



**HAL**  
open science

## Note de présentation des indicateurs candidats pour la surveillance DCE des herbiers aux Antilles

Fanny Kerninon, Estelle Bergonzoli

► **To cite this version:**

Fanny Kerninon, Estelle Bergonzoli. Note de présentation des indicateurs candidats pour la surveillance DCE des herbiers aux Antilles. OFB; UBO. 2023. hal-04307867

**HAL Id: hal-04307867**

**<https://ofb.hal.science/hal-04307867v1>**

Submitted on 26 Nov 2023

**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 Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

# Note de présentation des indicateurs candidats pour la surveillance DCE des herbiers aux Antilles

Fanny Kerninon (Post-doctorante, Chargée du projet, Lemar-UBO)

Estelle Bergonzoli (Stagiaire de master 2, Lemar-UBO)

Septembre 2022, v2.

Note réalisée dans le cadre du contrat de coopération OFB-UBO (2020-2024) « validation et transfert des outils méthodologiques pour le suivi et l'évaluation des herbiers d'outre-mer développés dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau et de l'Initiative française pour les récifs coralliens ».

Correspondante UBO-Lemar : Fanny Kerninon ([fanny.kerninon@univ-brest.fr](mailto:fanny.kerninon@univ-brest.fr))

Correspondant OFB-Dras : Olivier Monnier ([olivier.monnier@ofb.gouv.fr](mailto:olivier.monnier@ofb.gouv.fr))

This work is licensed under CC BY-NC-ND 4.0



## 1. Éléments de contexte

C'est dans un cadre global de proposition d'outils harmonisés de suivi et d'évaluation de l'état des herbiers tropicaux français (action nationale herbiers mutualisée Ifrecor-DCE) que s'inscrit le développement de l'indicateur DCE « herbiers » pour les Antilles françaises mené par l'UBO (conventions UBO-OFB et UBO-MTECT). La démarche s'est appuyée sur la mobilisation en 2017 d'un groupe national thématique (atelier national herbiers, séminaire science-gestion en Martinique ; GTN herbiers Ifrecor-DCE, 2017) dont les objectifs concernant la DCE aux Antilles étaient notamment de faire le point sur les actions déjà mises en œuvre, d'ajuster le protocole de surveillance DCE et de valider la stratégie d'actions de la première phase de R&D (2017-2020) dédiée au pré-développement de l'indicateur DCE « herbiers ». Une seconde phase de R&D est actuellement en cours pour ajuster et valider l'indicateur (2020-2023) :

### Phase 1 : pré-développement de l'indicateur (2017-2020)

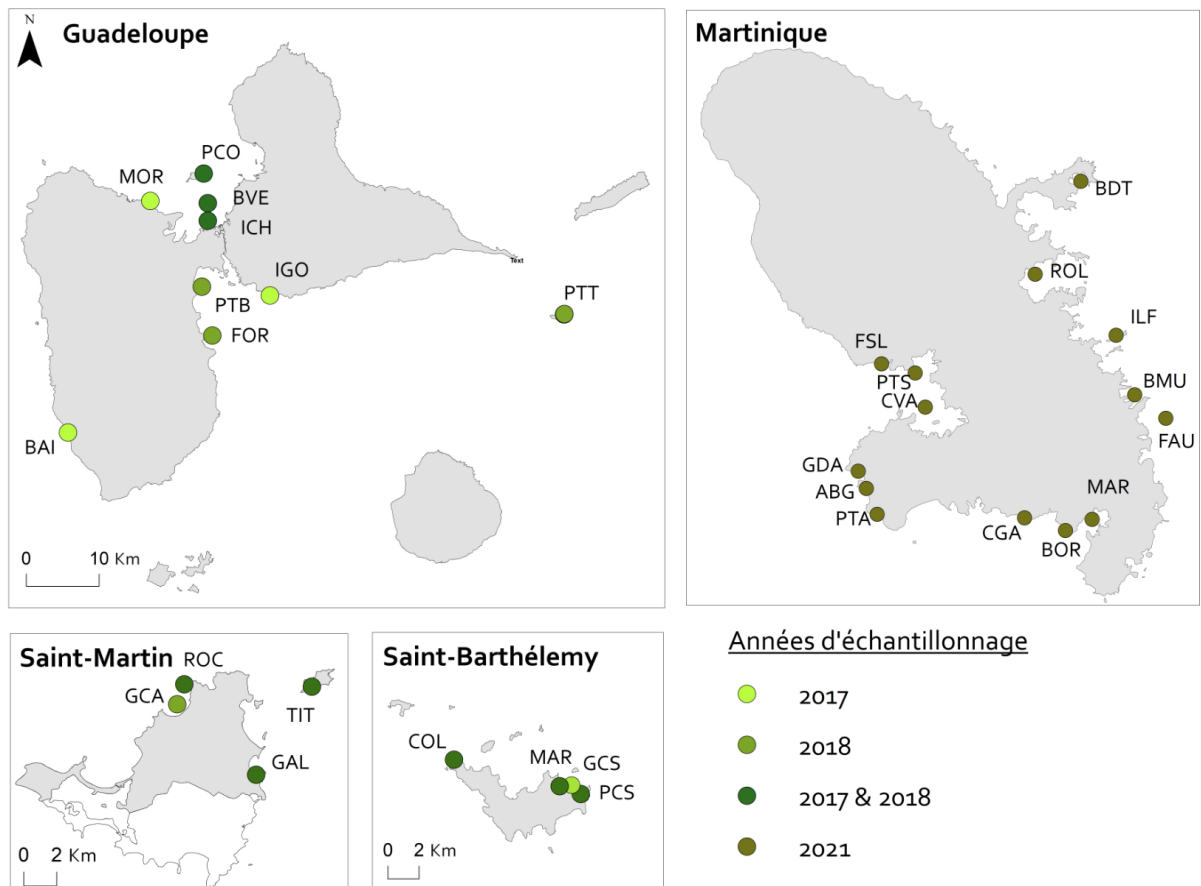
Du fait de l'évolution des protocoles de surveillance DCE en place dans les Antilles françaises au cours de ces dernières années, du positionnement des stations sous influence anthropiques modérées et de la nécessité d'évaluer la réponse de paramètres (ou métriques) d'intérêt (notamment ceux répondant spécifiquement aux dégradations de la qualité de l'eau), un jeu de données a été spécifiquement acquis dans le cadre d'expérimentations menées en conditions environnementales contrastées sur les territoires de Guadeloupe, Saint-Martin et de Saint-Barthélemy. Lors de cette première phase de R&D, la réponse d'une soixantaine de paramètres aux pressions anthropiques présumées, intégrant des informations sur la physiologie des phanérogames marines, des individus, des populations, des communautés associées et du sédiment a été étudiée à l'échelle des différents territoires pilotes en fin de saison sèche en 2017 et 2018. Les données collectées sur les 17 stations expérimentales (Figure 1, Tableau 1) ont permis d'apporter de nouvelles connaissances sur ces milieux, d'amorcer l'évaluation des relations pressions-état et de sélectionner les descripteurs les plus pertinents selon les principaux objectifs de gestion, notamment pour la DCE (Kerninon, 2020 ; Kerninon et al., 2021). Une première version d'un indicateur multimétriques intégré, adapté aux herbiers des Antilles françaises et aux échelles de temps de la gestion a été développé en 2020 (Kerninon, 2020). Basé principalement sur la phanérogame marine *Thalassia testudinum*, espèce native à forte capacité de bioindication, cet indicateur de complexité intermédiaire combine des paramètres d'alerte précoce et de diagnostic de la qualité de l'eau auxquels les herbiers sont sensibles (nutriments et certains métaux traces) ainsi que des paramètres de réponse à long terme (densité et recouvrement des phanérogames), reflétant leur intégrité structurelle.

