

RECONSTRUCTION DE L'OUVRAGE D'ART DE NOUVILLE

Nouvel ouvrage de franchissement

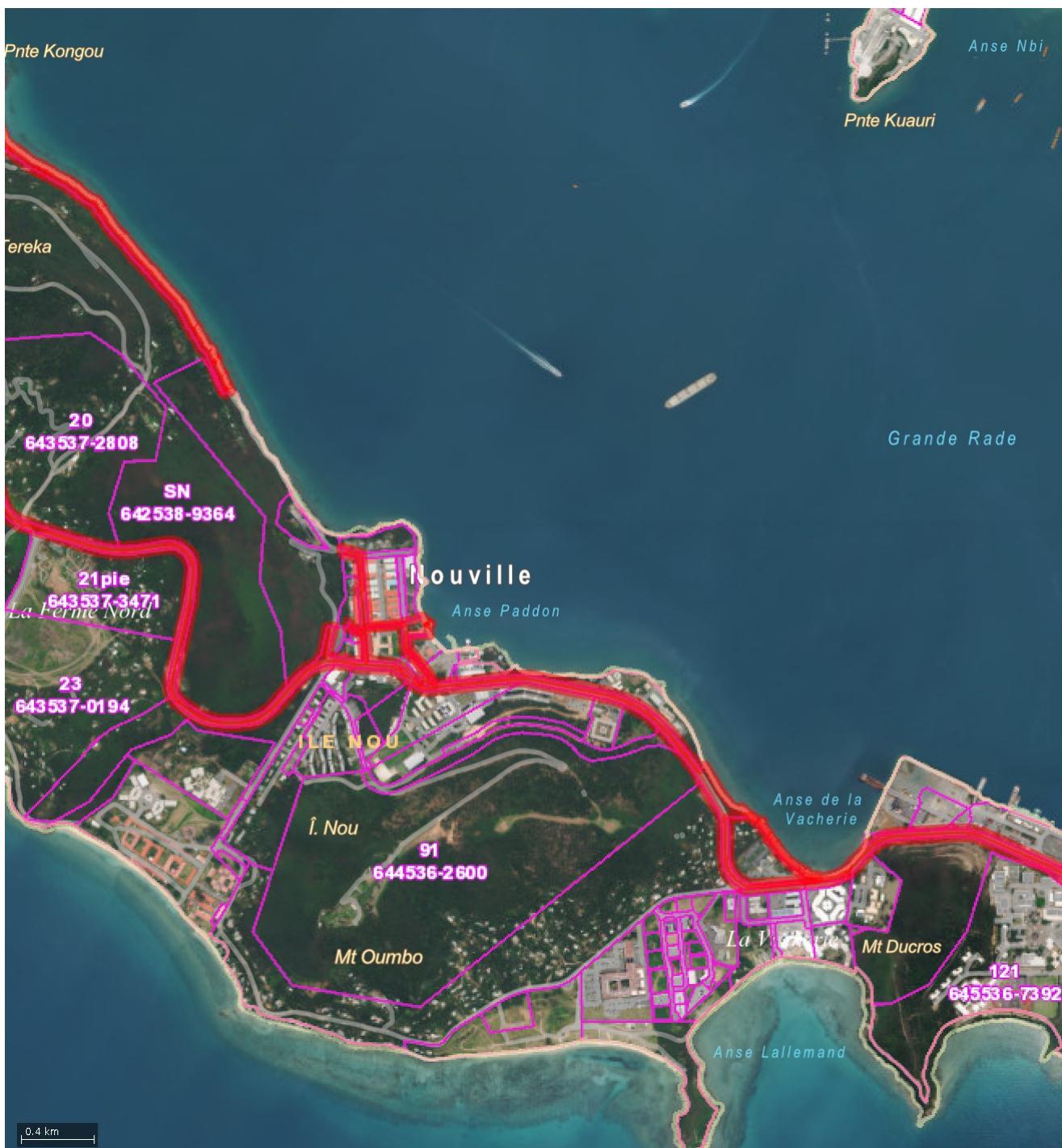
ANNEXES DE L'ÉTUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

AFF 3715 - MARS 2025

1 ANNEXE 1 : FICHES CADASTRALES



Extrait de Plan Cadastral



Commune	:	NOUMEA
Section	:	ILE NOU
Lotissement	:	
Numéro de Lot	:	SN
Numéro d'Inventaire Cadastral	:	0000-000743
Surface	:	17 HA 93 A 0 CA

Echelle : 1/18100 approx.
Date d'édition : 19/06/2024



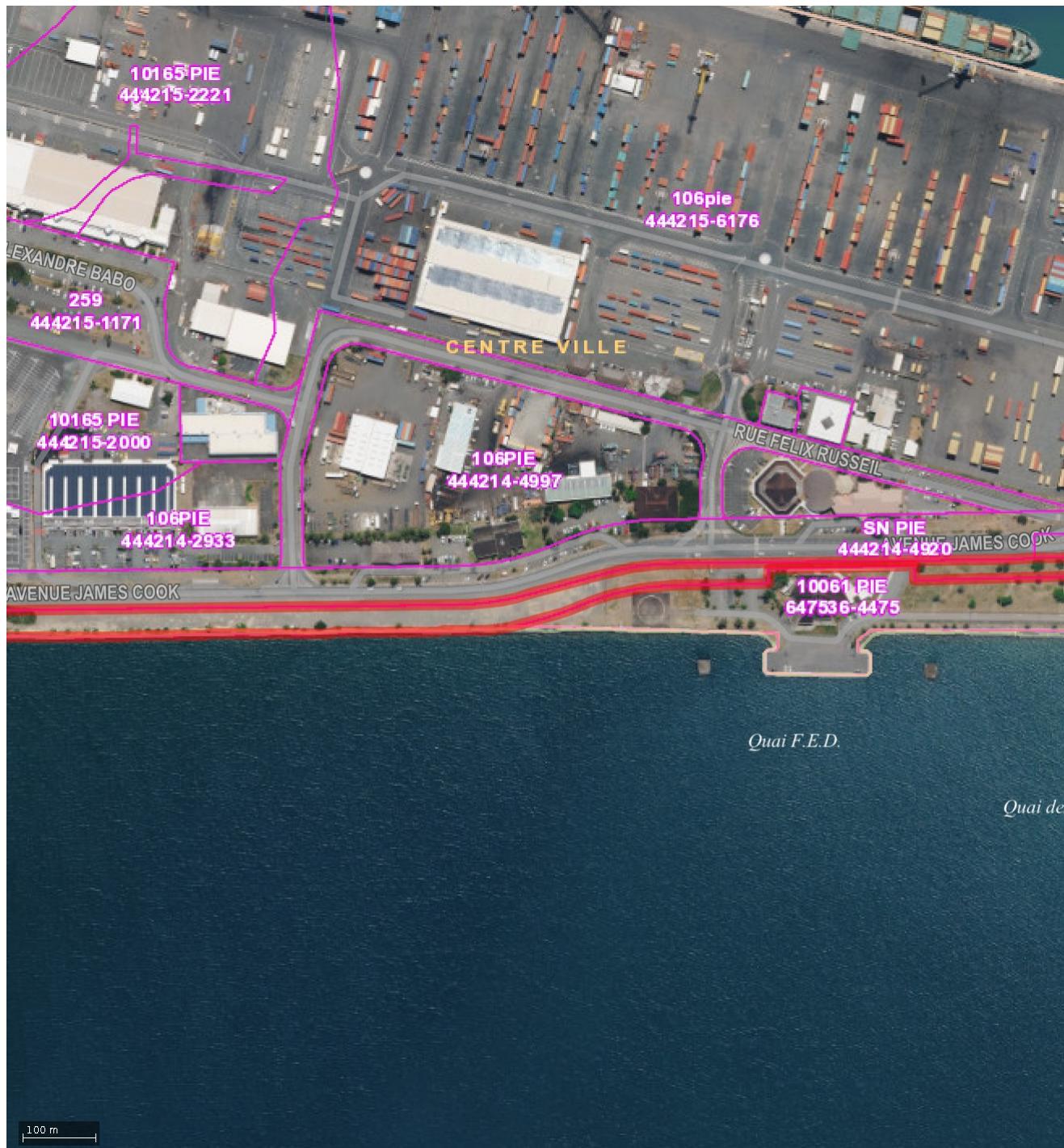
Extrait de Plan Cadastral



Commune	:	NOUMEA	Echelle	:	1/2300 approx.
Section	:	CENTRE VILLE	Date d'édition	:	19/06/2024
Lotissement	:				
Numéro de Lot	:	SN PIE			
Numéro d'Inventaire Cadastral	:	444214-4920			
Surface	:	2 HA 67 A 7 CA			



Extrait de Plan Cadastral



Commune	:	NOUMEA	Echelle	:	1/4500 approx.
Section	:	CENTRE VILLE	Date d'édition	:	19/06/2024
Lotissement	:				
Numéro de Lot	:	408			
Numéro d'Inventaire Cadastral	:	444214-5828			
Surface	:	2 HA 1 A 0 CA			



Extrait de Plan Cadastral



Commune	:	NOUMEA	Echelle	:	1/1100 approx.
Section	:	CENTRE VILLE	Date d'édition	:	19/06/2024
Lotissement	:				
Numéro de Lot	:	259			
Numéro d'Inventaire Cadastral	:	444215-1171			
Surface	:	2 HA 4 A 28 CA			



Extrait de Plan Cadastral



Commune	:	NOUMEA	Echelle	:	1/4500 approx.
Section	:	ILE NOU	Date d'édition	:	19/06/2024
Lotissement	:	LOTS SANS NUMERO			
Numéro de Lot	:	SN			
Numéro d'Inventaire Cadastral	:	645536-6511			
Surface	:	13 HA 85 A 0 CA			



Extrait de Plan Cadastral



Commune	:	NOUMEA	Echelle	:	1/4500 approx.
Section	:	ILE NOU	Date d'édition	:	19/06/2024
Lotissement	:				
Numéro de Lot	:	41			
Numéro d'Inventaire Cadastral	:	646536-7101			
Surface	:	5 HA 57 A 0 CA			

2 ANNEXE 2 : CR COPIL DU 23/01/2024

Compte rendu COPIL

OPÉRATION DE RECONSTRUCTION DU PONT DE NOUVILLE – études préliminaires

Date : 23 janvier 2024

Lieu : Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie

Société	Prénom Nom	Rôle	Contact	Présent	Diffusion
Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie	Gilbert TYUIENON	Membre et porte-parole du gouvernement en charge des secteurs du transport et de la mobilité, de la prévention routière, de l'aménagement et des infrastructures publiques	Gilbert.tyuienon@gouv.nc	X	X
	Yoann LECOURIEUX	Membre du gouvernement en charge des politiques du développement, de l'aménagement et de la cohésion du territoire, de la mise en œuvre des contrats de développement et du suivi des grands projets	Yoann.lecourieux@gouv.nc	X	X
	Brenda WANABO	Collaboratrice du cabinet de Gilbert TYUIENON	Brenda.wanabo@gouv.nc	X	X
	Ericka MICHEL	Collaboratrice du cabinet de Yoann LECOURIEUX	Ericka.michel@gouv.nc	X	X
DITTT Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports Terrestres	Karim OUNI	Directeur de la DITTT	karim.ouni@gouv.nc	X	X
	Sébastien ROGER	Chef de service	sebastien.roger@gouv.nc	X	X
	Patrice PEDRINI	Chef bureau ingénierie routière et ouvrage d'art	patrice.pedrini@gouv.nc		X
	Valérie MORUETA	Chargé d'opérations	valerie.morueta@gouv.nc		X
	Francis MALUIA	Chargé d'opérations	francis.maluia@gouv.nc	X	X
	Florent FRANCHETTE	Chargé de mission	florent.franchette@gouv.nc	X	X

Cluster Maritime	Philippe DARRASON	Président du cluster Directeur général de la SODEMO	president@clustermaritime.nc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Mélanie HUITRIC	Manager en charge de l'animation du cluster	mnc@clustermaritime.nc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ville de Nouméa	Jean-Baptiste GUÉNÉGAN	Directeur de l'urbanisme	Jean-baptiste.guenegan@ville-noumea.nc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Louis GAUTHE	Directeur des services techniques	Louis.gauthe@ville-noumea.nc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SMTU	Thomas LECOQ	Chef du service d'exploitation	thomas.lecoq@smtu.nc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Eric GILLARDO	Gestion du Patrimoine	eric.gillardo@smtu.nc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SECAL	Christophe ARCHAMBAULT	Directeur général	Christophe.archambault@secal.nc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Delphine BALLOIS	Cheffe de projets	Delphine.ballois@secal.nc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Raphaëlle BOUCHITTE	Cheffe de projets	Raphaelle.bouchitte@secal.nc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
GEMOCE	Julien DAUBERCIES	Gérant	jdaubercies@gemoce.nc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Yoann SALINAS	Ingénieur	ysalinas@gemoce.nc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ÉTAT	Natacha DIALLO	Service ingénierie	natacha.diallo@aviation-civile.gouv.fr		<input checked="" type="checkbox"/>
PROVINCE SUD	Cédric PELOSATO	Directeur adjoint de la Direction de l'Aménagement, de l'Equipement et des Moyens	cedric.pelosato@province-sud.nc		<input checked="" type="checkbox"/>
PANC	Brice KIENER	Directeur	bkiener@noumeaport.nc		<input checked="" type="checkbox"/>

ORDRE DU JOUR

Dans le cadre de l'opération **n°I-8 portant sur les études et aménagement de l'entrée de Nouville, inscrites au contrat de développement 2017-2023 Etat/Nouvelle-Calédonie**, le COPIL a réuni les différentes parties-prenantes pour échanger sur les études préliminaires liées à la **reconstruction du pont de Nouville**.

