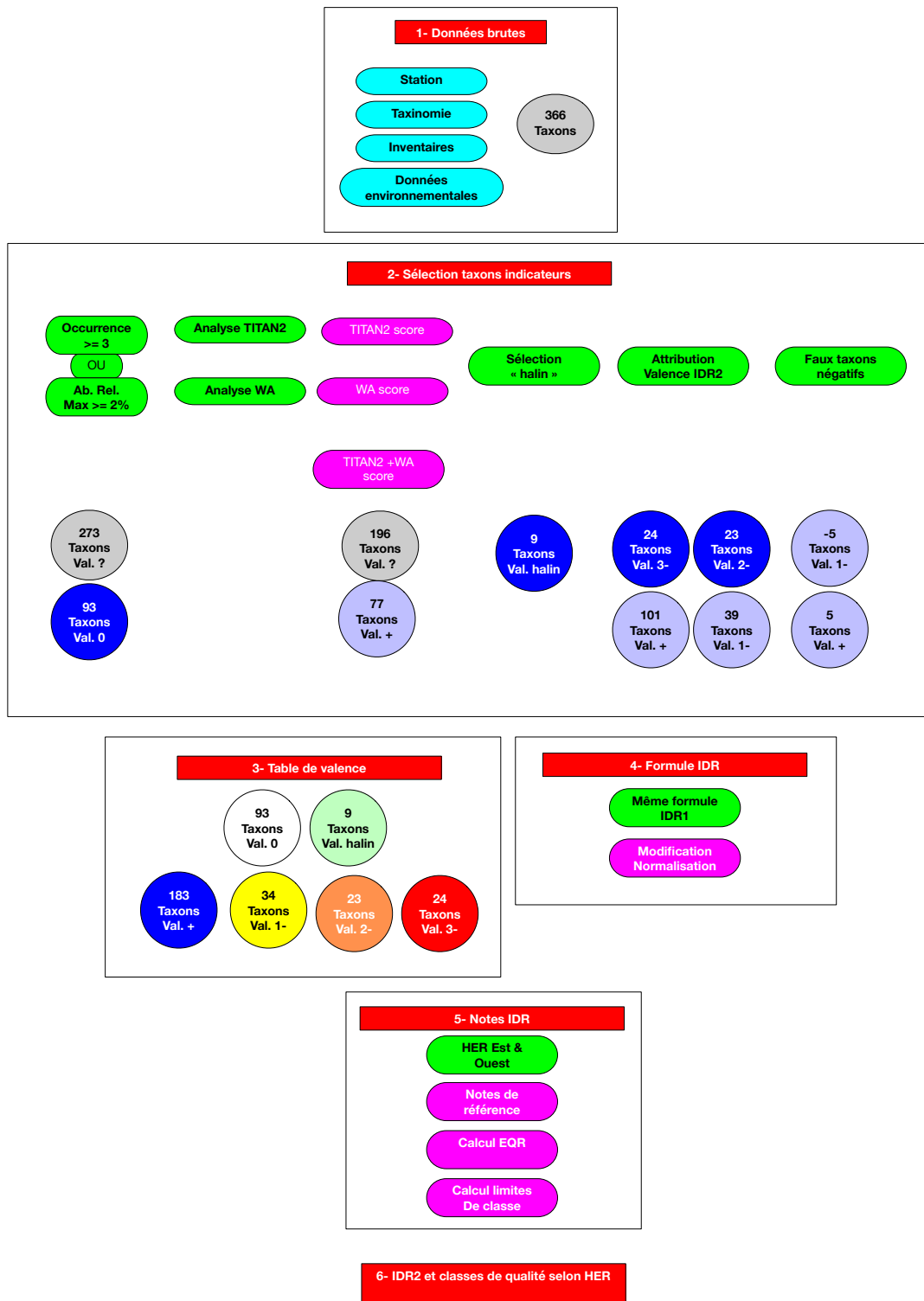


Figure 15 : Synthèse de l'élaboration de l'IDR nouvelle version

Les résultats obtenus par l'IDR2 restent très proches de ceux de la version originale. La prise en compte de beaucoup plus de taxons indiciels dans la nouvelle version permet d'avoir une assise indicielle plus conséquente qui permettra à l'avenir de limiter les relevés aboutissant à des calculs indiciels non représentatifs ou à représentativité altérée ; ceci, néanmoins, à condition que le protocole soit appliqué à la lettre, i.e. en évitant les stations subissant une trop forte influence marine, qui sortent du cadre d'application légitime de la méthode.