### Phase 2 : adaptation, validation et transfert (2020-2023)

Une nouvelle campagne de terrain réalisée en fin de saison sèche en 2021 en Martinique a permis de compléter le jeu de données utilisé pour le développement de cette première version de l'indicateur par l'ajout de 14 stations expérimentales (Figure 1, Tableau 1). C'est ainsi sur un total de 39 séries d'acquisition de données, réparties sur 30 stations intégrant l'ensemble des territoires des Antilles françaises (Fig. 1) que cet indicateur de niveau de complexité intermédiaire développé durant la thèse (niveau 2, voir ci-après) a été une deuxième fois implémenté. Il s'accompagne de deux nouveaux modèles d'indicateurs (niveau 1 et niveau 3, voir ci-après). A ce stade de la phase de développement, ces modèles intègrent la totalité du jeu de données disponible afin de tester leur fonctionnement, de réaliser leur calibration et d'apporter les éléments nécessaires d'analyse critique concernant leur robustesse. Une première partie de celui – ci (stations profondes, herbiers dominés par *Halophila stipulacea*) sera retiré pour la calibration

de l'indicateur final et une autre pour la phase de test sur un jeu de données indépendant (une série temporelle des stations échantillonnées à deux reprises), étape méthodologique cadrant le développement des indicateurs DCE (OFB, MTES, 2020).

Une analyse des pressions anthropiques a été réalisée à l'échelle de l'ensemble des stations expérimentales. La principale difficulté de ce travail a été de faire face à l'absence de données homogènes sur ces pressions pour répondre aux besoins particuliers du développement de l'indicateur (ex : données physico-chimiques fines, localisées et à fréquence suffisante pour l'ensemble des stations de l'étude). C'est pourquoi un indice cumulatif des pressions anthropiques se basant une analyse des données spatiales de l'occupation du sol et des usages a été développé puis calculé de manière identique pour l'ensemble des stations (Tableau 1 ; Cariou, 2021 ; Kerninon et al. *in prep*). Une mise en corrélation des différents modèles d'indicateurs à cet indice de pressions a ensuite été réalisée (voir ci-après).



**Figure 1.** Localisation et années d'échantillonnage des stations expérimentales en Guadeloupe, Saint-Martin, Saint-Barthélemy et en Martinique.

**Tableau 1.** Caractérisation des stations échantillonnées. Les stations sont présentées selon le niveau de pressions anthropiques présumé tel que défini en amont de l'échantillonnage (bleu : faible, jaune : modéré, rouge : important). Le score de l'indice de pression a été réalisé à posteriori sur la base d'une analyse spatiale dans un rayon de 3 Km autour des stations.

Territoires	Nombre de stations	Nom et code des stations	Profondeur (m)	Année échantillonnage	Surveillance DCE	Score indice pression
Guadeloupe	8	Passé à colas (PCO)	3	2017-2018	X	1
		Petite Terre (PTT)	2	2018		1
		Bouée verte (BVE)	3	2017-2018		0
		Morne rouge (MOR)	2	2017		5
		Ilet Gosier (IGO)	1	2017		6
		Ilet Fortune (FOR)	2	2018	X	5
		Ilet Christophe (ICH)	2	2017-2018		4
		Petit Bourg (PTB)	1	2018		10
Martinique	14	Ilet du François (ILF)	1,5	2021		4
		Baie du Trésor (BDT)	1,3	2014	X	1,25
		Pointe Faula (FAU)	2,5	2021		6
		Caye à vache (CVA)	1	2021	X	8
		Grande anse d'Arlet (GDA)	5,3	2021	X	7,5
		Corps de Garde (CGA)	2,4	2021	X	8
		Petite anse d'Arlet (PTA)	5,2	2021		6,25
		Pointe de Borgnesse (PBO)	2,5	2021	X	8
		Baie des Mulets (BMU)	1,5	2021	X	8
		Anse du Bourg (ABG)	4,5	2021		8,75
		Pointe des Sables (PTS)	0,8	2021		13,75
		Fort Saint-Louis (FSL)	2,5	2021		15
		Baie du Marin (MRN)	0,7	2021		17,5
		Robert Lynch (ROL)	1	2021		19,25
Saint-Martin	4	Tintamarre (TIT)	2	2017-2018		1
		Rocher Créole (ROC)	6	2017-2018	X	7,5
		Grande Case (GCA)	4	2018		6,25
		Galion (GAL)	2	2017-2018		12
Saint- Barthélemy	4	Petit Cul-de-sac (PCS)	2	2017-2018		5
		Grand Cul-de-sac (GCS)	1	2017		5
		Colombier (COL)	9	2017-2018		2,5
		Marigot (MAR)	0,5	2017-2018		8

## 2. Etapes et méthodes de calcul de l'indicateur

### 2.1. Rappel des objectifs attendus

Un bioindicateur devant refléter l'état de santé d'un milieu en se basant sur les caractéristiques des communautés et rendre compte des causes responsables de son altération, l'objectif de l'indicateur « herbiers » développé pour la surveillance DCE aux Antilles est de résumer en une valeur normée des informations sur l'intégrité structurelle et le degré d'anthropisation de l'écosystème.

## 2.2. Sélection des paramètres

La réalisation d'analyses bibliographiques a permis de sélectionner les paramètres les plus pertinents à tester *in situ* pour étudier leurs réponses le long de gradients de pressions anthropiques présumés. Ces informations issues de la littérature, couplées aux données obtenues sur les sites d'expérimentation aux Antilles ont également permis d'écarter certains paramètres ne répondant pas aux objectifs et aux contraintes de robustesse attendues de l'outil pour une application dans la région (p. ex. données morphologique, faune benthique, données du sédiment). Les paramètres montrant des différences significatives entre les stations ont ensuite été intégrés dans une première série d'analyses en composantes principales (ACP) afin d'explorer leur comportement de manière continue. Sur la base de cette analyse, et pour limiter les redondances, un second ensemble de paramètres a été sélectionné, incluant les paramètres les plus corrélés aux facteurs anthropiques (résultant de l'interprétation de l'ACP et des connaissances sur les pressions). Certains paramètres structuraux associés à l'intégrité du système (densité et recouvrement), à réponse plus longue et généraliste, ont également été inclus à cette sélection pour la mise en œuvre d'une seconde ACP. Cette dernière permet de proposer une classification des stations à travers un score normé sur la base des critères retenus (ci-dessous).

## 2.3. Calcul du ratio de qualité écologique (EQR)

L'état écologique est ensuite calculé sur la base d'une ACP intégrant les paramètres retenus lors de l'étape de sélection des paramètres, incluant les stations d'études, complété par deux stations virtuelles (dénommées ici « *optimal* » et « *worst* »), représentatives des situations extrêmes. Elles sont obtenues par le calcul de la moyenne des cinq valeurs extrêmes pour chaque paramètre. Le score obtenu sur le premier axe de l'ACP est considéré comme une estimation de son statut écologique. Ainsi, l'*Ecological Quality Ratio* (EQR) a été calculé en deux étapes :

$$EQR'_x = (CI_x - CI_{worst}) / CI_{optimal} - CI_{worst}$$

$$EQR = (EQR' + 0,11) / (1 + 0,11)$$

$EQR'_x$  représente le ratio de qualité écologique du site,  $CI_x$  le score du site x sur la première composante de l'ACP,  $CI_{optimal}$  le score du site "*optimal*" (site de référence) pour la première composante et  $CI_{worst}$  le score du site "pire cas". La deuxième étape permet de rapporter l'EQR sur une échelle de 0 à 1 et selon cinq classes, tel qu'attendu dans le cadre de la DCE (Tableau 2). Deux modes de calcul de classe, de types basiques, sont ici testés.

**Tableau 2.** Limites quantitatives de l'*Ecological Quality Ratio* (EQR) selon deux types de classes fréquemment utilisées et codes couleurs associés.