L'objectif était de :

- valider le tracé en biais du nouvel ouvrage d'art côté petite rade ainsi que le traitement des intersections
- présenter les études préliminaires et le projet global.
- Valider le profil en travers de l'ouvrage dans une vision à moyen long terme.

RELEVÉ DES ÉCHANGES

Le COPIL de présentation des études préliminaires intervient post-COTECH qui s'est tenu le 1^{er} décembre 2023. Ainsi, lors de ce comité, l'ouvrage d'art le projet a été présenté le projet sous tous les aspects afin que l'ensemble des parties prenantes adhèrent au projet.

La présentation s'est articulée en ce sens :

1 - Contexte général :

- Contexte
- Enjeux et objectifs
- Planning
- Foncier impacté

2 - Présentation des arbitrages du COTECH (EP) :

- Tracés
- Traitement intersection
- Profils en travers

3 - Conclusion

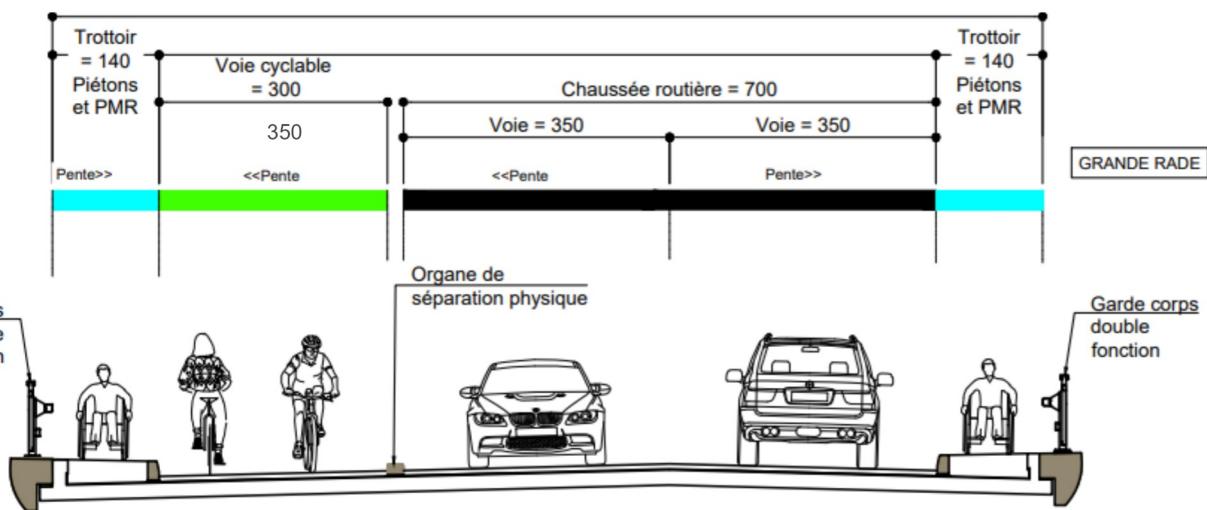
- Analyse multicritère
- Présentation des solutions à étudier en AVP
- Poursuite de l'étude

- **Arbitrage :**

La durée de vie de l'ouvrage est de 100 ans, ainsi l'évolution du secteur de Nouville et les projets envisagés sont à prendre en compte pour la construction du nouveau pont.

En parallèle, la phase 1 du schéma de desserte de Nouville a alimenté les études préliminaires et inversement. Les deux maîtrises d'œuvre se rejoignent sur l'ouvrage projeté.

Sur la base des deux profils en travers, les élus s'accordent sur le choix n°2 permettant un ouvrage mutable pouvant accueillir 3 voies de 3 mètres 50 chacune :



La mutation de la voie cyclable en voie réservée aux transports en commun implique un travail de continuité de voie en amont et aval de l'ouvrage.(TCSP)

Au stade EP, le montant des travaux est estimé à 560 M.CFP (Ouvrage plus large + charges d'exploitations plus importantes + aménagement paysagé + VRD).

Les élus informent que les arbitrages budgétaires auront lieu en septembre/octobre 2024. Ainsi l'objectif est d'avoir un projet abouti au stade DCE (dossier de consultation des entreprises) à cette période.

Le SMTU indique une augmentation significative de la fréquentation des 2 lignes N6 (+80%) et N3 (+30%). L'attente des utilisateurs porte sur une augmentation de la fréquence des bus et les ralentissements supportés par les bus lors de leurs dessertes au niveau des arrêts sous dimensionnés.

Le SMTU annonce que le Créalis (bus néobus d'une capacité de 100 voyageurs) va être mis en service sur le secteur de Nouville. Le SMTU communiquera les dimensions de ce dernier.

De même, ce dernier prévoit l'ouverture du transport en commun en site propre (TCSP) aux vélos.

La ville de Nouméa souhaite que le traitement du carrefour rue Alexandre Babo et l'avenue James Cook, notamment les girations (épures) soient affinées.

La prise en compte de ce profil en travers nécessite de faire une projection en tenant compte des girations du bus au niveau du projet de giratoire. Il n'apparaît pas nécessaire de réfléchir à un passage central à l'instant T.

Le giratoire sera dimensionné pour être aussi mutable mais seule l'emprise sera dans un premier temps réservée.

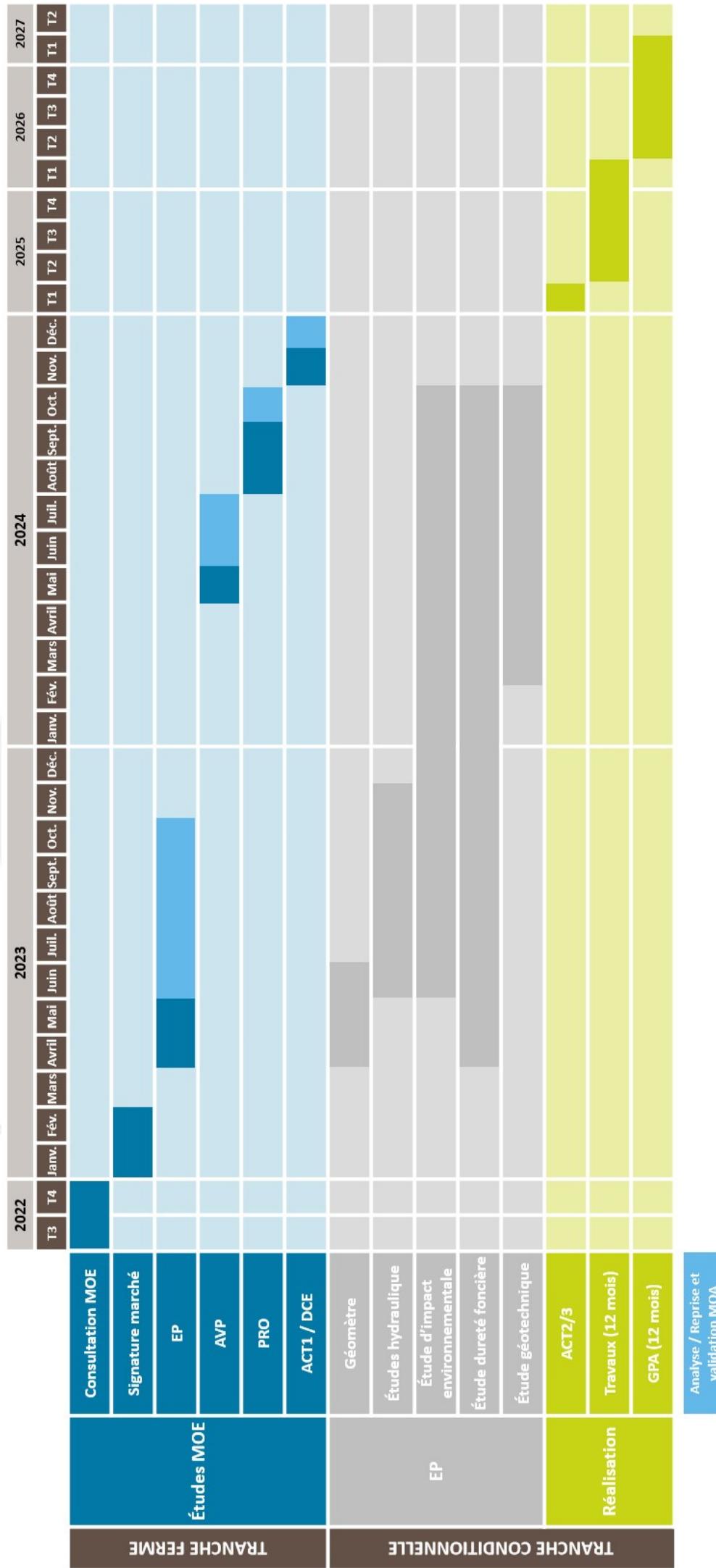
Bien qu'un impact sur la butte au niveau du pénitencier soit nécessaire, la ville de Nouméa précise que, malgré le classement en zone naturelle protégée au PUD, l'intérêt général prime et que le projet sera soutenu.

Il est porté à la connaissance des membres du COPIL que la déconstruction ouvrage d'art a été inscrite au contrat de développement et est estimée entre 150 MF et 200 MF.

CONCLUSIONS

- Les études AVP seront axées sur un ouvrage en biais, mutable en 3 voies avec un giratoire pouvant évoluer à terme.
- Dans un premier temps, l'OA accueillera une voie cyclable qui dans un second temps pourra muter en voie réservée aux bus.
- Les études sur la déconstruction de l'ouvrage existant sont à engager.

PLANNING À JOUR



3 ANNEXE 3 : RAPPORT GÉOTECHNIQUE AVRIL 2024

Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA

Mission géotechnique de conception - Phase Avant-projet (G2 AVP)



AF23-0806/G/G
CD24-0262
Indice : 01

17 Avril 2024

SAS A2EP GEOTEC - tél (687) 26 30 00
724 336 RCS NOUMEA
Lot n°25, route de la Quarantaine – ZIZA – 98 890 PAITA
BP 727 98 860 KONE
www.a2ep.nc

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 2 sur 37	

Client	SECAL
Titre du document	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA
Sous-titre du document	Mission géotechnique de conception - Phase Avant-projet (G2 AVP)
Numéro de l'affaire	AF23-0806/G/G
Numéro de document	CD24-0262
Indice	Indice : 01
Date de mise à disposition du rapport	17 Avril 2024
Chargée d'affaire : Clio DESORMEAUX/Georges NDJOUNTCHE NJIKI	
Relecteur : Franck MERCIER	

Indice	Date	Version	Rédacteur	Vérificateur
00	29/03/2024	1 ^{ère} émission	CDE/NNG	FME
01	17/04/2024	Prise en compte observations MOE	CDE/NNG	CDE

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 3 sur 37	

Table des matières

1 AVANT-PROPOS	6
1.1 MISSION DU BUREAU D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUES	6
1.2 DOCUMENTS REMIS ET HYPOTHESES.....	6
1.2.1 <i>L'OUVRAGE EXISTANT</i>	7
1.2.2 <i>TRACE ENVISAGE</i>	7
1.3 TEXTES DE RÉFÉRENCES – DOCUMENTS NORMATIFS	9
2 CONTEXTE DU SITE ET CONTENU DE LA RECONNAISSANCE	11
2.1 SITUATION - TOPOGRAPHIE	11
2.2 CONTENU DE LA RECONNAISSANCE.....	12
2.3 IMPLANTATION ET NIVELLEMENT DES SONDAGES	13
3 CADRE GEOLOGIQUE – RESULTATS DE LA RECONNAISSANCE.....	14
3.1 CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	14
3.2 NATURE ET CARACTERISTIQUES DES SOLS	14
3.2.1 <i>AU DROIT DE L'OUVRAGE D'ART (SONDAGES SP1 ET SP2/SC2)</i>	14
3.2.2 <i>AU DROIT DES VOIRIES D'ACCES (SONDAGES EP1/EP2 ET PU1)</i>	15
3.3 ESSAIS EN LABORATOIRE	16
3.4 RISQUES NATURELS ET ANTHROPIQUES	17
3.5 ESSAIS DE DEFLEXION	17
3.6 HYDROGEOLOGIE	17
3.7 DEFINITION DU MODELE GEOTECHNIQUE DU SITE.....	18
3.7.1 <i>DEFINITION DE LA ZONE D'INFLUENCE GEOTECHNIQUE</i>	18
3.7.2 <i>AU DROIT DE L'OUVRAGE D'ART</i>	18
3.7.3 <i>AU DROIT DES VOIRIES D'ACCES</i>	19

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 4 sur 37	

4 TERRASSEMENTS	21
4.1 RAPPEL DU CONTEXTE DE L'ETUDE	21
4.2 CONTEXTE DU SITE	22
4.3 TRAFICABILITE EN PHASE TRAVAUX	22
4.4 EXTRACTION.....	22
4.5 MISE EN ŒUVRE DES REMBLAIS – CULEE EST	23
4.5.1 <i>SUJETIONS D'EXECUTION</i>	23
4.5.2 <i>VERIFICATION DU PONÇONNEMENT DU REMBLAI</i>	24
4.5.3 <i>ESTIMATION DES TASSEMENTS SOUS POIDS DES REMBLAIS</i>	24
4.5.4 <i>PHASAGE DES TRAVAUX DE PRECHARGEMENT</i>	25
4.5.5 <i>SUIVI ET CONTROLE</i>	25
4.6 STABILITE DES TALUS ET DES AVOISINANTS	25
4.7 SUJETIONS D'EXECUTION	26
4.8 MISE HORS D'EAU	26
5 ETUDE DES OUVRAGES GÉOTECHNIQUES.....	27
5.1 RAPPEL DU CONTEXTE.....	27
5.2 SOLUTIONS DE FONDATION ENVISAGEABLES	27
5.3 FONDATION DE L'OUVRAGE PAR PIEUX FORÉS ANCRÉS DANS LE SUBSTRATUM ALTÉRÉ H2 (NF P 94-262)	28
5.3.1 <i>CHOIX DE LA METHODE DE CALCUL</i>	28
5.3.2 <i>HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT DES PIEUX VIS-A-VIS DES SOLlicitations VERTICALES</i>	29
5.3.3 <i>EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT VERTICAL DES PIEUX</i>	30
5.3.4 <i>HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT DES PIEUX VIS-A-VIS DES SOLlicitations HORIZONTALES</i>	31
5.4 PIEUX IMPLANTÉS EN CRÈTE DE TALUS	32
5.5 PRISE EN COMPTE DE LA PROXIMITÉ DE LA SURFACE DU SOL	33
5.6 FROTTEMENTS NEGATIFS	33
5.7 DEPLACEMENTS HORIZONTAUX INDUITS PAR LES REMBLAIS.....	34

 A2EP GEOTEC	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 5 sur 37

5.8	EFFET DE GROUPE	34
5.9	TASSEMENTS	34
5.10	SUJETIONS D'EXECUTION	34
5.11	CONTROLES	35
5.12	PRECAUTIONS VIS-A-VIS DES EXISTANTS	35
6	DIMENSIONNEMENT DE LA VOIRIE	36
6.1	CHAUSSEE NEUVE - VOIRIE ACCES EST	36
6.2	REFORCEMENT DES VOIRIES EXISTANTES	36
6.3	voie VERTE	36
7	RECOMMANDATIONS POUR LES MISSIONS SUIVANTES	37

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 6 sur 37	

1 AVANT-PROPOS

La présente mission a été effectuée par la Société **A2EP GEOTEC** – Lot n°25, route de la Quarantaine – ZIZA – 98890 PAITA Cedex à la demande et pour le compte de la **SECAL** – 40, rue Félix Trombe - KOUTIO – DUMBEA.