L'outil diagnostique construit à l'occasion de cette mise à jour de l'indice permet de rendre facilement accessibles des éléments d'interprétation supplémentaires à l'attention des gestionnaires.

# Bibliographie

- Beaver, J. (1981). *Apparent ecological characteristics of some common freshwater diatoms*. Ontario Ministry of the Environment, Don Mills. de Wolf 1982
- Birks, H.J.B., Line, J.M., Juggins, S., Stevenson, A.C., & ter Braak, C.J.F. (1990). Diatoms and pH reconstruction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B*, 327, 263–278.
- Boutry S., Gassiolo G., Coste M., Rosebery J. & Delmas F. (2014). *Note de travail : Evaluation de l'Etat Ecologique des cours d'eau de La Réunion à l'aide du compartiment diatomique sur la base de l'IDR\_V5 stabilisé*. Rapport IRSTEA, Asconit consultants. 37p.
- Carayon, D., Tison-Rosebery, J., Delmas F. (2019). Defining a new autoecological trait matrix for French stream benthic diatoms. *Ecological Indicators*, 103, pp.650-658.
- Cholnoky, B.J. (1968). *Die Ökologie der Diatomeen in Binnengewässern*. Cramer, Lehre, pp. 669.
- de Wolf, H. (1982). Method of coding of ecological data from diatoms for computer utilization. *Mededelingen Rijks Geologische Dienst* 36 : 95–98.
- De'ath, G. (2002). Multivariate regression trees: a new technique for modeling species–environment relationships. *Ecology* 83: 1105–1117.
- Denys, L. (1991). A checklist of the diatoms in the Holocene deposits of the western Belgian coastal plain with a survey of their apparent ecological requirements. I. Introduction, ecological code and complete list. *Professional Paper Belgische Geologische Dienst* 246, 1– 41.
- Denys, L. (2004). Relation of abundance–weighted averages of diatom indicator values to measured environmental conditions in standing freshwaters. *Ecological Indicators* 4 : 255– 275.
- Dufrêne, M. & Legendre, P. (1997). Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* 67 : 345–366.
- Eulin A., Gassiolo G., Lefrançois E., Delmas F., Coste M., Boutry S., Monnier O. (2018) *Guide méthodologique pour la mise en œuvre d'indices biologiques en outre-mer. L'indice diatomique Réunion – IDR*. Agence française pour la biodiversité, collection Guides et protocoles, 70 pages
- Hall, R.I. & Smol, J.P. (1992). A weighted–averaging regression and calibration model for inferring total phosphorus concentration from diatoms in British Columbia (Canada) lakes. *Freshwater Biology* 27 : 417–434.
- Hofmann, G. (1994). Aufwuchs–Diatomeen in Seen und ihre Eignung als Indikatoren der Trophie. *Bibliotheca Diatomologica* 30 : 1–241.
- Potapova, M.G., Charles, D.F., Ponader, K.C. & Winter, D.M. (2004). Quantifying species indicator values for trophic diatom indices: a comparison of approaches. *Hydrobiologia* 517 : 25–41.
- King, R.S. & Richardson, C.J. (2003). Integrating bioassessment and ecological risk assessment: an approach to developing numerical water–quality criteria. *Environmental Management*, 31, 795–809.
- Quian, S.S., King, R.S. & Richardson, C.J. (2003). Two methods for the detection of environmental thresholds. *Ecological Modelling*, 166, 87–97.

- Juggins, S. (2023). rioja: Analysis of Quaternary Science Data, R package version (1.0-6).
- Lowe, R.L. (1974). *Environmental Requirements and Pollution Tolerance of Freshwater Diatoms*. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, pp. 333.
- Pan, Y., Stevenson, R. J., Hill, B. H., Herlihy, A. T. & Collins, G. B. (1996). Using diatoms as indicators of ecological conditions in lotic systems: a regional assessment. *Journal of the North American Benthological Society* 15 : 481–495.
- R Core Team (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Salden, N. (1978). Beiträge zur Ökologie der Diatomeen (Bacillariophyceae) des Süßwassers. *Decheniana Beihefte* 22 : 1–238.
- Sládeček, V. (1986). Diatoms as indicators of organic pollution. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica* 14 : 555–566.
- ter Braak, C.J.F. & van Dam, H. (1989). Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods. *Hydrobiologia* 178 : 209–223.

# Annexes

1 – Table des valences IDR

2 – Résultats IDR de 2008 à 2022

3 – Diagrammes diagnostiques de 2008 à 2022