EQR (classe1)	EQR (classe 2)	Etat écologique	Code couleur
0,775 - 1	0,80 - 1	très bon	bleu
0,550 - 0,774	0,6 - 0,79	bon	vert
0,325 - 0,549	0,4 - 0,59	moyen	jaune
0,1 - 0,324	0,2 - 0,39	médiocre	orange
0 - 0,1	0 - 0,19	mauvais	rouge

## 2.4. Synthèse des étapes de la construction des indicateurs

Les étapes de construction des indicateurs sont résumées sur la Figure 2.

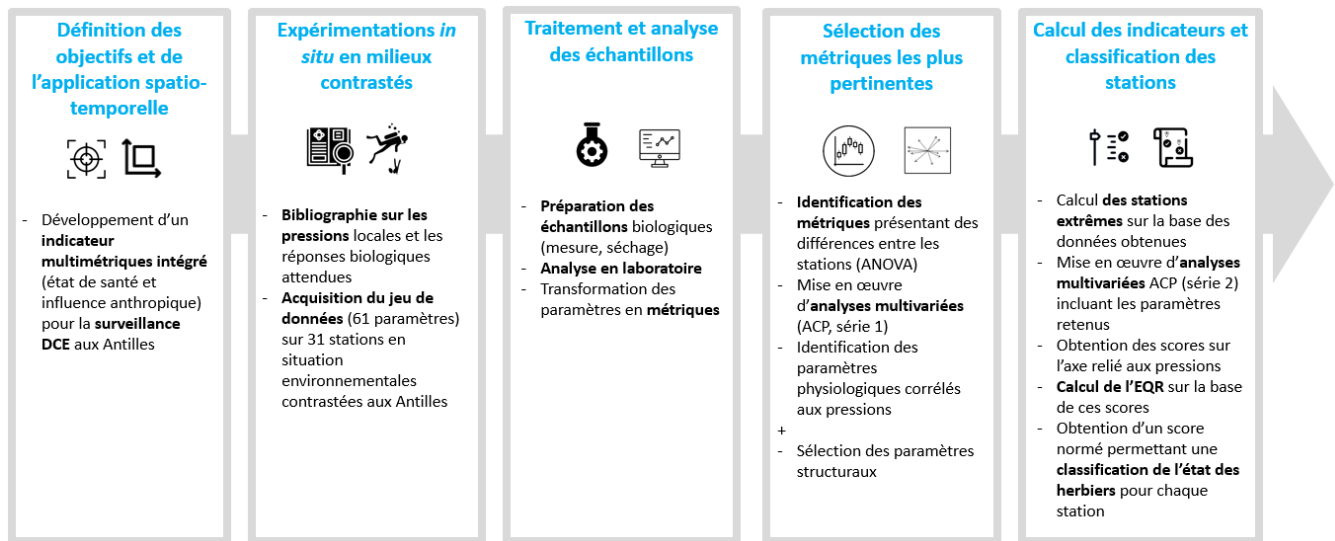


Figure 2. Synthèse de la stratégie mise en œuvre pour le développement de l'indicateur DCE herbiers en cinq grandes étapes.

## 3. Présentation des modèles d'indicateurs candidats pour la surveillance DCE des herbiers aux Antilles

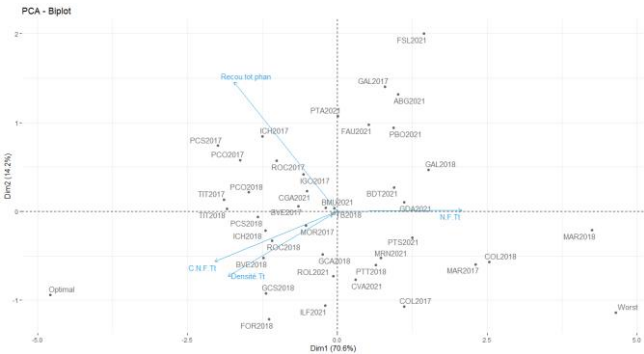
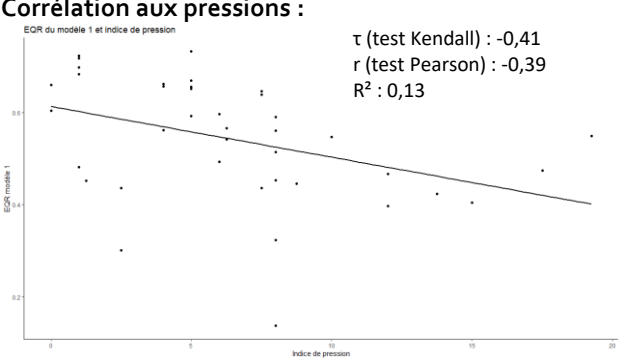
### 3.1. Présentation générale

Les trois modèles présentés ci-dessous sont adaptés aux herbiers peu profonds (inférieurs à 5-7 mètres) des Antilles françaises de types monospécifiques et mixtes à *Thalassia testudinum*, correspondant aux types d'herbiers natifs dominants sur lesquelles les stations de surveillance DCE sont actuellement positionnées. Ces modèles, plus ou moins complexes selon le nombre de paramètres intégrés, se basent tous sur une combinaison de paramètres de diagnostic et d'alerte précoce ciblant les pressions anthropiques, et de paramètres structuraux, reflets de l'intégrité structurelle du milieu. Ces données représentent des informations majeures pour la gestion de cet écosystème et de son environnement. Ce choix résulte de l'étape de sélection des paramètres les plus pertinents pour l'utilisation des herbiers des Antilles françaises comme bioindicateur de la qualité de l'eau (Kerninon, 2020 ; Kerninon et al., 2021 ; voir plus haut). Pour l'analyse des paramètres de diagnostic et indicateurs d'alerte, le compartiment des feuilles a été retenu.

Ces indicateurs ne se distinguent pas sur le temps de collecte sur le terrain, mais d'expertise d'analyse en laboratoire et de traitement des données.

L'objectif de présentation de ces différents modèles, de complexité variée selon le nombre de paramètres intégrés, est de définir collégialement un compromis acceptable entre la robustesse attendue concernant les objectifs de l'indicateur DCE, notamment en termes de réponse aux pressions anthropiques, tout en tenant compte des contraintes opérationnelles de mise en œuvre.

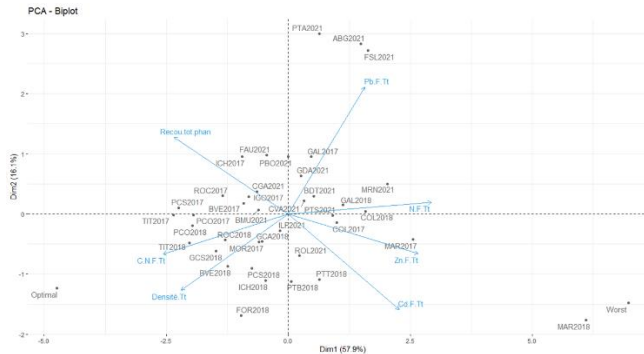
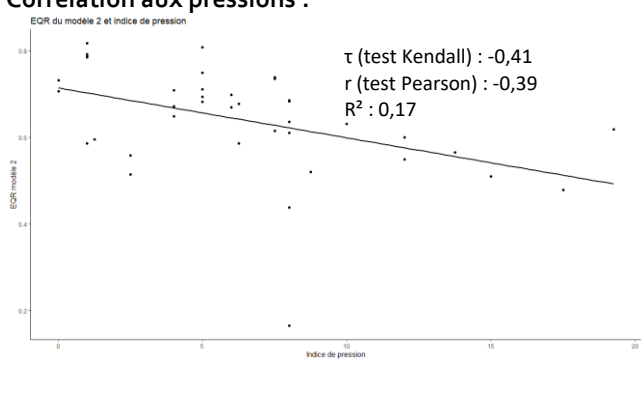
### 3.2. Modèle indicateur DCE herbiers Antilles de niveau 1 (v.1)