Notre mission concerne l'étude de sol relative au projet de construction d'un nouveau pont permettant de desservir la presqu'île de Nouville, sur la commune de NOUMEA, suite à la dégradation de l'actuel ouvrage par le choc accidentel d'un bateau en 2020 (plusieurs désordres constatés sur le pont à la suite de l'incident).

1.1 MISSION DU BUREAU D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUES

Par référence à la classification des Missions Géotechniques (norme NF P 94-500 de novembre 2013), la présente mission constitue une **étude géotechnique de conception phase avant-projet (mission G2 AVP)**, et voit de ce fait l'étendue de sa mission limitée aux prestations correspondantes :

- Enquête documentaire sur le cadre géotechnique du site,
- Présentation des résultats des investigations géotechniques (plan d'implantation, coupes géologiques, rapports de sondages, niveaux d'eau),
- Synthèse et zonage des ensembles géotechniques de la zone d'investigation selon leurs caractéristiques géologiques et mécaniques,
- Définition des hypothèses géotechniques à prendre en compte pour le dimensionnement des ouvrages,
- Principes de construction envisageables et ébauche dimensionnelle,
- Dispositions constructives relatives aux terrassements nécessaires pour la réalisation des travaux,
- Identification des incertitudes et aléas géologiques résiduels.

Les conditions générales et l'enchaînement des missions géotechniques selon la norme NF P 94-500 sont disponibles en annexe.

Il est rappelé que la mission géotechnique de conception phase avant-projet (G2-AVP) doit être complétée par des missions phase Projet (G2 PRO) et G2 DCE/ACT puis par des missions d'étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) et de supervision géotechnique d'exécution (G4) afin de limiter les aléas géotechniques qui peuvent apparaître en cours d'exécution ou après réception des ouvrages.

1.2 DOCUMENTS REMIS ET HYPOTHESES

Remarque : Toutes les abréviations utilisées dans ce rapport sont conformes à la norme XP 94-010 hormis les suivantes :

- *Rd* : Résistance dynamique apparente (formule des Hollandais),
- *TA et TN* : Terrain Actuel et Terrain Naturel,
- *TF* : Terrain Fini.

Pour la réalisation de cette étude, les éléments suivants nous ont été transmis :

- [1] Avis de consultation ;
- [2] Règlement de consultation ;
- [3] Cahier des charges de la consultation pour l'étude géotechnique – Annexe 1 spécifications techniques ;
- [4] Plan d'implantation prévisionnel des sondages au format dwg ;
- [5] Relevé topographique et bathymétrique de la zone d'étude au format dwg ;
- [6] Rendu d'étude d'impact hydraulique SEACOAST ;

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 7 sur 37	

[7] Rapport d'étude préliminaire pour la construction du nouvel ouvrage de Nouville indC – Sept. 2023.

1.2.1 L'OUVRAGE EXISTANT

L'ouvrage existant est un pont à une travée situé sur l'avenue James Cook et permettant de desservir la presqu'île de Nouville. Ce dernier marque l'entrée du quartier de Nouville et appartient au gouvernement de la Nouvelle-Calédonie.

Le développement du quartier de Nouville, ainsi que la dégradation de l'ouvrage suite à un choc accidentel en 2020, motive la volonté de construire un nouveau pont au voisinage de l'ouvrage actuel. Ce projet répondrait en prime au besoin de rendre plus sécuritaire cette section pour les automobilistes ainsi que les usagers des modes de transport doux (piétons, cyclistes).



Figure 1 : Photographie du pont actuel depuis la grande rade

1.2.2 TRACÉ ENVISAGÉ

Au stade actuel, 2 types de tracé et 2 types de carrefour sont envisagés. Les options proposées pour le nouvel ouvrage et ses voiries d'accès (en plan) sont présentées sur les figures ci-après.



Figure 2 : Implantation envisagée pour le nouvel ouvrage et tracé routier (extrait [7]) – sans échelle – Tracé 1 + giratoire



Figure 3 : Implantation envisagée pour le nouvel ouvrage et tracé routier (extrait [7]) – sans échelle – Tracé 1 + carrefour en T



Figure 4 : Implantation envisagée pour le nouvel ouvrage et tracé routier (extrait [7]) – sans échelle – Tracé 2 + giratoire

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 9 sur 37



Figure 5 : Implantation envisagée pour le nouvel ouvrage et tracé routier (extrait [7]) – sans échelle – Tracé 2 + carrefour en T

Sur la base du plan topographique disponible (réf. [4]), la construction du nouvel ouvrage impliquera des mouvements de terre estimés à ce stade à :

- Environ 3 à 4 m en remblais côté culée Est : TA autour de +2,5 m NGNC pour une voirie au rétablissement avec l'Avenue James Cook autour de +6,0 m NGNC ;
- Profil rasant ou légèrement en déblai ($\leq 1,0$ m) côté culée Ouest : TA autour de +7,5 m NGNC pour une voirie au rétablissement avec l'Avenue James Cook autour de +7,0 m NGNC.

Ces hypothèses pourront être affinées en phase Projet une fois les plans d'ouvrage et de remblais d'accès disponibles.

La durée d'utilisation de l'ouvrage est de 100 ans.

Les descentes de charge ne sont pas connues à ce stade du projet.

Les charges devront être calculées avec précision par le BET structures et transmises à A2EP-GEOTEC si elles diffèrent de celles prises par hypothèse.

Concernant le dimensionnement des voiries, les hypothèses générales transmises par le MOE sont les suivantes :

- Durée de chaussée égale à 20 ans,
- Trafic : 210 PL/j/sens (classe de trafic T2),
- Accroissement arithmétique du trafic de 10%.

1.3 TEXTES DE RÉFÉRENCES – DOCUMENTS NORMATIFS

Le référentiel retenu par le MOA dans le cadre de la présente étude est l'EC7 et notamment :

- NF EN 1997-1 : Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales ;
- NF EN 1997-2 : Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 2 : Reconnaissances des terrains et essais ;
- NF P 94-261 : Justification des ouvrages géotechniques - Fondations superficielles ;

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 10 sur 37	

- NF P 94-262 et son amendement A1 de Juillet 2018 : Justification des ouvrages géotechniques - Fondations profondes ;
- EN 206-1 : Béton – spécifications, performances, production et conformité.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 11 sur 37	

2 CONTEXTE DU SITE ET CONTENU DE LA RECONNAISSANCE

2.1 SITUATION - TOPOGRAPHIE

Le site de l'étude se situe au niveau du franchissement du bras de mer reliant la Petite à la Grande Rade et permettant l'accès à la presqu'île de Nouville. Le projet est implanté au droit des lots 408 et SN PIE de la section cadastrale Centre-Ville et des lots 41 et Sn de la section cadastrale Ile Nou, sur la commune de NOUMEA.



Figure 6 : Extrait de la vue aérienne du site de l'étude (source Géorep.nc - sans échelle)

L'Avenue James Cook se situe à une cote autour de +7,0 à +7,5 m NGNC au droit du franchissement. La berge Ouest envisagée pour accueillir la culée Ouest se situe à une cote voisine de +7,5 m NGNC (limitant les mouvements de terre envisagés). La berge Est se situe quant à elle en contrebas de l'Avenue James Cook, à une cote minimale proche de +2,5 m NGNC.

Il est important de noter la présence de talus des berges existants, à proximité des futurs appuis de culées. Un relevé topographique et bathymétrique de la zone d'étude a bien été transmis pour la rédaction du présent ind 01.

Côté Ouest, les berges sont constituées par un talus rocheux de pente sub-verticale.

La zone de l'étude est partiellement enherbée lors de nos investigations. Des arbres et arbustes sont également présents.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 12 sur 37	



Figure 7 : Photographie prise depuis la rive Est (27/02/2024)

2.2 CONTENU DE LA RECONNAISSANCE

Les reconnaissances de terrain se sont déroulées entre le 28 Février et le 04 Mars pour les reconnaissances géotechniques, le 22 Mars pour les essais de déflexion, et comprenaient la réalisation de :

Au droit de l'OA :

- **2 sondages pressiométriques**, nommés SP1 et SP2 réalisés au droit de chacun des futurs appuis présumés, de profondeur 15 m/TA. Ces essais ont permis la réalisation de profils pressiométriques et caractérisent la résistance mécanique des faciès traversés. Ces essais ont également permis l'enregistrement des paramètres de forage (pression sur l'outil, pression d'injection et vitesse d'avancement).
- **1 sondage carotté**, nommé SC2, réalisé au droit de l'appui Est, de profondeur 20 m/TA. Ce sondage a permis d'observer la nature lithologique des terrains traversés et de prélever des échantillons intacts.

Au droit du futur tracé de voirie :

- **2 sondages au pénétromètre dynamique lourd**, nommés EP1 à EP2 (le sondage EP2 ayant connu un refus prématué, 1 sondage EP2 bis complémentaire a été réalisé à une distance de 50 cm du sondage EP2), arrêtés à 6 m de profondeur/TA ou au refus. Ces essais ont permis de mesurer en continu les caractéristiques mécaniques des terrains traversés et ont été réalisés à l'aide d'un pénétromètre dynamique aux caractéristiques suivantes :

Poids du marteau: 63,37 kg

Hauteur de chute : 75 cm

Section de la pointe : 20 cm²

- **1 puits à la pelle mécanique**, noté PU1, réalisé jusqu'à la profondeur du refus obtenu à 0,7 m/TA. Ce sondage a permis de visualiser la nature des terrains traversés et d'éventuelles arrivées d'eau.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 13 sur 37	

Au droit des voiries existantes :

- 1 série d'essais de déflexion réalisée sur les voiries existantes : avenue James Cook, rue du Capitaine Bois, rue du Commandant Babo. Ces essais ont pour objectif de définir la rigidité globale de la chaussée et son homogénéité.

Ces sondages ont été descendus aux profondeurs suivantes :

Type de sondage	Sondages pressiométriques		Sondage carotté	Puits à la pelle	Sondages pénétrométriques		
Dénomination	SP1	SP2	SC2	PU1	EP1	EP2	EP2bis
Profondeur d'arrêt/ TN (m)	15,0	15,0	20,0	14,2	24,0		24,0
Arrivées d'eau (m/TA)	2,2	NR	2,2	NR			
Raisons de l'arrêt	≥ 5 m au sein du rocher altéré compact			Refus sur altération rocheuse		Refus sur blocs	Refus sur altération rocheuse

Tableau 1 : Profondeur des essais réalisés au droit du site

NR : Non relevé

Les coupes des investigations géotechniques sont disponibles en Annexe 02.

2.3 IMPLANTATION ET NIVELLEMENT DES SONDAGES

La position des sondages et essais figure sur le schéma d'implantation donné en Annexe 01.

L'implantation a été réalisée conformément au plan remis pour la campagne de reconnaissance. Le sondage SC1 a toutefois été décalé à proximité du sondage SP1, après accord du MOE. Le sondage EP1 a également été décalé du fait de la proximité d'un ancien réseau OPT (vu lors de l'implantation commune du 27/02/2024 en présence du MOE).

Les profondeurs sont comptées par rapport au Terrain Actuel au moment de la campagne de reconnaissance. L'ensemble des sondages ont été repérés et nivelés au GPS. Les coordonnées sont présentées dans le tableau récapitulatif ci-après et sur toutes les coupes de sondage en Annexe 02.

Nom du sondage	X (m)	Y (m)	Z (m NGNC)	Nom du sondage	X (m)	Y (m)	Z (m NGNC)
SP1	443959,79	214872,08	+7,4	PU1	443923,34	214860,43	+7,3
SP2	443996,88	214887,10	+2,4	EP1	443896,61	214877,19	+6,8
SC2	443999,94	214887,71	+2,4	EP2/EP2bis	444039,64	214900,60	+2,4

Tableau 2 : Coordonnées des sondages réalisés au droit du site du projet

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 14 sur 37

3 CADRE GEOLOGIQUE – RESULTATS DE LA RECONNAISSANCE

3.1 CONTEXTE GEOLOGIQUE

D'après la carte géologique et notre connaissance du secteur, nous devons nous attendre à rencontrer :

- Des remblais anthropiques liés à l'aménagement du site ;
- De possibles remblais non miniers sur les terrains gagnés sur la mer (code X1 sur la carte géologique),
- Surmontant un substratum de type flyschs gréseux volcanoclastiques à intercalations de brèches de micrite et cherts (code e7(4) sur la carte géologique).