Indicateur herbiers DCE Antilles (niveau 1)																																																																																																																																																																																																								
<b>Nombre de jeu de données utilisé : 39 (30 stations, 3 années, 4 territoires)</b>																																																																																																																																																																																																								
<b>Nombre de paramètres : 4</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 paramètres structuraux : recouvrement total phanérogames et densité <i>T. testudinum</i></li> <li>- 2 paramètres d'alerte précoce et de diagnostic: N et C/N feuilles <i>T. testudinum</i></li> </ul>	<b>Objectif ciblé :</b> Evaluation intégrée de l'intégrité structurale des herbiers peu profonds monospécifiques et mixtes à <i>Thalassia testudinum</i> et du niveau d'enrichissement nutritif du milieu en azote																																																																																																																																																																																																							
<b>Nombre de plongeurs : 2 à 3</b> <b>Temps de collecte sur le terrain : 45'-1h30</b>																																																																																																																																																																																																								
<b>Classification des stations :</b> 	<b>Evaluation écologique :</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Station</th> <th>Score de l'axe EQR</th> <th>Etat écologique (classe 1)</th> <th>Etat écologique (classe 2)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>TIT2017</td><td>-1,1268018</td><td>0,72</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>TIT2018</td><td>-1,09600367</td><td>0,72</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PCO2017</td><td>-0,96663759</td><td>0,70</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PCO2018</td><td>-0,87824318</td><td>0,68</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PTT2018</td><td>0,3814277</td><td>0,48</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>BDT2021</td><td>0,56507195</td><td>0,45</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>FAU2021</td><td>0,30998199</td><td>0,49</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>ILF2021</td><td>-0,11802268</td><td>0,56</td><td>bon</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>BVE2017</td><td>-0,38511154</td><td>0,60</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>BVE2018</td><td>-0,73280986</td><td>0,66</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>MOR2017</td><td>-0,31186259</td><td>0,59</td><td>bon</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>FOR2018</td><td>-0,67929736</td><td>0,65</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>IGO2017</td><td>-0,33836069</td><td>0,60</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>ROC2017</td><td>-0,60307023</td><td>0,64</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>ROC2018</td><td>-0,64955024</td><td>0,65</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>GCA2018</td><td>-0,14604456</td><td>0,57</td><td>bon</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>COL2017</td><td>0,66096893</td><td>0,44</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>COL2018</td><td>1,50821947</td><td>0,30</td><td>médiocre</td><td>médiocre</td></tr> <tr><td>PCS2017</td><td>-1,18461931</td><td>0,73</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PCS2018</td><td>-0,78848565</td><td>0,67</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>GCS2018</td><td>-0,70764506</td><td>0,66</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>CVA2021</td><td>0,17989072</td><td>0,51</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>GDA2021</td><td>0,66078902</td><td>0,44</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>CGA2021</td><td>-0,30029381</td><td>0,59</td><td>bon</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>PBO2021</td><td>0,55870439</td><td>0,45</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>BMU2021</td><td>-0,1153518</td><td>0,56</td><td>bon</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>PTA2021</td><td>0,00367745</td><td>0,54</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>ABG2021</td><td>0,60176583</td><td>0,45</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>ICH2017</td><td>-0,74246418</td><td>0,66</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>ICH2018</td><td>-0,71181415</td><td>0,66</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PTB2018</td><td>-0,02975699</td><td>0,55</td><td>bon</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>GAL2017</td><td>0,47404854</td><td>0,47</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>GAL2018</td><td>0,90618927</td><td>0,40</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>MAR2017</td><td>1,36962976</td><td>0,32</td><td>médiocre</td><td>médiocre</td></tr> <tr><td>MAR2018</td><td>2,52624582</td><td>0,14</td><td>médiocre</td><td>mauvais</td></tr> <tr><td>MRN2021</td><td>0,43003386</td><td>0,47</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>ROL2021</td><td>-0,04140995</td><td>0,55</td><td>bon</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>PTS2021</td><td>0,74160564</td><td>0,42</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>FSL2021</td><td>0,85952802</td><td>0,40</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> </tbody> </table>	Station	Score de l'axe EQR	Etat écologique (classe 1)	Etat écologique (classe 2)	TIT2017	-1,1268018	0,72	bon	bon	TIT2018	-1,09600367	0,72	bon	bon	PCO2017	-0,96663759	0,70	bon	bon	PCO2018	-0,87824318	0,68	bon	bon	PTT2018	0,3814277	0,48	moyen	moyen	BDT2021	0,56507195	0,45	moyen	moyen	FAU2021	0,30998199	0,49	moyen	moyen	ILF2021	-0,11802268	0,56	bon	moyen	BVE2017	-0,38511154	0,60	bon	bon	BVE2018	-0,73280986	0,66	bon	bon	MOR2017	-0,31186259	0,59	bon	moyen	FOR2018	-0,67929736	0,65	bon	bon	IGO2017	-0,33836069	0,60	bon	bon	ROC2017	-0,60307023	0,64	bon	bon	ROC2018	-0,64955024	0,65	bon	bon	GCA2018	-0,14604456	0,57	bon	moyen	COL2017	0,66096893	0,44	moyen	moyen	COL2018	1,50821947	0,30	médiocre	médiocre	PCS2017	-1,18461931	0,73	bon	bon	PCS2018	-0,78848565	0,67	bon	bon	GCS2018	-0,70764506	0,66	bon	bon	CVA2021	0,17989072	0,51	moyen	moyen	GDA2021	0,66078902	0,44	moyen	moyen	CGA2021	-0,30029381	0,59	bon	moyen	PBO2021	0,55870439	0,45	moyen	moyen	BMU2021	-0,1153518	0,56	bon	moyen	PTA2021	0,00367745	0,54	moyen	moyen	ABG2021	0,60176583	0,45	moyen	moyen	ICH2017	-0,74246418	0,66	bon	bon	ICH2018	-0,71181415	0,66	bon	bon	PTB2018	-0,02975699	0,55	bon	moyen	GAL2017	0,47404854	0,47	moyen	moyen	GAL2018	0,90618927	0,40	moyen	moyen	MAR2017	1,36962976	0,32	médiocre	médiocre	MAR2018	2,52624582	0,14	médiocre	mauvais	MRN2021	0,43003386	0,47	moyen	moyen	ROL2021	-0,04140995	0,55	bon	moyen	PTS2021	0,74160564	0,42	moyen	moyen	FSL2021	0,85952802	0,40	moyen	moyen
Station	Score de l'axe EQR	Etat écologique (classe 1)	Etat écologique (classe 2)																																																																																																																																																																																																					
TIT2017	-1,1268018	0,72	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
TIT2018	-1,09600367	0,72	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
PCO2017	-0,96663759	0,70	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
PCO2018	-0,87824318	0,68	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
PTT2018	0,3814277	0,48	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
BDT2021	0,56507195	0,45	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
FAU2021	0,30998199	0,49	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
ILF2021	-0,11802268	0,56	bon	moyen																																																																																																																																																																																																				
BVE2017	-0,38511154	0,60	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
BVE2018	-0,73280986	0,66	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
MOR2017	-0,31186259	0,59	bon	moyen																																																																																																																																																																																																				
FOR2018	-0,67929736	0,65	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
IGO2017	-0,33836069	0,60	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
ROC2017	-0,60307023	0,64	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
ROC2018	-0,64955024	0,65	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
GCA2018	-0,14604456	0,57	bon	moyen																																																																																																																																																																																																				
COL2017	0,66096893	0,44	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
COL2018	1,50821947	0,30	médiocre	médiocre																																																																																																																																																																																																				
PCS2017	-1,18461931	0,73	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
PCS2018	-0,78848565	0,67	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
GCS2018	-0,70764506	0,66	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
CVA2021	0,17989072	0,51	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
GDA2021	0,66078902	0,44	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
CGA2021	-0,30029381	0,59	bon	moyen																																																																																																																																																																																																				
PBO2021	0,55870439	0,45	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
BMU2021	-0,1153518	0,56	bon	moyen																																																																																																																																																																																																				
PTA2021	0,00367745	0,54	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
ABG2021	0,60176583	0,45	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
ICH2017	-0,74246418	0,66	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
ICH2018	-0,71181415	0,66	bon	bon																																																																																																																																																																																																				
PTB2018	-0,02975699	0,55	bon	moyen																																																																																																																																																																																																				
GAL2017	0,47404854	0,47	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
GAL2018	0,90618927	0,40	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
MAR2017	1,36962976	0,32	médiocre	médiocre																																																																																																																																																																																																				
MAR2018	2,52624582	0,14	médiocre	mauvais																																																																																																																																																																																																				
MRN2021	0,43003386	0,47	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
ROL2021	-0,04140995	0,55	bon	moyen																																																																																																																																																																																																				
PTS2021	0,74160564	0,42	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
FSL2021	0,85952802	0,40	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																				
<b>Corrélation aux pressions :</b> 																																																																																																																																																																																																								
<b>Commentaires :</b> Cet indicateur multimétriques agrégeant 4 paramètres répond à un objectif d'évaluation de l'état structurel et du niveau d'enrichissement en azote dans un contexte de perturbations multiples. En intégrant uniquement la teneur en azote et le ratio carbone sur azote dans les feuilles au niveau des métriques d'alerte, ce modèle reste peu spécifique au regard des objectifs de la DCE. L'accumulation en azote dans les tissus pouvant résulter d'une origine naturelle comme anthropique, ces paramètres de diagnostic et d'alerte précoce sont donc insuffisamment précis pour identifier les causes de changement du milieu, tout comme les paramètres structuraux qui répondent sur un temps long et de manière non spécifique. Cet indicateur ne prend pas en compte la pollution métallique des eaux, caractéristique clé de l'état écologique des eaux côtières. Bien que la réponse de l'azote dans les phanérogames aux pressions anthropiques soit positive, la faible amplitude des teneurs en azote rend potentiellement l'indicateur insuffisamment discriminant. Cela pourrait contribuer à une surestimation de l'état de dégradation de certains herbiers se traduisant par la grande proportion de stations en situation « modérées » et l'absence de station en très bon état. Au niveau analytique, la détermination des concentrations en azote s'effectue directement sur des poudres brutes de feuilles de phanérogames nettoyées, séchées, broyées et encapsulées pour être passées au sein d'un analyseur élémentaire (EA). La biomasse nécessaire est faible (1 à 2 mg par échantillon). Cet indicateur multimétriques peut être couplé à l'utilisation de l'isotope de l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) dans les feuilles de <i>T. testudinum</i> pouvant apporter des indications sur l'origine des sources azotées (p.ex. au-delà d'un certain seuil estimé autour de 4‰). Cette analyse, plus onéreuse, peut se faire en même temps que l'analyse de l'azote si l'analyseur élémentaire est couplé un spectromètre de masse (EA-IRMS).																																																																																																																																																																																																								



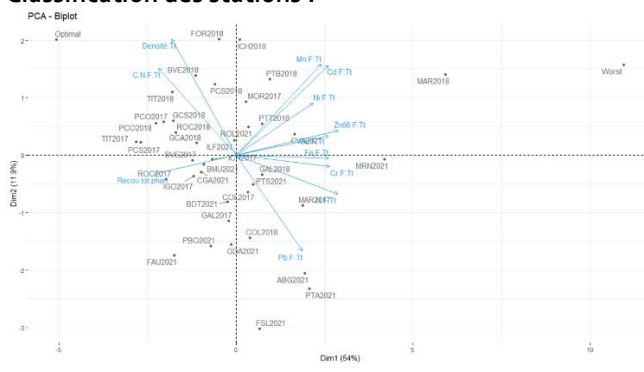
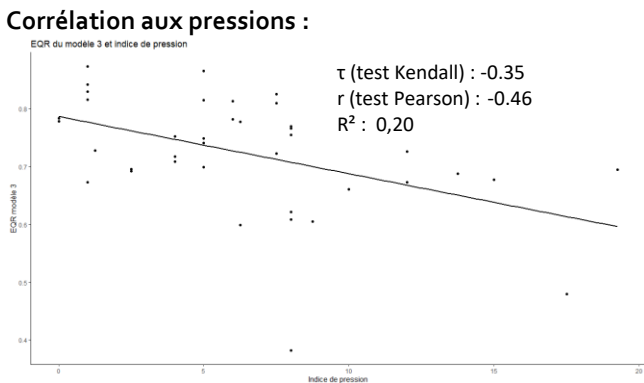
### 3.3. Modèle indicateur DCE herbiers Antilles de niveau 2 (v.1)