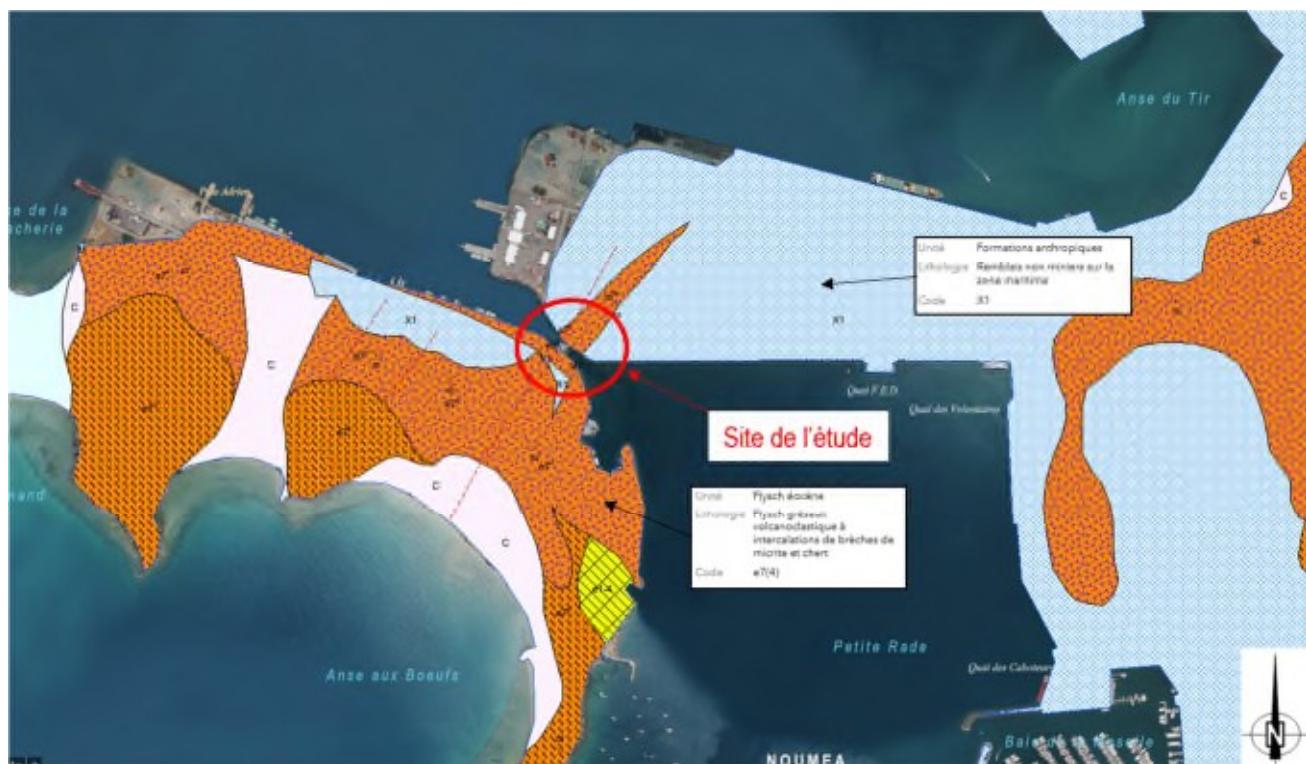


Figure 8 : Extrait de la carte géologique du secteur (source : Géorep.nc) – sans échelle

3.2 NATURE ET CARACTERISTIQUES DES SOLS

3.2.1 AU DROIT DE L'OUVRAGE D'ART (SONDAGES SP1 ET SP2/SC2)

La campagne de reconnaissance réalisée a permis d'observer les horizons géologiques suivants :

- (R) Des remblais d'aménagement de la parcelle constitués de scorie, grave argileuse à cailloutis, limons sablo-graveleux et blocs gris, identifiés de part et d'autre de l'ouvrage jusqu'à une profondeur de 0,6 m/TA côté Ouest (sondage SP1) et 1,8 à 1,9 m/TA côté Est (sondages SC2/SP2).

Les caractéristiques mécaniques de cette formation sont bonnes mais très certainement hétérogènes (fonction du % de blocs) :

$$\pi^* \approx 2,9 \text{ MPa} \text{ (nb essais = 1)}$$

$$E_M \leq 39 \text{ MPa} \text{ (nb essais = 1)}$$

- (H1) Un horizon d'altération du substratum de flyschs identifié uniquement au droit de la culée Est (sondages SC2/SP2) jusqu'à une profondeur de 7,0 m/TA. Cette formation s'apparente à la frange d'altération du substratum.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 15 sur 37	

Ses caractéristiques mécaniques sont globalement bonnes, avec :

$$1,7 \text{ MPa} \leq \mathbf{p}_i^* \leq 2,4 \text{ MPa} \text{ (nb essais = 3)}$$

$$12 \text{ MPa} \leq \mathbf{E}_M \leq 35 \text{ MPa} \text{ (nb essais = 3)}$$

- **(H2) Le substratum rocheux plus ou moins altéré** identifié au droit de tous les sondages profonds jusqu'à la profondeur d'arrêt de la reconnaissance (20 m/TA côté Est au droit du sondage SC2).

Ses caractéristiques mécaniques sont élevées à très élevées, avec :

$$\mathbf{p}_i^* \geq 4,7 \text{ MPa} \text{ (nb essais = 11)}$$

$$46 \text{ MPa} \leq \mathbf{E}_M \leq 272 \text{ MPa} \text{ (nb essais = 11)}$$

Il a été établi ci-dessous une estimation de la base (m/TA) des horizons géologiques reconnus au droit de chacun des sondages de l'Ouest vers l'Est :

Horizon géologique	Base de la couche m/TA [m NGNC]		
	Culée Ouest		Culée Est
	SP1	SP2	SC2
Cote tête sondage (m NGNC)	+7,3	+2,4	+2,4
(R) Remblais d'aménagement	0,6 [+6,7]	1,8 [-0,4]	1,9 [-0,5]
(H1) Altération rocheuse	---	7,0 [-4,6]	7,0 [-4,6]
(H2) Substratum rocheux +/- altéré	≥ 15,0 [≤ -7,7]	≥ 15,0 [≤ -12,6]	≥ 19,4 [≤ -17,0]

Tableau 3 : Synthèse stratigraphique des sondages réalisés au droit de l'OA

Nota : Ce tableau n'implique en rien qu'il ne puisse exister d'anomalie de la stratigraphie entre sondages. En particulier, la position exacte des interfaces entre couches ne saurait se déduire d'une simple extrapolation des relevés de sondages.

3.2.2 AU DROIT DES VOIRIES D'ACCÈS (SONDAGES EP1/EP2 ET PU1)

La campagne de reconnaissance a permis d'observer les horizons géologiques suivants :

Côté Ouest :

- **(R) Des remblais d'aménagement constitués de sables graveleux noir, grave sableuse marron, possibles scories**, identifiés jusqu'à une profondeur de ≥ 0,7 m/TA (sondage PU1) à 1,6 m/TA (sondage EP1).

Les caractéristiques mécaniques de cette formation sont bonnes mais hétérogènes (fonction du % de blocs) :

$$7 \text{ MPa} \leq \mathbf{R}_d \leq 30 \text{ MPa}$$

- **(H2) Le substratum rocheux plus ou moins altéré** possiblement identifié par le refus au pénétromètre et à la pelle. Ce refus pourrait néanmoins également s'expliquer par la présence d'un bloc au sein des remblais.

Ses caractéristiques mécaniques sont globalement élevées à très élevées, avec :

$$\mathbf{R}_d \geq 50 \text{ MPa}$$

Côté Est :

- **(R) Des remblais d'aménagement constitués de scorie, grave argileuse à cailloutis, limons sablo-graveleux et blocs gris**, identifiés jusqu'à une profondeur de l'ordre de 1,5 m/TA (sondage EP2bis).

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 16 sur 37	

Les caractéristiques mécaniques de cette formation sont bonnes mais hétérogènes (fonction du % de blocs) :

$$2 \text{ MPa} \leq R_d \leq 30 \text{ MPa}$$

- **(H0) Un horizon de résistance médiocre, non identifié visuellement** mais pouvant correspondre aux formations de remblais non miniers gagnés sur la mer (notés X1 sur la carte géologique). Cet horizon a été identifié jusqu'à la profondeur de 3,6 m/TA environ.

Ses caractéristiques mécaniques sont globalement faibles :

$$1 \text{ MPa} \leq R_d \leq 5 \text{ MPa}$$

- **(H1) L'horizon d'altération du substratum de flyschs** identifié jusqu'à une profondeur $\geq 5,8$ m/TA. Cette formation s'apparente à la frange d'altération du substratum.

Ses caractéristiques mécaniques sont globalement bonnes, avec :

$$5 \text{ MPa} \leq R_d \leq 30 \text{ MPa}$$

- **(H2) Le substratum rocheux plus ou moins altéré** possiblement identifié par le refus au pénétromètre. Ce refus pourrait néanmoins également s'expliquer par la présence d'un bloc au sein de l'altération sus-jacente.

Ses caractéristiques mécaniques sont globalement élevées à très élevées, avec :

$$R_d \geq 50 \text{ MPa}$$

Il a été établi ci-dessous une estimation de la base (m/TA) des horizons géologiques reconnus au droit de chacun des sondages.

Horizon géologique	Profondeur de la base m/TA [m NGNC]		
	Voirie Ouest		Voirie Est
	EP1	PU1	EP2
Cote tête sondage (m NGNC)	+7,1	+7,1	+2,3
(R) Remblais d'aménagement	1,6 [+5,5]	$\geq 0,7$ [$\leq +6,4$]	1,5 [+0,8]
(H0) Horizon médiocre	---	---	3,6 [-1,3]
(H1) Altération rocheuse	---	---	5,6 [-3,3]
(H2) Substratum rocheux +/- altéré	$\geq 1,8$ [$\leq +5,3$]	---	$\geq 5,8$ [$\leq -3,5$]

Tableau 4 : Synthèse stratigraphique des sondages réalisés pour les voiries

Nota : Ce tableau n'implique en rien qu'il ne puisse exister d'anomalie de la stratigraphie entre sondages. En particulier, la position exacte des interfaces entre couches ne saurait se déduire d'une simple extrapolation des relevés de sondages.

3.3 ESSAIS EN LABORATOIRE

Une analyse d'identification selon le GTR est en cours de réalisation sur un échantillon prélevé au droit du sondage PU1. Cet échantillon, prélevé entre 0,0 et 0,7 m/TA met en évidence une grave sableuse de type **C₁B₄** (matériau de remblai lié à l'aménagement du site). Le PV de l'analyse est fourni en Annexe 05 du présent rapport.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 17 sur 37	

3.4 RISQUES NATURELS ET ANTHROPIQUES

Le toit du substratum correspond à une surface d'érosion. Par conséquent, des remontées ou des approfondissements du toit du substratum rocheux ou la présence de blocs à faible profondeur entre nos sondages ne sont pas exclus.

La commune de NOUMEA n'est pas cartographiée pour le risque inondabilité. Le site se situant en contexte maritime, il sera soumis aux marées.

Compte tenu de l'environnement construit du site, la présence de remblais est avérée. Ces derniers pourront également contenir des vestiges de construction (fondation, blocs, dalle béton, anciens réseaux, scories indurées).

3.5 ESSAIS DE DEFLEXION

A la demande du maître d'ouvrage, des mesures de déflexion ont été réalisées sur les voiries existantes situées dans l'environnement du projet.

Les mesures de déflexion sont faites dans le sens Nouméa – Nouville, suivant les spécifications la norme NF P 98-200, avec un pas de 20 ml par section de voie (Cf. plan d'implantation des sondages en Annexe 01)

Le tableau ci-dessous donne, par section de voirie, les valeurs caractéristiques mesurées.

Aire de trafic	Rue A. Babo	Av. J. Cooke	Rue Bois
Linéaire	100 m	200 m	100 m
Nombre de mesures	6	12	6
Déflexion moyenne Dm (1/100 mm)	12,7	15,8	17,6
Ec Ecart-type	1,8	6,0	7,8
Déflexion minimale (1/100 mm)	11	6	12
Déflexion maximale (1/100 mm)	16	25	31
Déflexion caractéristique Dc (1/100 mm)	16,2	27,7	33,3
Classe	D1	D2	D2

Tableau 5 : Synthèse mesure de déflexion

Le relevé de terrain est donné dans le **PV IS 24-03/06** joint en Annexe 04.

La classe de déflexion déterminée est compatible à une classe de trafic inférieure ou égale à T2. Soit une moyenne journalière (MJA) de poids lourds comprise entre 150 et 300 par sens de circulation.

3.6 HYDROGEOLOGIE

Lors de notre intervention fin Février/début Mars 2024, des arrivées d'eau ont pu être constatées au droit des forages réalisés sur la culée Est (SC2/SP2). Le niveau d'eau mesuré se situait à la profondeur de 2,3 m/TA (soit à la cote de +0,1 m NGNC), ce qui correspond à peu près au niveau de la mer dans la rade.

Compte-tenu du mode de foration des sondages pressiométriques et carottés (à l'eau), ces niveaux sont néanmoins à considérer avec prudence et ne sont pas forcément représentatifs. Seule la pose d'un piézomètre permettrait de suivre les fluctuations de la nappe.