## Indicateur herbiers DCE Antilles (niveau 2)

<b>Nombre de jeu de données utilisé : 39 (30 stations, 3 années, 4 territoires)</b>																																																																																																																																																																																																									
<b>Nombre de paramètres : 7</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 paramètres structuraux : recouvrement total phanérogames et densité <i>T. testudinum</i></li> <li>- 5 paramètres d'alerte précoce et de diagnostic : N, C/N, Pb, Zn, Cd feuilles <i>T. testudinum</i></li> </ul> <b>Nombre de plongeurs : 2 à 3</b> <b>Temps de collecte sur le terrain : 45'-1h30</b>	<b>Objectif :</b> Evaluation intégrée de l'intégrité structurale des herbiers peu profonds monospécifiques et mixtes à <i>Thalassia testudinum</i> et du niveau d'anthropisation (enrichissement en azote et pollution en éléments traces)																																																																																																																																																																																																								
<b>Classification des stations :</b> 	<b>Evaluation écologique :</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 0.8em;"> <thead> <tr> <th>Station</th> <th>Score axe 1</th> <th>EQR</th> <th>Etat écologique (classe 1)</th> <th>Etat écologique (classe 2)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>TIT2017</td><td>-1,17</td><td>0,82</td><td>très bon</td><td>très bon</td></tr> <tr><td>TIT2018</td><td>-1,01</td><td>0,79</td><td>très bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PCO2017</td><td>-0,96</td><td>0,78</td><td>très bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PCO2018</td><td>-0,98</td><td>0,79</td><td>très bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PTT2018</td><td>0,32</td><td>0,59</td><td>bon</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>BDT2021</td><td>0,26</td><td>0,60</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>FAU2021</td><td>-0,22</td><td>0,67</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>ILF2021</td><td>-0,09</td><td>0,65</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>BVE2017</td><td>-0,45</td><td>0,71</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>BVE2018</td><td>-0,62</td><td>0,73</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>MOR2017</td><td>-0,30</td><td>0,68</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>FOR2018</td><td>-0,48</td><td>0,71</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>IGO2017</td><td>-0,40</td><td>0,70</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>ROC2017</td><td>-0,67</td><td>0,74</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>ROC2018</td><td>-0,64</td><td>0,73</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>GCA2018</td><td>-0,27</td><td>0,68</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>COL2017</td><td>0,50</td><td>0,56</td><td>bon</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>COL2018</td><td>0,78</td><td>0,51</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>PCS2017</td><td>-1,12</td><td>0,81</td><td>très bon</td><td>très bon</td></tr> <tr><td>PCS2018</td><td>-0,37</td><td>0,69</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>GCS2018</td><td>-0,73</td><td>0,75</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>CVA2021</td><td>0,16</td><td>0,61</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>GDA2021</td><td>0,13</td><td>0,62</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>CGA2021</td><td>-0,32</td><td>0,68</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PBO2021</td><td>0,00</td><td>0,64</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>BMU2021</td><td>-0,30</td><td>0,68</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PTA2021</td><td>0,32</td><td>0,59</td><td>bon</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>ABG2021</td><td>0,74</td><td>0,52</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>ICH2017</td><td>-0,47</td><td>0,71</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>ICH2018</td><td>-0,23</td><td>0,67</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PTB2018</td><td>0,03</td><td>0,63</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>GAL2017</td><td>0,23</td><td>0,60</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>GAL2018</td><td>0,56</td><td>0,55</td><td>bon</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>MAR2017</td><td>1,27</td><td>0,44</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>MAR2018</td><td>3,03</td><td>0,17</td><td>médiocre</td><td>mauvais</td></tr> <tr><td>MRN2021</td><td>1,01</td><td>0,48</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>ROL2021</td><td>0,11</td><td>0,62</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PTS2021</td><td>0,45</td><td>0,57</td><td>bon</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>FSL2021</td><td>0,81</td><td>0,51</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> </tbody> </table>	Station	Score axe 1	EQR	Etat écologique (classe 1)	Etat écologique (classe 2)	TIT2017	-1,17	0,82	très bon	très bon	TIT2018	-1,01	0,79	très bon	bon	PCO2017	-0,96	0,78	très bon	bon	PCO2018	-0,98	0,79	très bon	bon	PTT2018	0,32	0,59	bon	moyen	BDT2021	0,26	0,60	bon	bon	FAU2021	-0,22	0,67	bon	bon	ILF2021	-0,09	0,65	bon	bon	BVE2017	-0,45	0,71	bon	bon	BVE2018	-0,62	0,73	bon	bon	MOR2017	-0,30	0,68	bon	bon	FOR2018	-0,48	0,71	bon	bon	IGO2017	-0,40	0,70	bon	bon	ROC2017	-0,67	0,74	bon	bon	ROC2018	-0,64	0,73	bon	bon	GCA2018	-0,27	0,68	bon	bon	COL2017	0,50	0,56	bon	moyen	COL2018	0,78	0,51	moyen	moyen	PCS2017	-1,12	0,81	très bon	très bon	PCS2018	-0,37	0,69	bon	bon	GCS2018	-0,73	0,75	bon	bon	CVA2021	0,16	0,61	bon	bon	GDA2021	0,13	0,62	bon	bon	CGA2021	-0,32	0,68	bon	bon	PBO2021	0,00	0,64	bon	bon	BMU2021	-0,30	0,68	bon	bon	PTA2021	0,32	0,59	bon	moyen	ABG2021	0,74	0,52	moyen	moyen	ICH2017	-0,47	0,71	bon	bon	ICH2018	-0,23	0,67	bon	bon	PTB2018	0,03	0,63	bon	bon	GAL2017	0,23	0,60	bon	bon	GAL2018	0,56	0,55	bon	moyen	MAR2017	1,27	0,44	moyen	moyen	MAR2018	3,03	0,17	médiocre	mauvais	MRN2021	1,01	0,48	moyen	moyen	ROL2021	0,11	0,62	bon	bon	PTS2021	0,45	0,57	bon	moyen	FSL2021	0,81	0,51	moyen	moyen
Station	Score axe 1	EQR	Etat écologique (classe 1)	Etat écologique (classe 2)																																																																																																																																																																																																					
TIT2017	-1,17	0,82	très bon	très bon																																																																																																																																																																																																					
TIT2018	-1,01	0,79	très bon	bon																																																																																																																																																																																																					
PCO2017	-0,96	0,78	très bon	bon																																																																																																																																																																																																					
PCO2018	-0,98	0,79	très bon	bon																																																																																																																																																																																																					
PTT2018	0,32	0,59	bon	moyen																																																																																																																																																																																																					
BDT2021	0,26	0,60	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
FAU2021	-0,22	0,67	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
ILF2021	-0,09	0,65	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
BVE2017	-0,45	0,71	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
BVE2018	-0,62	0,73	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
MOR2017	-0,30	0,68	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
FOR2018	-0,48	0,71	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
IGO2017	-0,40	0,70	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
ROC2017	-0,67	0,74	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
ROC2018	-0,64	0,73	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
GCA2018	-0,27	0,68	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
COL2017	0,50	0,56	bon	moyen																																																																																																																																																																																																					
COL2018	0,78	0,51	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																					
PCS2017	-1,12	0,81	très bon	très bon																																																																																																																																																																																																					
PCS2018	-0,37	0,69	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
GCS2018	-0,73	0,75	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
CVA2021	0,16	0,61	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
GDA2021	0,13	0,62	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
CGA2021	-0,32	0,68	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
PBO2021	0,00	0,64	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
BMU2021	-0,30	0,68	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
PTA2021	0,32	0,59	bon	moyen																																																																																																																																																																																																					
ABG2021	0,74	0,52	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																					
ICH2017	-0,47	0,71	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
ICH2018	-0,23	0,67	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
PTB2018	0,03	0,63	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
GAL2017	0,23	0,60	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
GAL2018	0,56	0,55	bon	moyen																																																																																																																																																																																																					
MAR2017	1,27	0,44	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																					
MAR2018	3,03	0,17	médiocre	mauvais																																																																																																																																																																																																					
MRN2021	1,01	0,48	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																					
ROL2021	0,11	0,62	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
PTS2021	0,45	0,57	bon	moyen																																																																																																																																																																																																					
FSL2021	0,81	0,51	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																					
<b>Corrélation aux pressions :</b> 																																																																																																																																																																																																									
<b>Commentaires :</b> Cet indicateur multimétriques agrégeant 7 paramètres répond à un objectif d'évaluation de l'état structurel des herbiers, du niveau d'enrichissement en azote et de la pollution en éléments traces dans l'environnement par analyse dans les tissus de <i>T. testudinum</i> . Ce modèle, initialement présenté dans Kerninon, 2020 et Kerninon et al., 2021 représente un compromis intéressant par une approche intégrée en accord avec les objectifs de la DCE, permettant d'identifier les principales causes de changement du milieu. Par rapport au modèle de niveau 1, cet indicateur prend en compte la pollution métallique des eaux. Ces éléments permettent par ailleurs de discriminer davantage les stations entre elles. Au niveau analytique, la détermination des concentrations en azote s'effectue directement sur des poudres brutes de feuilles de phanérogames nettoyées, séchées, broyées et encapsulées pour être analysés au sein d'un analyseur élémentaire (EA). La biomasse nécessaire est faible (1 à 2 mg par échantillon). En revanche les analyses des éléments traces par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) nécessitent un broyage des échantillons dans des contenants en agate pour éviter les contaminations. La biomasse des échantillons, selon le mode d'attaque, est plus importante (pour les analyses réalisées ici : 100 à 200 mg). Comme pour le modèle 1, cet indicateur multimétriques peut être couplé à l'utilisation de l'isotope de l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) dans les feuilles de <i>T. testudinum</i> pouvant apporter des indications sur l'origine des sources azotées (p.ex. au-delà d'un certain seuil estimé autour de 4‰). Cette analyse, plus onéreuse, peut se faire en même temps que l'analyse de l'azote si l'analyseur élémentaire est couplé un spectromètre de masse (EA-IRMS).																																																																																																																																																																																																									

### 3.4. Modèle indicateur DCE herbiers Antilles de niveau 3 (v.1)

## Indicateur herbiers DCE Antilles (niveau 3)

<b>Nombre de jeu de données utilisé : 39 (30 stations, 3 années, 4 territoires)</b>																																																																																																																																																																																																									
<b>Nombre de paramètres : 12</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 paramètres structuraux : recouvrement total phanérogames et densité <i>T. testudinum</i></li> <li>- 10 paramètres d'alerte précoce et de diagnostic : N, C/N, Pb, Zn, Cd, Ni, Cu, Fe, Cr, Mn feuilles <i>T. testudinum</i></li> </ul>	<b>Objectif :</b> Evaluation intégrée de l'intégrité structurale des herbiers peu profonds monospécifiques et mixtes à <i>Thalassia testudinum</i> et du niveau d'anthropisation (enrichissement en azote et pollution en éléments traces)																																																																																																																																																																																																								
<b>Nombre de plongeurs : 2 à 3</b> <b>Temps de collecte sur le terrain : 45'-1h30</b>																																																																																																																																																																																																									
<b>Classification des stations :</b> 	<b>Evaluation écologique :</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 0.8em;"> <thead> <tr> <th>Station</th> <th>Score axe 1</th> <th>EQR</th> <th>Etat écologique (classe 1)</th> <th>Etat écologique (classe 2)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>TIT2017</td><td>-1,11</td><td>0,87</td><td>très bon</td><td>très bon</td></tr> <tr><td>TIT2018</td><td>-0,71</td><td>0,82</td><td>très bon</td><td>très bon</td></tr> <tr><td>PCO2017</td><td>-0,80</td><td>0,83</td><td>très bon</td><td>très bon</td></tr> <tr><td>PCO2018</td><td>-0,89</td><td>0,84</td><td>très bon</td><td>très bon</td></tr> <tr><td>PTT2018</td><td>0,29</td><td>0,67</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>BDT2021</td><td>-0,09</td><td>0,73</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>FAU2021</td><td>-0,69</td><td>0,81</td><td>très bon</td><td>très bon</td></tr> <tr><td>ILF2021</td><td>-0,02</td><td>0,72</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>BVE2017</td><td>-0,48</td><td>0,78</td><td>très bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>BVE2018</td><td>-0,45</td><td>0,78</td><td>très bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>MOR2017</td><td>0,11</td><td>0,70</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>FOR2018</td><td>-0,19</td><td>0,74</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>IGO2017</td><td>-0,47</td><td>0,78</td><td>très bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>ROC2017</td><td>-0,78</td><td>0,83</td><td>très bon</td><td>très bon</td></tr> <tr><td>ROC2018</td><td>-0,67</td><td>0,81</td><td>très bon</td><td>très bon</td></tr> <tr><td>GCA2018</td><td>-0,44</td><td>0,78</td><td>très bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>COL2017</td><td>0,13</td><td>0,70</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>COL2018</td><td>0,15</td><td>0,69</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PCS2017</td><td>-1,06</td><td>0,87</td><td>très bon</td><td>très bon</td></tr> <tr><td>PCS2018</td><td>-0,24</td><td>0,75</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>GCS2018</td><td>-0,70</td><td>0,81</td><td>très bon</td><td>très bon</td></tr> <tr><td>CVA2021</td><td>0,65</td><td>0,62</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>GDA2021</td><td>-0,06</td><td>0,72</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>CGA2021</td><td>-0,39</td><td>0,77</td><td>très bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PBO2021</td><td>-0,28</td><td>0,75</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>BMU2021</td><td>-0,36</td><td>0,77</td><td>très bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PTA2021</td><td>0,81</td><td>0,60</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>ABG2021</td><td>0,76</td><td>0,61</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>ICH2017</td><td>-0,27</td><td>0,75</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>ICH2018</td><td>0,04</td><td>0,71</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PTB2018</td><td>0,38</td><td>0,66</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>GAL2017</td><td>-0,08</td><td>0,73</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>GAL2018</td><td>0,29</td><td>0,67</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>MAR2017</td><td>0,74</td><td>0,61</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>MAR2018</td><td>2,33</td><td>0,38</td><td>moyen</td><td>médiocre</td></tr> <tr><td>MRN2021</td><td>1,65</td><td>0,48</td><td>moyen</td><td>moyen</td></tr> <tr><td>ROL2021</td><td>0,14</td><td>0,69</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>PTS2021</td><td>0,18</td><td>0,69</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> <tr><td>FSL2021</td><td>0,26</td><td>0,68</td><td>bon</td><td>bon</td></tr> </tbody> </table>	Station	Score axe 1	EQR	Etat écologique (classe 1)	Etat écologique (classe 2)	TIT2017	-1,11	0,87	très bon	très bon	TIT2018	-0,71	0,82	très bon	très bon	PCO2017	-0,80	0,83	très bon	très bon	PCO2018	-0,89	0,84	très bon	très bon	PTT2018	0,29	0,67	bon	bon	BDT2021	-0,09	0,73	bon	bon	FAU2021	-0,69	0,81	très bon	très bon	ILF2021	-0,02	0,72	bon	bon	BVE2017	-0,48	0,78	très bon	bon	BVE2018	-0,45	0,78	très bon	bon	MOR2017	0,11	0,70	bon	bon	FOR2018	-0,19	0,74	bon	bon	IGO2017	-0,47	0,78	très bon	bon	ROC2017	-0,78	0,83	très bon	très bon	ROC2018	-0,67	0,81	très bon	très bon	GCA2018	-0,44	0,78	très bon	bon	COL2017	0,13	0,70	bon	bon	COL2018	0,15	0,69	bon	bon	PCS2017	-1,06	0,87	très bon	très bon	PCS2018	-0,24	0,75	bon	bon	GCS2018	-0,70	0,81	très bon	très bon	CVA2021	0,65	0,62	bon	bon	GDA2021	-0,06	0,72	bon	bon	CGA2021	-0,39	0,77	très bon	bon	PBO2021	-0,28	0,75	bon	bon	BMU2021	-0,36	0,77	très bon	bon	PTA2021	0,81	0,60	bon	bon	ABG2021	0,76	0,61	bon	bon	ICH2017	-0,27	0,75	bon	bon	ICH2018	0,04	0,71	bon	bon	PTB2018	0,38	0,66	bon	bon	GAL2017	-0,08	0,73	bon	bon	GAL2018	0,29	0,67	bon	bon	MAR2017	0,74	0,61	bon	bon	MAR2018	2,33	0,38	moyen	médiocre	MRN2021	1,65	0,48	moyen	moyen	ROL2021	0,14	0,69	bon	bon	PTS2021	0,18	0,69	bon	bon	FSL2021	0,26	0,68	bon	bon
Station	Score axe 1	EQR	Etat écologique (classe 1)	Etat écologique (classe 2)																																																																																																																																																																																																					
TIT2017	-1,11	0,87	très bon	très bon																																																																																																																																																																																																					
TIT2018	-0,71	0,82	très bon	très bon																																																																																																																																																																																																					
PCO2017	-0,80	0,83	très bon	très bon																																																																																																																																																																																																					
PCO2018	-0,89	0,84	très bon	très bon																																																																																																																																																																																																					
PTT2018	0,29	0,67	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
BDT2021	-0,09	0,73	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
FAU2021	-0,69	0,81	très bon	très bon																																																																																																																																																																																																					
ILF2021	-0,02	0,72	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
BVE2017	-0,48	0,78	très bon	bon																																																																																																																																																																																																					
BVE2018	-0,45	0,78	très bon	bon																																																																																																																																																																																																					
MOR2017	0,11	0,70	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
FOR2018	-0,19	0,74	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
IGO2017	-0,47	0,78	très bon	bon																																																																																																																																																																																																					
ROC2017	-0,78	0,83	très bon	très bon																																																																																																																																																																																																					
ROC2018	-0,67	0,81	très bon	très bon																																																																																																																																																																																																					
GCA2018	-0,44	0,78	très bon	bon																																																																																																																																																																																																					
COL2017	0,13	0,70	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
COL2018	0,15	0,69	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
PCS2017	-1,06	0,87	très bon	très bon																																																																																																																																																																																																					
PCS2018	-0,24	0,75	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
GCS2018	-0,70	0,81	très bon	très bon																																																																																																																																																																																																					
CVA2021	0,65	0,62	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
GDA2021	-0,06	0,72	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
CGA2021	-0,39	0,77	très bon	bon																																																																																																																																																																																																					
PBO2021	-0,28	0,75	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
BMU2021	-0,36	0,77	très bon	bon																																																																																																																																																																																																					
PTA2021	0,81	0,60	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
ABG2021	0,76	0,61	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
ICH2017	-0,27	0,75	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
ICH2018	0,04	0,71	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
PTB2018	0,38	0,66	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
GAL2017	-0,08	0,73	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
GAL2018	0,29	0,67	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
MAR2017	0,74	0,61	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
MAR2018	2,33	0,38	moyen	médiocre																																																																																																																																																																																																					
MRN2021	1,65	0,48	moyen	moyen																																																																																																																																																																																																					
ROL2021	0,14	0,69	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
PTS2021	0,18	0,69	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
FSL2021	0,26	0,68	bon	bon																																																																																																																																																																																																					
<b>Corrélation aux pressions :</b> 																																																																																																																																																																																																									
<b>Commentaires :</b> Cet indicateur multimétriques agrégeant 12 paramètres répond à un objectif d'évaluation de l'état structural des herbiers, du niveau d'enrichissement en azote et de la pollution en éléments traces dans l'environnement par leur analyse dans les tissus de <i>T. testudinum</i> . Ce modèle est le plus complet et reflète davantage l'état et les causes de changement du milieu en accord avec les objectifs de la DCE. Par rapport au modèle de niveau 1, cet indicateur prend en compte la pollution métallique des eaux et intègre plus de métaux que celui de niveau 2. Les différentes influences anthropiques du milieu sont davantage reflétées. Cependant, ce modèle est peu discriminant (majorité de stations en très bon et bon état) en raison probablement de concentrations élevées de certains métaux sur quelques séries de données. Au niveau analytique, la détermination des concentrations en azote s'effectue directement sur des poudres brutes de feuilles de phanérogames nettoyées, séchées, broyées et encapsulées pour être analysées au sein d'un analyseur élémentaire (EA). La biomasse nécessaire est faible (1 à 2 mg par échantillon). En revanche les analyses des éléments traces par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) nécessitent un broyage des échantillons dans des contenants en agate pour éviter les contaminations. La biomasse des échantillons, selon le mode d'attaque, est plus importante (pour les analyses réalisées ici : 100 à 200 mg). Comme pour le modèle 1, cet indicateur multimétriques peut être couplé à l'utilisation de l'isotope de l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) dans les feuilles de <i>T. testudinum</i> pouvant apporter des indications sur l'origine des sources azotées (p.ex. au-delà d'un certain seuil situé autour de 4‰). Cette analyse, plus onéreuse, peut se faire en même temps que l'analyse de l'azote si l'analyseur élémentaire est couplé un spectromètre de masse (EA-IRMS).																																																																																																																																																																																																									