Les autres sondages sont restés secs le jour de notre intervention.

Ces relevés réalisés en fin de forage ayant un caractère ponctuel et instantané, ils ne permettent pas de préciser l'ensemble des circulations d'eau qui peuvent se produire, notamment en période pluvieuse.

Compte tenu du contexte du site (zone maritime), des circulations d'eau sont à attendre en lien avec les marées. Des circulations d'eau superficielles pourront également se produire en période pluvieuse au sein des remblais d'aménagement.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 18 sur 37

Une étude d'impact hydraulique a été réalisée et a permis la définition des cotes d'inondabilité du site (submersion marine).

Il appartient aux responsables du projet de se faire communiquer par les services compétents, le niveau des plus hautes eaux au droit du site.

3.7 DEFINITION DU MODELE GEOTECHNIQUE DU SITE

3.7.1 DÉFINITION DE LA ZONE D'INFLUENCE GÉOTECHNIQUE

Le projet se situe en contexte urbain. La Zone d'Influence Géotechnique ne s'intéresse pas seulement à la zone du projet. Elle inclut également :

- Les berges de la rade ;
- Les parcelles privées présentes de chaque côté de l'ouvrage de franchissement ;
- Les voiries existantes (Avenue James Cook, rue du Commandant Babo, rue du Capitaine Bois) ;
- L'ouvrage actuel ;
- Les réseaux enterrés et aériens présents sur le site.

La vue aérienne ci-dessous synthétise les principaux avoisinants du projet.



Figure 9 : Vue aérienne du site et principaux avoisinants (sans échelle)

3.7.2 AU DROIT DE L'OUVRAGE D'ART

La synthèse des résultats de la campagne d'investigation géotechnique permet d'établir le modèle géotechnique suivant, sur la base de notre connaissance du secteur et des résultats des sondages :

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 19 sur 37	

Nature géologique		Pression limite π^* (MPa)	Module pressiométrique E_M (MPa)	Poids volumique γ (kN/m ³) *	Coefficient rhéologique α	Angle de frottement ϕ' (°) *	Cohésion effective c' (kPa) *
R	Remblais d'aménagement	2,2**	20**	18	1/3	30	0
H1	Altération rocheuse	2,0	16	19	1/2	30	5
H2	Roche plus ou moins altérée	4,5	100	21	1/2	35	30

Tableau 6 : Modèle géotechnique retenu au droit de l'OA

La position des différents horizons est déduite du Tableau 3 du présent rapport.

Nota (*) : Valeurs déduites de notre connaissance locale de ces formations, à considérer comme des repères indicatifs au titre d'ordre de grandeur. Elles offrent des indications qui ne peuvent se substituer à des résultats d'essais spécifiques.

Nota (**) : Un seul pressiométrique est disponible dans cette formation, essai réalisé à proximité de l'interface avec l'horizon H1. Les résultats sont à considérer avec précaution.

Il convient de rappeler que des variations horizontales et/ou verticales inhérentes au passage d'un faciès à un autre est toujours possibles mais difficiles à détecter en sondage. **De ce fait, les caractéristiques gardent un caractère représentatif, mais jamais absolu.**

Ces valeurs retenues pour les calculs ne doivent pas faire oublier les valeurs plus élevées mesurées, dans l'éventuel choix d'engins de terrassement ou d'une technique de réalisation de fondations.

En ce qui concerne le niveau d'eau, on considérera un niveau de l'eau dans le sol en correspondance avec le niveau de la mer. Sur les berges, des circulations d'eau superficielles pourront également se produire au sein des formations superficielles en période pluvieuse.

3.7.3 AU DROIT DES VOIRIES D'ACCÈS

La synthèse des résultats de la campagne d'investigation géotechnique permet d'établir le modèle géotechnique suivant, sur la base de notre connaissance du secteur et des résultats des sondages :

Nature géologique		Résistance dynamique R_d (MPa)	Poids volumique γ (kN/m ³) *	Coefficient rhéologique α	Angle de frottement ϕ' (°) *	Cohésion effective c' (kPa) *
R	Remblais d'aménagement	7	1/3	1/3	30	0
H0	Horizon médiocre	2	1/2	2/3	25	0
H1	Altération rocheuse	7	1/2	1/2	30	5
H2	Substratum rocheux +/- altéré	> 20	21	1/2	35	30

Tableau 7 : Modèle géotechnique retenu au droit des voiries d'accès

La position des différents horizons est déduite du Tableau 4 du présent rapport.

Nota (*) : Valeurs déduites de notre connaissance locale de ces formations, à considérer comme des repères indicatifs au titre d'ordre de grandeur. Elles offrent des indications qui ne peuvent se substituer à des résultats d'essais spécifiques.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 20 sur 37	

Il convient de rappeler que : des variations horizontales et/ou verticales inhérentes au passage d'un faciès à un autre sont toujours possibles mais difficiles à détecter en sondage. **De ce fait, les caractéristiques gardent un caractère représentatif, mais jamais absolu.**

Ces valeurs retenues pour les calculs ne doivent pas faire oublier les valeurs plus élevées mesurées, dans l'éventuel choix d'engins de terrassement.

En ce qui concerne le niveau d'eau, on considérera un niveau de l'eau dans le sol en correspondance avec le niveau de la mer. Sur les berges, des circulations d'eau superficielles pourront également se produire au sein des formations superficielles en période pluvieuse.

4 TERRASSEMENTS

4.1 RAPPEL DU CONTEXTE DE L'ETUDE

Au stade actuel, 2 types de tracé et 2 types de carrefour sont envisagés. Les options proposées pour le nouvel ouvrage et ses voiries d'accès (en plan) sont présentées sur les figures ci-après (uniquement l'option giratoire).



Figure 10 : Implantation envisagée pour le nouvel ouvrage et tracé routier (extrait [7]) – sans échelle – Tracé 1 + giratoire



Figure 11 : Implantation envisagée pour le nouvel ouvrage et tracé routier (extrait [7]) – sans échelle – Tracé 2 + giratoire

Sur la base du plan topographique disponible (réf. [4]), la construction du nouvel ouvrage impliquera des mouvements de terre estimés à ce stade à :

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 22 sur 37	

- Environ 3 à 4 m en remblais côté culée Est : TA autour de +2,5 m NGNC pour une voirie au rétablissement avec l'Avenue James Cook autour de +6,0 m NGNC ;
- Profil rasant ou légèrement en déblais ($\leq 1,0$ m) côté culée Ouest : TA autour de +7,5 m NGNC pour une voirie au rétablissement avec l'Avenue James Cook autour de +7,0 m NGNC.

Ces hypothèses pourront être affinées en phase Projet une fois les plans d'ouvrage et de remblais d'accès disponibles.

4.2 CONTEXTE DU SITE

Le mode d'exécution des terrassements dépendra étroitement des conditions environnementales, en particulier :

- Du niveau d'assise et de la sensibilité des mitoyens pouvant nécessiter la réalisation de soutènements ;
- De la présence de voirie circulée ou non à plus ou moins grande distance de la fouille et des possibilités de neutralisation partielle ou totale de celles-ci ;
- De l'espace libre disponible pour envisager éventuellement une solution par talutage.

Mais de nombreux autres facteurs peuvent être déterminants pour le choix du mode d'exécution des terrassements (présence de réseaux sous chaussée, d'anciens ouvrages enterrés, etc.).

Dans le cas de mitoyens, il est recommandé :

- Avant tout démarrage des travaux, de faire réaliser un **diagnostic de la (des) structure(s) de l'existant et des avoisinants** par un bureau d'études structures ; il définira le cas échéant les confortements ou précautions à prendre, nécessaires à la réalisation des travaux (reprise en sous-œuvre, chaînage, contreventement etc.) ainsi que les déformations à ne pas dépasser ;
- Un **référent préventif** sera établi avant le début des travaux. Il permettra de relever tous les désordres éventuels des constructions existantes.

Dans le cas de mitoyens, le maître d'ouvrage ou son conseil technique devra nous fournir en phase de conception les descentes de charges des ouvrages maintenus et des mitoyens, leur niveau d'assise, géométrie et constitution, ainsi que les déformations acceptables pour ces ouvrages. La sensibilité au niveau de déformation devra également être précisée.

4.3 TRAFICABILITE EN PHASE TRAVAUX

Les limons sableux et argiles à cailloutis peuvent constituer des formations sensibles à l'eau. Par conséquent, en fonction des conditions rencontrées au moment des travaux, leur état hydrique est susceptible de varier sensiblement.

En état hydrique m (moyen), la PST pourra être de type PST n°2 – AR1.

En cas d'arrivée d'eau ou de pluie, des zones de chantiers (à la faveur de lentilles argilo-limoneuses) pourront cependant présenter une arase de classe PST n°0 – AR0. Il sera alors nécessaire de procéder au cloutage du fond de forme, au moyen d'un matériau de type brut de minage de granulométrie 100/300 mm ou équivalent, foncé dans le sol décomprimé sur une épaisseur de 0,3 m minimum.

De ce fait, les travaux devront être réalisés de préférence en période sèche. Après décapage des terrains de surface, on pourra établir des pistes de chantier résistantes avec une épaisse couche de matériau insensible à l'eau. Toute circulation devra être interdite pendant les périodes humides au droit des surfaces non protégées destinées à recevoir des constructions ou équipements définitifs

4.4 EXTRACTION

Dans les sols meubles (terre végétale, sables graveleux, limons sableux, etc.), les travaux de terrassement ne poseront pas de problèmes particuliers d'exécution. Les déblais pourront être extraits par des engins à lame ou à godet.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 23 sur 37	

Dans les formations plus compactes (blocs, éléments anthropiques, scorie indurée, remontée du substratum), les travaux de terrassement pourront nécessiter des moyens adaptés : pelle de fort tonnage, BRH, etc.

Dans tous les cas, la méthodologie mise en œuvre devra tenir compte des avoisinants.

4.5 MISE EN ŒUVRE DES REMBLAIS – CULEE EST

Ce paragraphe a pour objectif de vérifier la faisabilité de mise en œuvre du remblai (provisoire et définitif) à travers la vérification de la sécurité au poinçonnement et par l'appréciation des tassements induits par ce dernier.

La hauteur maximale de remblai est prise par hypothèse à ce stade égale à 4 m côté culée Est.

4.5.1 SUJÉTIONS D'EXÉCUTION

Les remblais d'accès au pont seront mis en œuvre selon la procédure suivante :

1. Purge totale et substitution :
 - a. De la terre végétale,
 - b. Des horizons organiques, évolutifs ou compressibles,
 - c. Des lentilles de moindre consistance,
 - d. Des matériaux anthropiques.
2. Terrassement des fonds de forme en banquettes horizontales.
3. Examen des fonds de forme ainsi créés par un ingénieur spécialiste pour avis sur la qualité du sol dans le cadre d'une mission de supervision géotechnique (G4).
4. Compactage du fond de forme à 95% à l'OPN et validation du fond de forme avec pour critère de réception $EV2 > 15$ à 20 MPa.

En cas d'arrivées d'eau et de lentilles molles, un cloutage par incorporation jusqu'au refus d'éléments roulés ou concassés de type 100/200 mm ou équivalent pourra être nécessaire.

5. Pose d'un géotextile (assurant à la fois une fonction anticontaminante et de renforcement) sur tout le fond de forme.
6. Le remblai d'apport sera constitué d'un matériau noble selon les recommandations du LCPC-COPREC :
 - Insensible à l'eau ($VBS < 0,4$) ;
 - De granulométrie 0/80 type C1B3 ou D3 selon le GTR ;
 - De caractéristiques intrinsèques Los Angeles et Micro-Deval < 45 ;
 - Avec un pourcentage de fines à 80 μm inférieur à 7%.

Les qualités de ce matériau devront être contrôlées au démarrage du chantier (identification GTR, planche d'essai, examen par un ingénieur géotechnicien). Le matériau sera mis en place par couches de 0,30 à 0,40 m, soigneusement compactées selon le GTR. Les matériaux de classe GTR D21, D31 ou C1B3 sont bien adaptés.

7. Des essais de contrôle à la plaque devront être prévus pour s'assurer de la qualité du compactage. Ils seront réalisés tous les 0,50 m d'élévation. Les valeurs minimales à obtenir seront :

$$EV2 \geq 50 \text{ MPa} \text{ (et } > 80 \text{ MPa sur le dernier mètre)}$$

$$EV2/EV1 \leq 2,0$$

Des valeurs supérieures pourront être demandées par les Responsables du projet.

Sans ces essais et contrôles suivis par A2EP GEOTEC ou son mandataire dans le cadre d'une mission G4 de supervision géotechnique d'exécution, A2EP GEOTEC ne saurait engager sa responsabilité sur cette solution (ce qui n'exonère pas l'entreprise de son auto contrôle au titre de sa mission G3).

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 24 sur 37	

4.5.2 VÉRIFICATION DU POINÇONNEMENT DU REMBLAI

La vérification du non-poinçonnement du sol se fait conformément à l'EC7. Pour cela on doit vérifier l'inégalité suivante :

$$V_d \leq R_{v;d}$$

Avec V_d : la surcharge apportée par les remblais

$$R_{v;d} = A' \cdot \frac{q_{net}}{\Gamma}$$

Avec, pour $R_{v;d}$ dans le cas des méthodes pénétrométriques et pressiométriques, un coefficient de sécurité global Γ de 1,68 (ELU durables et transitoires) et 2,76 (ELS quasi-permanent et ELS caractéristique).

Les contraintes verticales centrées en l'absence de talus proche ($i_\delta = 1$ et $i_\beta = 1$) de calcul à prendre en compte pour la justification vis-à-vis des Etats limite Ultime et de Service seront limitées à :

$$q_{ELU} = \frac{q_{net}}{1,68} = 200 \text{ kPa}$$

$$q_{ELS} = \frac{q_{net}}{2,76} = 120 \text{ kPa}$$

Des remblais de hauteur maximale 4,0 m (H_R) sont actuellement envisagés au projet. Le remblai mis en œuvre est supposé avoir un poids volumique γ de 20 kN/m³.

En première approche, nous retiendrons une surcharge d'exploitation de 20 kPa (à valider par le MOE).

Les vérifications de non-poinçonnement par rapport au remblai sont présentées ci-dessous :

État limite	Charge permanente Q	Charge variable G	V_d	$R_{v;d}$
ELS _{qp}	80 kPa	20 kPa	100 kPa	100 kPa $\geq V_d$
ELU _{fond.}	108 kPa	30 kPa	138 kPa	138 kPa $\geq V_d$

Tableau 8 : Vérification au poinçonnement des sols sous les remblais d'apport ($H_R = 4 \text{ m}$)

L'inégalité $V_d \leq R_{v;d}$ est vérifiée. De ce fait, il n'y a pas à craindre de problématique de poinçonnement sur l'ensemble de la voirie d'accès jusqu'à la culée Est de l'ouvrage.

4.5.3 ESTIMATION DES TASSEMENTS SOUS POIDS DES REMBLAIS

En considérant une purge et la substitution des formations d'origine anthropique (R) au droit de la culé Est, les tassements générés par l'apport de remblais sur une hauteur de 4 m devraient rester faibles (< 1 cm). En outre, ceux-ci se produiront de manière quasi-instantanée.

Au niveau du raccordement avec l'Avenue James Cool, le sondage EP2bis a mis en évidence un horizon de qualité médiocre entre 1,5 et 3,6 m/TA. Cet horizon pourra générer des tassements plus importants. **Nous recommandons la réalisation d'un sondage à la pelle jusqu'à 3 m de profondeur environ dans la zone d'EP2 afin de confirmer la nature de cet horizon et de 2 à 3 sondages pénétrométriques complémentaires entre EP2 et SP2/SC2 afin de déterminer l'emprise latérale de cet horizon.**

En l'état actuel des données, il est ici réalisé un calcul en première approche selon une approche élastique en considérant les hypothèses géomécaniques suivantes :

- Remblais R (0 à 1,5 m/TA) : $E_M = 20 \text{ MPa} / \alpha = 1/3$
- Horizon médiocre (1,5 à 3,6 m/TA) : $E_M = 2 \text{ MPa} / \alpha = 2/3$
- Altération rocheuse (3,6 à 5,6) : $16 \text{ MPa} / \alpha = 1/2$
- Substratum indéformable (au-delà).

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 25 sur 37

Les charges appliquées sont les suivantes (en l'absence de profil en long) : $4 \text{ m} \times 20 \text{ kN/m}^3 + 20 \text{ kPa}$ de trafic en phase définitive (à confirmer par MOA) = 100 kPa au maximum.

+ talutage 3H/2V sur les flancs

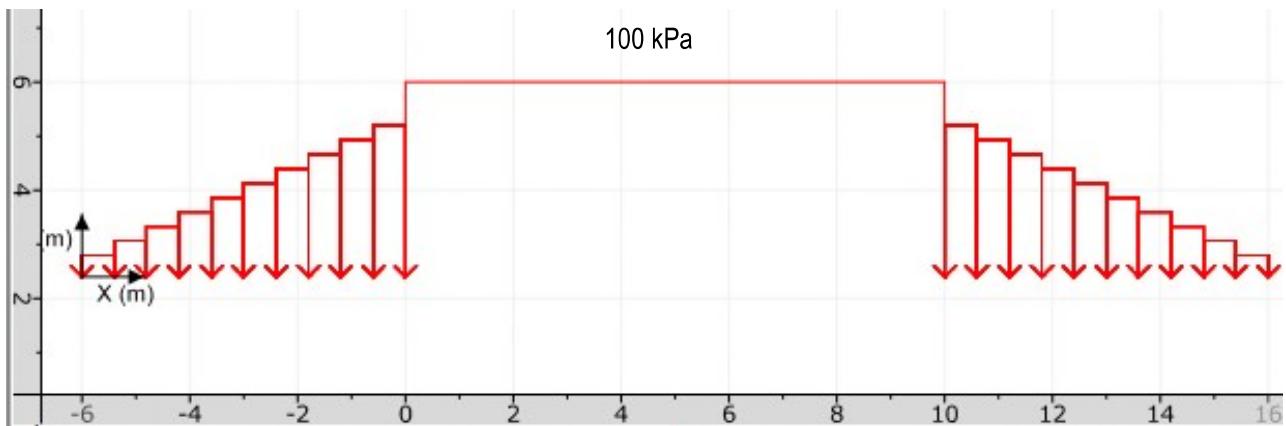


Figure 12 : Représentation graphique des charges modélisées dans TASSELDO (Foxta v4) – échelle graphique

Le tassement élastique maximal calculé à l'axe est de **5 cm**.

Cette valeur sera à confirmer en phase projet par la réalisation de quelques sondages complémentaires (sondages pénétrométriques + pelle avec éventuellement essais cédométriques selon la nature de l'horizon médiocre identifié).

Le MOE devra se prononcer quant à l'admissibilité de l'ordre de grandeur de ces tassements. Le cas échéant, la mise en œuvre d'un remblai de précharge pourra être nécessaire (à confirmer en phase projet).

4.5.4 PHASAGE DES TRAVAUX DE PRÉCHARGE

A définir en phase projet en fonction des contraintes du MOE et des résultats des investigations complémentaires.

4.5.5 SUIVI ET CONTRÔLE

A définir en phase projet en fonction des contraintes du MOE et des résultats des investigations complémentaires.

4.6 STABILITÉ DES TALUS ET DES AVOISINANTS

A ce stade, nous supposons qu'il n'est pas prévu de talus en déblais au droit du projet si ce n'est un léger reprofilage au droit de la partie Ouest et des purges localisées en fonction de la nature des matériaux superficiels rencontrés (à confirmer par le MOE). Il est également envisagé par le MOE, un terrassement de la butte présente côté Ouest pour la réalisation de la nouvelle voirie. Cette butte étant composée de matériaux issus de l'altération rocheuse, les pentes maximales à respecter à ce stade sont :

- 3H/2V en cas de passages très altérés (passages argilo-limoneux),
- 1H/1V au sein de l'altération rocheuse.

On prévoira la mise en œuvre de risbermes de 2 m de largeur pour des redans de plus de 3 m de hauteur. Cette risberme sera contretenue et un drainage devra être prévu (cunette bétonnée, descentes d'eau, etc.) afin d'assurer sa stabilité à long terme.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 26 sur 37	

Les matériaux extraits de ces terrassements devront faire l'objet d'analyses mécaniques (essais Los Angeles, Micro D'Eval) afin de s'assurer qu'ils sont propres à la réutilisation en remblais. Ces essais peuvent être réalisés avant le démarrage de la phase projet.

Les talus en remblai auront une hauteur variable jusqu'à 4 m au droit du projet.

Les talus du projet (remblais techniques), en **phases provisoires et définitives**, dont les caractéristiques satisfont celles listées au §4.5.1, pourront être pentés à 3H/2V pour les talus latéraux pour des hauteurs inférieures ou égales à 3 m. Au-delà, des risbermes de largeur minimales 2 m et contre-pentées seront nécessaires pour satisfaire la stabilité à long terme.

Dans le cas de l'utilisation de matériaux alternatifs, une étude de stabilité spécifique devra être menée.

4.7 SUJETIONS D'EXECUTION

Les règles de l'art seront respectées et notamment :

- Le drainage permanent de la plate-forme (gravitaire, tranchées, pompage, etc.) ;
- Si malgré ces précautions, le drainage n'est pas suffisant, on devra prendre les dispositions suivantes : cloutage, géotextile, traitement au liant hydraulique, etc. ;
- La protection des talus en phase provisoire (fossés de tête et de pied, polyane) ;
- La protection de talus en phase définitive (engazonnement, plantations, système pérenne de récupération des eaux, bétonnage des perrés, etc.).

4.8 MISE HORS D'EAU

Lors de notre intervention fin Février/début Mars 2024, des arrivées d'eau ont pu être constatées au droit des forages réalisés sur la culée Est (SC2/SP2). Le niveau d'eau mesuré se situait à la profondeur de 2,3 m/TA (soit à la cote de +0,1 m NGNC), ce qui correspond à peu près au niveau de la mer dans la rade.

Compte-tenu du mode de foration des sondages pressiométriques et carottés (à l'eau), ces niveaux sont néanmoins à considérer avec prudence et ne sont pas forcément représentatifs. Seule la pose d'un piézomètre permettrait de suivre les fluctuations de la nappe.

Les autres sondages sont restés secs le jour de notre intervention.

Ces relevés réalisés en fin de forage ayant un caractère ponctuel et instantané, ils ne permettent pas de préciser l'ensemble des circulations d'eau qui peuvent se produire, notamment en période pluvieuse.

Compte tenu du contexte maritime du site, des circulations d'eau superficielles sont à attendre.

Une enquête hydrogéologique approfondie est nécessaire afin de connaître les fluctuations de la nappe, le risque d'inondabilité et les niveaux d'eaux caractéristiques définis dans l'Eurocode.

En fonction de la date de réalisation des terrassements, des arrivées à moindre profondeur sont toujours possibles. Un pompage provisoire ou simple drainage sera alors nécessaire afin d'épuiser ces venues d'eau et d'assécher le fond de forme. Le matériel nécessaire sera présent sur site.

Les eaux de ruissellement seront soigneusement collectées (cunettes, tranchées, contre-pente, etc.) et évacuées vers un exutoire dimensionné de manière suffisante et implanté de manière non dangereuse pour les existants et avoisinants.

Il conviendra de s'assurer que les eaux de ruissellement de la plateforme de voirie ne se rejettent pas en tête des talus (fossés de tête et de pied, tranchées drainantes, etc.). Sinon, il conviendra de réaliser une bordure bétonnée pour empêcher l'écoulement des eaux pluviales dans ces derniers.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 27 sur 37	

5 ETUDE DES OUVRAGES GÉOTECHNIQUES

5.1 RAPPEL DU CONTEXTE

L'ouvrage existant est un pont à une travée situé sur l'avenue James Cook et permettant de desservir la presqu'île de Nouville. Ce dernier marque l'entrée du quartier de Nouville et appartient au gouvernement de la Nouvelle-Calédonie.

Les plans d'esquisse à ce jour disponibles sont présentés ci-après :

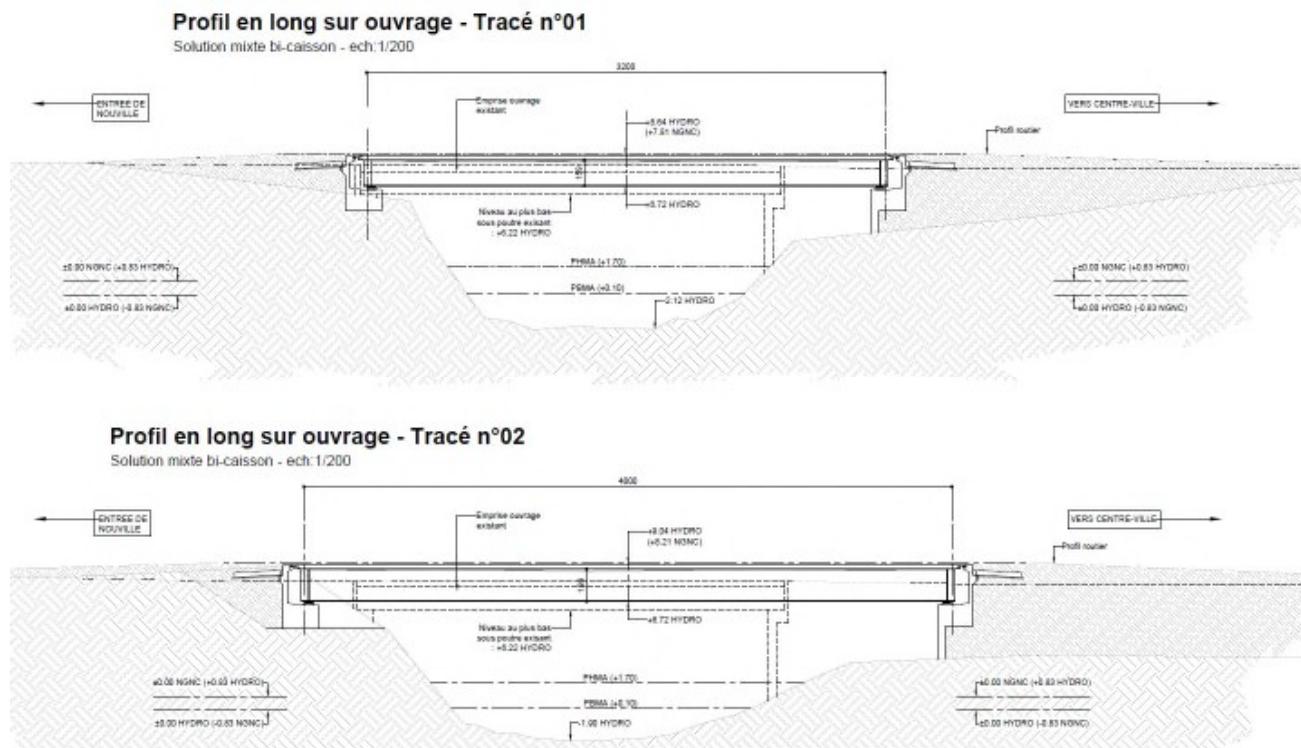


Figure 13 : Profil en long de l'ouvrage – Tracés 1 et 2 – Plans d'esquisse GEMOCE

La durée d'utilisation de l'ouvrage est de 100 ans.

Les descentes de charge ne sont pas connues à ce stade du projet.