## 4. Conclusion et perspectives

La proposition de différents modèles d'indicateurs multimétriques candidats pour la surveillance DCE des herbiers aux Antilles a pour objectif d'aider au choix du modèle final en se basant à la fois sur un compromis acceptable entre la robustesse attendue de l'outil (objectif de l'évaluation, réponse aux pressions anthropiques), tout en tenant compte des contraintes opérationnelles de mise en œuvre.

Les modèles proposés présentent un temps de terrain équivalent mais se distinguent sur le nombre de métriques d'alerte précoce et de diagnostic intégrés. Le modèle n°2 présente un compromis intéressant, de type intermédiaire, avec un nombre de métriques raisonnable. Néanmoins, puisque l'ensemble des éléments traces sont obtenus dans une même analyse (par ICP-MS), une alternative pourrait être d'intégrer à l'indicateur uniquement les trois métaux retenus pour ce modèle mais de maintenir l'acquisition des autres métaux. L'analyse de l'isotope de l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) dans les feuilles de *T. testudinum*, pouvant se faire en même temps que l'analyse de l'azote (par EA-IRMS), elle permettrait d'apporter des indications sur l'origine des sources azotées au-delà d'un certain seuil. Ces informations seraient intéressantes en guise de veille ou dans le cadre de la mise en œuvre de suivis de contrôle opérationnel (RCO). Puisque les pressions anthropiques sont évaluées principalement sur la base de données d'occupation de sols et non de données de qualité de l'eau fines, nous ne pouvons pas nous attendre à une corrélation avec l'EQR totalement réaliste. En ce sens, les premières corrélations réalisées sont tout de même satisfaisante.

Afin de prendre en compte les conclusions des résultats de ces travaux de R&D en cours dans les actions de surveillance, des préconisations méthodologiques ont été établies lors des rencontres DCE Outre-mer 2022 afin d'ajuster les protocoles de collecte dans l'attente de la validation et de la traduction réglementaire de l'indicateur. L'importance de la compatibilité des données et du respect de procédure méthodologique de collecte *in situ* et analytique a été soulignée. Les analyses des paramètres d'alerte précoce et de diagnostic nécessitent en effet un cadre analytique rigoureux pour assurer la robustesse des données, ce qui sera par ailleurs particulièrement essentiel pour réaliser les ajustements nécessaires au mode de calcul de l'EQR au cours du temps. Ces analyses devront donc être réalisées par des laboratoires agréés, selon des méthodes normées. Des réflexions sur choix d'un laboratoire d'analyse ou la réalisation d'une étude d'intercalibration entre laboratoires seront ainsi à mener afin d'assurer la qualité des données de surveillance.

Enfin, le choix de la saison d'échantillonnage de la surveillance DCE pourrait être rediscutée du fait que les paramètres de diagnostics ciblés sont probablement moins présents en fin de saison sèche qu'en fin de saison humide.

Une fois que le choix des métriques intégrant l'indicateur et son mode de calcul seront finalisés, la démarche scientifique sera validée par la publication de l'indicateur dans une revue de rang A.

La mise en œuvre opérationnelle nécessitera un travail d'automatisation du calcul de l'indicateur avant son intégration dans le Système d'évaluation de l'état des eaux (SEEE). La traduction réglementaire s'accompagnera ensuite de la réalisation du guide méthodologique associé et de formations.

Considérant l'évolution de la composition spécifique des herbiers à l'échelle de la Caraïbe, le développement d'indicateurs basés sur les espèces *Syringodium filiforme* et *Halophila stipulacea* sont en cours de réflexion sur la base des données déjà acquises.

## 5. Références

Cariou, C., 2021. Développement d'indices de pressions anthropiques pour la caractérisation environnementale des eaux côtières ultramarines dans le cadre de la validation d'indicateurs écologiques « Herbiers ». Stage de master 1, Sciences de la Mer et du Littoral, mention Gestion de l'environnement, Université de Bretagne Occidentale, Institut Universitaire Européen de la Mer.

GTN Herbiers Ifrecor-DCE, 2017. Compte – rendu de l'atelier national « Herbiers » IFRECOR-DCE. Séminaire Science-gestion, 6, 7 & 10 avril 2017, Schœlcher, Martinique. Rapport UBO, 26 pages + annexes.

Kerninon, F., 2020. Développement d'outils méthodologiques pour le suivi et l'évaluation de l'état de santé des herbiers d'outre-mer français et de leur environnement, dans un contexte de perturbations multiples. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 387 pages + annexes.

Kerninon, F., Payri, C., Le Loc'h, F., Alcoverro, T., Maréchal, J.-P., Julien, C., Gréaux, S., Mège, S., Anthanase, J., Cordonnier, S., Rouget, M.-L., Lorre, E., Uboldi, T., Monnier, O., Hellio, C. 2021. Selection of parameters for seagrass management: Towards the development of integrated indicators for French Antilles. *Marine Pollution Bulletin*. 170, 112646. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112646>

Kerninon et al., *in prep.* Development of an integrated indicator based on *Thalassia testudinum* for the evaluation of French Antilles seagrass beds status and water quality.

OFB, MTES, 2020. Note technique. Validation des méthodes de bioindication DCE dans les DOM, 3 pages.