Ces charges devront être calculées avec précision par le BET structures et transmises à A2EP-GEOTEC si elles diffèrent de celles prises par hypothèse.

5.2 SOLUTIONS DE FONDATION ENVISAGEABLES

Le contexte géotechnique mis en évidence au droit de l'ouvrage est le suivant :

- Côté culée Ouest : substratum rocheux +/- altéré identifié dès la profondeur de 0,6 m/TA ;
- Côté culée Est : des formations anthropiques (remblais) sont présentes sur environ 1,8 m de haut et surmontent un horizon d'altération rocheuse de caractéristiques mécaniques moyennes à bonnes. Le substratum rocheux +/- altéré n'est identifié qu'à partir de 7 m/TA.

Au vu de ces éléments et compte-tenu du contexte géographique du site (proximité des berges, de l'ouvrage existant), nous préconisons en solution de base, des **pieux forés simples** (classe 1 - catégorie 1 au sens de la NF P 94-262 et son Amendement de Juillet 2018) **ancrés sur les 2 rives au sein du substratum rocheux compact d'un minimum de 3 diamètres**.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 28 sur 37	

Les pieux devront respecter un **élançement** (rapport D/B avec D : longueur d'ancrage et B leur diamètre) **minimal de 5** pour respecter le domaine d'application des fondations profondes.

Une solution de l'ouvrage par fondations superficielles ne nous semble pas inenvisageable à ce stade mais devra prendre en compte a minima les contraintes suivantes :

- Purge des formations superficielles R côté culée Est, à proximité de la berge : soutènement étanche et pompage provisoire potentiellement nécessaire ;
- La géométrie des berges devra être parfaitement connue afin de permettre le calcul du facteur i_β limitant la contrainte admissible des fondations situés en tête de talus ;
- Prise en compte dans le calcul de l'ouvrage de raideurs d'appui différentes côté Ouest (substratum altéré compact) et côté Est (altération de moyenne à bonne compacité) ;
- Limitation de la contrainte admissible ;
- Etc.

Cette solution pourra a minima être étudiée à la demande du MOE en phase projet sous réserve de plans disponibles (plans projet, descentes de charge, etc.).

5.3 FONDATION DE L'OUVRAGE PAR PIEUX FORÉS ANCRÉS DANS LE SUBSTRATUM ALTÉRÉ H2 (NF P 94-262)

5.3.1 CHOIX DE LA MÉTHODE DE CALCUL

Nous utiliserons ci-après la procédure « modèle de terrain » qui consiste à déduire d'un modèle géotechnique du site les valeurs caractéristiques de la résistance de pointe et du frottement axial unitaire dans les différentes couches de sol.

Selon la norme NF P 94-262 (Eurocode 7 – Fondations profondes), il convient de vérifier que :

- La valeur de calcul à l'ELS de la charge axiale F_d transmise par un pieu est inférieure ou égale à la valeur de calcul de la charge de fluage de compression R tel que :

$$F_d \leq R_{c;cr;d}$$

- La valeur de calcul à l'ELU de la charge de compression axiale $F_{c;d}$ est inférieure ou égale à la valeur de calcul de la portance $R_{c;d}$ tel que :

$$F_{c;d} \leq R_{c;d}$$

Selon les termes de la NF P 94-262, les charges admissibles en compression et en traction sont données par la formule suivante :

$$R = \Gamma_1 \cdot R_s + \Gamma_2 \cdot R_b$$

Avec :

- $R = R_{c;cr;d}$ à l'ELS et $R = R_{c;d}$ ou $R_{t;d}$ à l'ELU
- R_b : résistance limite de pointe, avec $R_b = A \cdot k_p \cdot p_{le}^*$
- R_s résistance limite en frottement latéral avec $R_s = \pi D \sum h_i q_{si}$
- A la section du pieu et D son diamètre (pour un pieu à section circulaire)
- k_p le facteur de portance pressiométrique et p_{le} la pression limite nette équivalente

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 29 sur 37	

- q_{si} le frottement latéral limite dans la couche i d'épaisseur h_i .

Les coefficients de sécurité globaux (Γ_1 et Γ_2) retenus en compression et en traction sont donnés dans le Tableau 9 pour la méthode pressiométrique.

Compression	ELS qp	ELS caract	ELU fond	ELU acc
Latéral (Γ_1)	0,636	0,778	0,909	1,000
Pointe (Γ_2)	0,455	0,556	0,909	1,000
Traction				
Latéral (Γ_1)	0,467	0,636	0,870	0,952
Pointe (Γ_2)	-	-	-	-

Tableau 9 : Coefficients de sécurité globaux selon la norme NF P 94-262 (classe 1 – cat.1)

En outre, selon l'additif à la norme NF P 94-262 de Juillet 2018, ces coefficients de sécurité globaux sont également pondérés par les coefficients de sécurité partiels γ_{Rd1} et γ_{Rd2} qui sont, à ce jour, variables en fonction du type de sol d'ancrage et de la technologie de pieux utilisée.

Pour des pieux de classe 1 et de catégorie 1, les coefficients γ_{Rd1} et γ_{Rd2} restent les mêmes que pour la norme NF P 94-262 soit :

- $\gamma_{Rd1} = 1,15$ en compression et 1,40 en traction,
- $\gamma_{Rd2} = 1,10$ en compression et en traction.

5.3.2 HYPOTHÈSES DE DIMENSIONNEMENT DES PIEUX VIS-À-VIS DES SOLICITATIONS VERTICALES

Le prédimensionnement ci-après sera réalisé :

- A l'ELS-caractéristique et à l'ELU-fondamental ;
- Avec la méthode pressiométrique pour les stratigraphies type du Tableau 3 et en considérant le modèle géotechnique du Tableau 6,
- Selon le « modèle de terrain »,
- En considérant une neutralisation du frottement dans les remblais R.

Pour un pieu foré simple (classe 1, catégorie 1), on retiendra pour le dimensionnement vis-à-vis des charges verticales les paramètres suivants pour chacun des appuis.

Type de sol	Base de la couche (m/TA)	π^* (MPa)	Courbe f_{sol}	q_s retenu (kPa)	k_p max (kPa)
R - Remblais d'aménagement	0,6	---		négligé	
H2 – Substratum +/- altéré	$\geq 15,0$	4,5	Q5	200	1,45

Tableau 10 : Paramètres de dimensionnement verticaux des pieux – Culée Ouest (sondages de référence SP1)

Type de sol	Base de la couche (m/TA)	π^* (MPa)	Courbe f_{sol}	q_s retenu (kPa)	k_p max (kPa)
R - Remblais d'aménagement	1,9	---	Négligé		
H1 – Altération rocheuse	7,0	2,0	Q2	72	/
H2 – Substratum +/- altéré	$\geq 20,0$	4,5	Q5	200	1,45

Tableau 11 : Paramètres de dimensionnement verticaux des pieux – Culée Est (sondages de référence SC2/SP2)

5.3.3 EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT VERTICAL DES PIEUX

5.3.3.1 Vérification en portance

Sur la base des modèles précités (§5.3.2), nous réalisons ci-après un prédimensionnement des pieux du projet.

Nous obtenons les capacités portantes suivantes ($L_{ancrage}$ = longueur d'ancrage dans le substratum altéré H2) en considérant un ancrage minimal égal à 2,5 m (≥ 3 diamètres pour des pieux de diamètre 800 mm) pour les 2 modèles géotechniques considérés.

Type de sol	\varnothing (mm)	$L_{ancrage}$ (m)	L_{tot} (m)	$V_{ELS,car}$ (kN)	$V_{ELU,fond}$ (kN)
Culée Ouest	800	5,0	5,0	2 800	3 945
Culée Est		2,5	9,5	2 780	3 920

Tableau 12 : Calcul des capacités portantes à l'ELS-car et l'ELU-fondamental

5.3.3.2 Vérification structurelle

La charge ultime d'un pieu peut être limitée par la résistance propre du matériau qui le constitue. Pour le béton des pieux, il est prévu un béton de type C35/45 admissible pour une classe d'agressivité XA1 selon la norme NF EN 206-1 (à confirmer par la maîtrise d'ouvrage et le maître d'œuvre) en l'absence d'analyse des eaux réalisées au droit du projet.

NOTA : Des analyses d'eau pourront être demandés pour permettre de confirmer la classe d'agressivité.

Pour la contrainte dans le béton admissible, cette dernière sera limitée conformément à la norme NF P 94-262.

Les valeurs de contrainte maximale à l'ELS Caractéristique et de calcul à l'ELU Fondamental sont déterminées ci-après selon la norme NFP 94-262 par les formules suivantes :

- Valeur caractéristique de la résistance à la compression :

$$f_{ck}^* = \inf(f_{ck}(t); C_{\max}; f_{ck}) \frac{1}{k_1 k_2}$$

- Valeur de calcul de résistance à la compression du béton (ELU) :

$$f_{cd} = \text{Min} \left(\alpha_{cc} k_3 \frac{f_{ck}^*}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \frac{f_{ck}(t)}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \frac{C_{\max}}{\gamma_c} \right)$$

- Valeurs moyenne et maximale de la résistance à la compression à l'ELS caractéristique :

$$0,3k_3f_{c;k}^* \text{ et } \text{Min}(0,6k_3f_{c;k}^*; 0,6f_{c;k})$$

Pour des **pieux forés (classe 1, catégorie 1)**, on a :

- $C_{\max} = 25 \text{ MPa}$,
- $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$
- $k_1 = 1,30$ (pieux foré),
- $k_2 = 1,00$ (pieu foré – classe 1),
- $k_3 = 1,00$ (= 1,20 si contrôle renforcé d'intégrité),
- $\alpha_{cc} = 1,0$,
- $\gamma_c = 1,5$ (ELU fondamental).

Les résultats de la justification du béton à la compression des pieux sans contrôle renforcé sont synthétisés dans le tableau ci-après :

	f_{ck}^* [MPa]	$\sigma_{c\max}$ ELS [MPa]	$\sigma_{c\text{moy}}$ ELS [MPa]	f_{cd} ELU Fond. [MPa]
Avec contrôle renforcé	18,3	13,1	6,5	14,7
Sans contrôle renforcé	18,3	11,0	5,5	12,2

Tableau 13 : Contraintes maximales admissibles dans les pieux de diamètre 800 mm

Pour la vérification de la résistance structurelle du pieu à la compression, les dispositions de la NF EN 1992-1-1 s'appliquent. Conformément aux spécifications apportées par la NF P 94-262, la contrainte admissible dans le béton doit être calculée afin de s'assurer que la contrainte effectivement appliquée dans chaque section ne dépasse pas ces valeurs seuils.

5.3.4 HYPOTHÈSES DE DIMENSIONNEMENT DES PIEUX VIS-À-VIS DES SOLICITATIONS HORIZONTALES

Pour le cas de pieux soumis à des efforts horizontaux en tête, des moments de flexion sont générés et donc à prendre en compte dans les dimensionnements. Ces moments de flexion sont fonction du type de sollicitation et de leur durée.

La loi de mobilisation élastoplastique de la réaction latérale du sol est caractérisée par un coefficient de réaction K_f (kN/m/m) défini comme présenté sur la Figure 14.

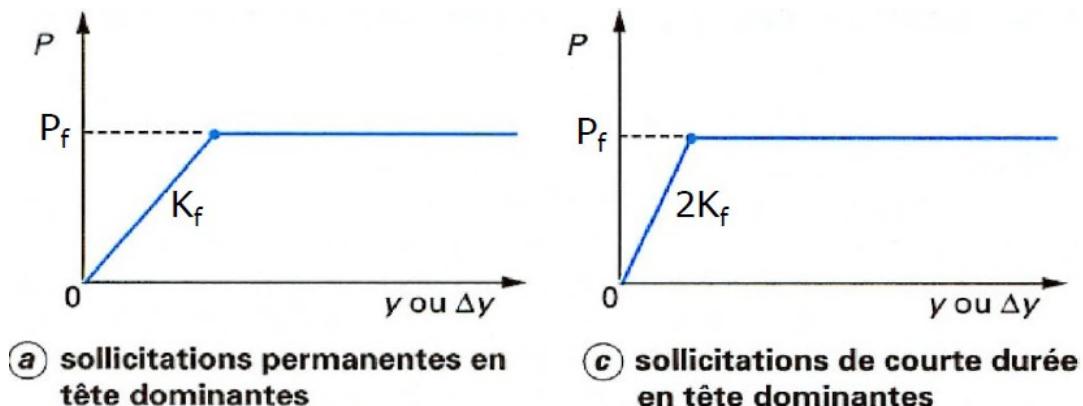


Figure 14 : Loi de mobilisation élastoplastique de la réaction latérale du sol à partir des données pressiométriques

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 32 sur 37	

Les valeurs de Kf sont déterminées selon les formules suivantes :

$$K_f = E_M \frac{18\rho}{4(2,65\rho)^\alpha + 3\alpha\rho}$$

$$\rho = \max\left(\frac{B}{B_0}; 1\right)$$

Avec :

- B_0 largeur de référence égale à 0,6 m,
- B largeur ou diamètre du pieu,
- E_M module pressiométrique,
- α le coefficient rhéologique.

Les coefficients de réaction du sol devront être calculés en fonction du diamètre des pieux, du type de sollicitation (ELU/ELS), de la durée de sollicitation (court ou long terme), du module pressiométrique, du coefficient rhéologique.

Le Tableau 14 présente le calcul des Kf pour des pieux de diamètre 600 et 800 mm.

Horizon	E_M (MPa)	α (-)	Diamètre D = 800 mm		Diamètre D = 1000 mm	
			Kf LT (kN/m/m)	Kf CT (kN/m/m)	Kf LT (kN/m/m)	Kf CT (kN/m/m)
Remblais R	20	1/3	65	130	73	146
Altération H1	16	1/2	40	80	44	88
Rocher altéré H2	100	1/2	252	505	275	550

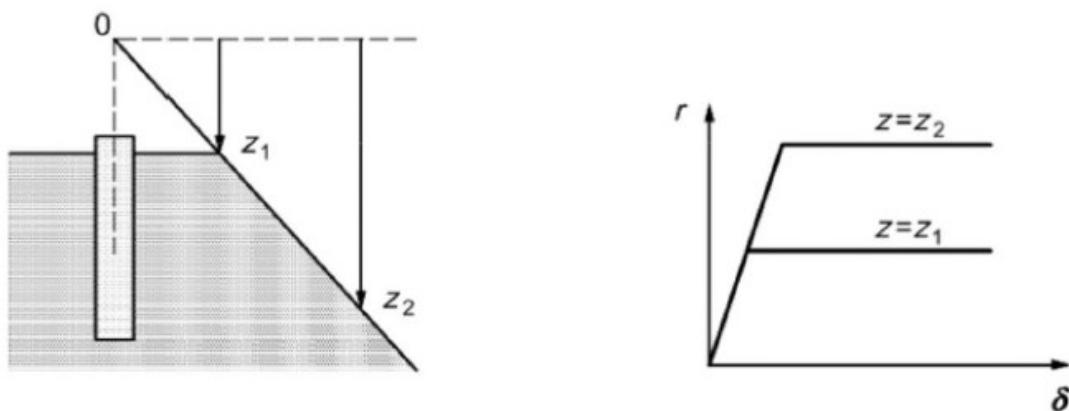
Tableau 14 : Détermination des modules de réaction Kf pour des pieux de diamètre 800 et 1000 mm

5.4 PIEUX IMPLANTÉS EN CRÈTE DE TALUS

Dans le cas de fondations implantées en crête de talus, la réaction frontale et les frottements latéraux éventuels du sol ne doivent être intégralement pris en compte qu'à partir d'une cote telle que l'épaisseur horizontale de sol susceptible d'être mise en butée soit au moins égale à 5B (§I.1.5 de l'Annexe I de la NF P 94-262).

Pour les culées, les dispositions du § I.1.5 de la norme NF P 94-262 seront appliquées.

- Le frottement latéral est minoré selon les dispositions de l'Annexe I ;
- La pente Kf des lois élémentaires de mobilisation de la pression frontale est conservée ;
- Il convient de faire varier linéairement la valeur du palier plastique entre le point situé à la tête du pieu et le point situé à une distance supérieure ou égale à 5B (soit 5 m) soit entre 0 et 4 m / la tête des pieux :



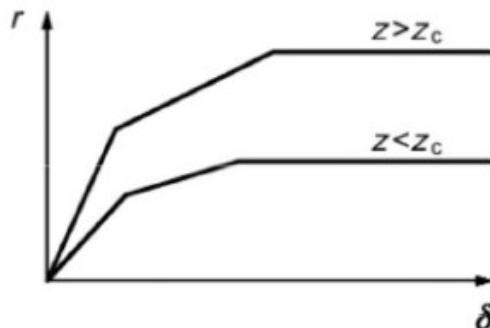
Légende : r : réaction frontale ou tangentielle ; δ : déplacement horizontal de l'élément de fondation.

Figure 15 : Loi d'interaction dans le cas d'un élément implanté en tête de talus (Annexe I NF P 94-262)

5.5 PRISE EN COMPTE DE LA PROXIMITE DE LA SURFACE DU SOL

Pour les zones proches de la surface, le module linéaire et la valeur de palier doivent être minorés selon les dispositions du §I.1.6 de la NF P 94-262 :

- Sur une profondeur z_c égale à $4B$ dans des sols frottants (altération H1 notamment) ;
- Les lois effort-déplacement définies ci-avant sont modifiées par une affinité d'axe le déplacement de l'élément de fondation, de direction celle de la réaction frontale, et de rapport égal à : $0,5 (1 + z/z_c)$.



Légende : r : réaction frontale ou tangentielle ; δ : déplacement de l'élément de fondation.

Figure 16 : Loi d'interaction à prendre en compte près de la surface du sol

5.6 FROTTEMENTS NEGATIFS

La nature et la résistance mécanique des terrains observés au droit des futurs appuis de l'ouvrage ne devraient pas générer de tassements importants.

Ce point sera à confirmer en phase G2 PRO lorsque les plans d'ouvrage seront disponibles.

Le cas échéant, les frottements négatifs seront calculés conformément aux dispositions de l'Annexe H de la NF P 94-262.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 34 sur 37	

5.7 DEPLACEMENTS HORIZONTAUX INDUITS PAR LES REMBLAIS

La nature et la résistance mécanique des terrains observés au droit des futurs appuis de l'ouvrage ne devraient pas générer de tassements importants et donc de déplacements horizontaux de type $g(z)$.

Ce point sera à confirmer en phase G2 PRO lorsque les plans d'ouvrage seront disponibles.

Le cas échéant, le calcul sera mené conformément aux dispositions de l'Annexe K de la NF P 94-262.

5.8 EFFET DE GROUPE

La présence de pieux très proches les uns des autres induit une interaction entre ces éléments.

Cette interaction impacte :

- Le comportement transversal,
- L'état limite de mobilisation globale du sol,
- La valeur du frottement négatif.

Cette hypothèse devra être confirmée une fois le plan de fondation transmis, et l'effet de groupe sera éventuellement calculé sur la base de la NF P 94-262 annexes H, I et J.

5.9 TASSEMENTS

Sous réserve d'une exécution soignée des pieux et du respect des hypothèses précitées, les tassements théoriques absolus seront faibles ($< 1 \text{ cm}$).

5.10 SUJETIONS D'EXECUTION

Les pieux seront réalisés selon les Règles de l'Art par une entreprise spécialisée et qualifiée en fondations profondes, conformément aux normes NF P 94-262.

Pour traverser tous les terrains de forte consistance (blocs, remblais indurés, scories, altération rocheuse compacte, substratum rocheux, etc.) et atteindre l'ancrage nécessaire, l'entreprise devra mettre en œuvre le matériel adapté, ce qui pourra conduire à l'utilisation du trépan, de carottage ou à modifier le choix du type de pieu et/ou sa mise en œuvre. Ces moyens seront tels qu'ils ne provoquent pas de désordres aux avoisinants (réseaux, ouvrage existant, berges, etc.).

Le type de pieux et la mise en œuvre devront prendre en compte :

- La compacité du substratum (E_M mesurés jusqu'à plus de 200 MPa),
- La présence d'une nappe dont les fluctuations évoluent avec la marée,
- Les variations du toit du sol d'ancrage (remontée ou approfondissement) en particulier les épaisseurs d'altération pouvant être variables, même au droit d'un même appui ;
- La perméabilité des terrains.

Des circulations d'eau sont à prévoir au sein du substratum fracturé. Il conviendra de maintenir un niveau d'eau dans le forage afin d'éviter tout phénomène de sous-tirage.

Les pieux soumis à des cas de charges de traction devront être ferraillés toute hauteur.

Le béton utilisé devra tenir compte :

- De l'agressivité des sols présents ;
- Une classe d'exposition XC4 minimum (forage sous eau) ;
- Des exigences relatives à la NF EN 206 et notamment une consistance de type S4 ou S5 (bétonnage en conditions immersées) et une teneur en liant de 375 kg/m³ minimum.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 35 sur 37	

5.11 CONTROLES

Le type de contrôle à réaliser dépend de la classe de conséquence de l'ouvrage et de sa catégorie géotechnique.

A ce jour, aucune information concernant la classe de conséquence de l'ouvrage et la durée d'utilisation du projet ne nous a été communiquée (cf. Annexe P de la norme NF P 94-262).

Il conviendra de porter un soin tout particulier à la qualité du fond de forage avant bétonnage (avant et après mise en place des armatures). Des tubes d'auscultations devront également être prévus jusqu'à la base de la cage d'armature pour permettre le contrôle précis de la réalisation des pieux.

Les essais de contrôle seront conformes à la norme NF P 94-160-1.

5.12 PRECAUTIONS VIS-A-VIS DES EXISTANTS

Compte-tenu du contexte urbanisé du projet, il sera nécessaire de respecter les points suivants :

- **Avant tout démarrage des travaux**, nous conseillons de faire réaliser par un bureau d'études structures une **étude de diagnostic** des structures existantes et de leur éventuel confortement. Elle permettra notamment de définir les types de reprises de la structure qu'il sera éventuellement nécessaire de réaliser (chaînage par exemple) ;
- Un **référent préventif** ou **constat d'huissier** devra être établi avant le début des travaux. Il permettra de relever tous les désordres sur les constructions existantes ;
- **Les travaux de terrassement** en bordure des constructions existantes devront être **limités au maximum** et être exécutés avec toutes les précautions nécessaires et suffisantes afin de ne pas risquer de déstabiliser les structures (berges, ouvrage actuel, réseaux). On évitera par exemple les vibrations importantes.
- Les nouvelles fondations seront suffisamment en retrait pour ne pas impacter ou être perturbées par le débord de l'existant.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 36 sur 37	

6 DIMENSIONNEMENT DE LA VOIRIE

Concernant le dimensionnement des voiries, les hypothèses générales transmises par le MOE sont les suivantes :

- Durée de chaussée égale à 20 ans,
- Trafic : 210 PL/j/sens (classe de trafic T2),
- Accroissement arithmétique du trafic de 10%.
- Température spécifique 25°C.

6.1 CHAUSSEE NEUVE - VOIRIE ACCES EST

La chaussée neuve devra être réalisé sur une plateforme support de classe PF2⁺, caractérisée par un module de déformation à l'essai à la plaque LCPC tel que $EV \geq 80 \text{ MPa}$.

Le tableau ci-dessous donne une esquisse de la structure de chaussée neuve à mettre en place.

Nature de la couche	Matériau	Epaisseur (cm)	Module (MPa)
Roulement	EB10-BBME classe3	6	5 585
Base	EB14-BBME classe2	12	8 530
Fondation	GNT 0/31,5 mm	20	600
Plateforme support	PF2 +	/	80

Tableau 15 : Structure de chaussée neuve

6.2 RENFORCEMENT DES VOIRIES EXISTANTES

Il s'agit de définir la structure de chaussée à mettre en place :

- Au droit de l'accès Ouest de l'ouvrage (au-delà de la dalle de transition de l'ouvrage),
- Au droit du carrefour avec la rue Commandant Babo et l'avenue James Cook,
- Au droit du raccord à rue Capitaine Bois et du Giratoire.

Les valeurs de défexion caractéristiques Dc, déterminées au droit des chaussée existante, traduisent une bonne qualité de portance de la plateforme de ces voiries.

Les classes de défexion (D1 et D2) sont caractéristiques d'une plateforme peu déformable dont la classe de portance est voisine de PF3.

Le renforcement de la chaussée sur ces sections de voirie va consister en un renouvellement de la couche de roulement. Il s'agira de réaliser :

- Un fraisage de 2 à 3 cm de la chaussée existante,
- Application sur une épaisseur de 6 cm d'un béton bitumineux type EB10 BBME classe 3.

6.3 VOIE VERTE

La voie verte constitue une voirie légère. Afin de garantir un meilleur confort aux usagers de cette voirie, nous recommandons la mise en œuvre de la structure ci-dessous sur une plateforme de type PF2 (module $EV \geq 50 \text{ MPa}$).

Nature de la couche	Matériau	Epaisseur (cm)	Module (MPa)
Roulement	Sable enrobé (0/6 mm)	4 à 5	//
Fondation /Base	GNT 0/20 mm	10 à 15	600
Plateforme support	PF2	/	50

Tableau 16 : Structure de chaussée voie verte

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception phase avant-projet G2 AVP	Page 37 sur 37	

7 RECOMMANDATIONS POUR LES MISSIONS SUIVANTES

Le présent rapport constitue le compte rendu et fixe la fin de la mission d'étude géotechnique de conception phase avant-projet. Cette mission G2 AVP confiée à A2EP GEOTEC a permis de donner les hypothèses géotechniques à prendre en compte en fonction des données fournies et des résultats des investigations, et présente certains principes d'adaptation au sol des ouvrages géotechniques projetés.

Les principales incertitudes qui subsistent concernent le contexte géotechnique du site et le projet, c'est-à-dire notamment :

- **La géométrie du projet : plans d'ouvrage, profil en long, hauteurs déblais/remblais ;**
- Le phasage des travaux ;
- Les descentes de charges complètes en tête de pieux (torseurs V, H, M aux ELS/ELU) ;
- Les variations latérales de faciès au sein des formations d'altération ;
- **La présence d'un horizon de compacité médiocre non identifié visuellement en partie Est du projet (EP2bis) ;**
- La compacité de l'altération rocheuse et du substratum altéré ;
- Les surconsommations possibles de béton dans les horizons d'altération ;
- Les remontées et approfondissements du toit du substratum altéré H2 (surface d'érosion) ;
- Les circulations d'eau en période pluvieuse, difficilement quantifiables ;
- La traficabilité du fond de forme ;
- L'agressivité des eaux sur les bétons.

Ces incertitudes peuvent avoir une incidence importante sur le coût final des ouvrages géotechniques. Il conviendra d'en tenir compte lors de la mise au point du projet. A cet effet, la réalisation d'une mission de conception phase projet (missions G2 PRO puis G2 ACT/DCE) et de supervision géotechnique (mission G4) pourra suivre la présente étude (mission G2 PRO) pour limiter les risques d'aléas.

La société A2EP GEOTEC reste à votre disposition pour tous renseignements concernant cette étude.

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception - Phase Avant-projet (G2 AVP)	Annexes	

ANNEXES

Annexe 1 : Plan d'implantation

Annexe 2 : Sondages pressiométriques et carottés au droit de l'ouvrage d'art

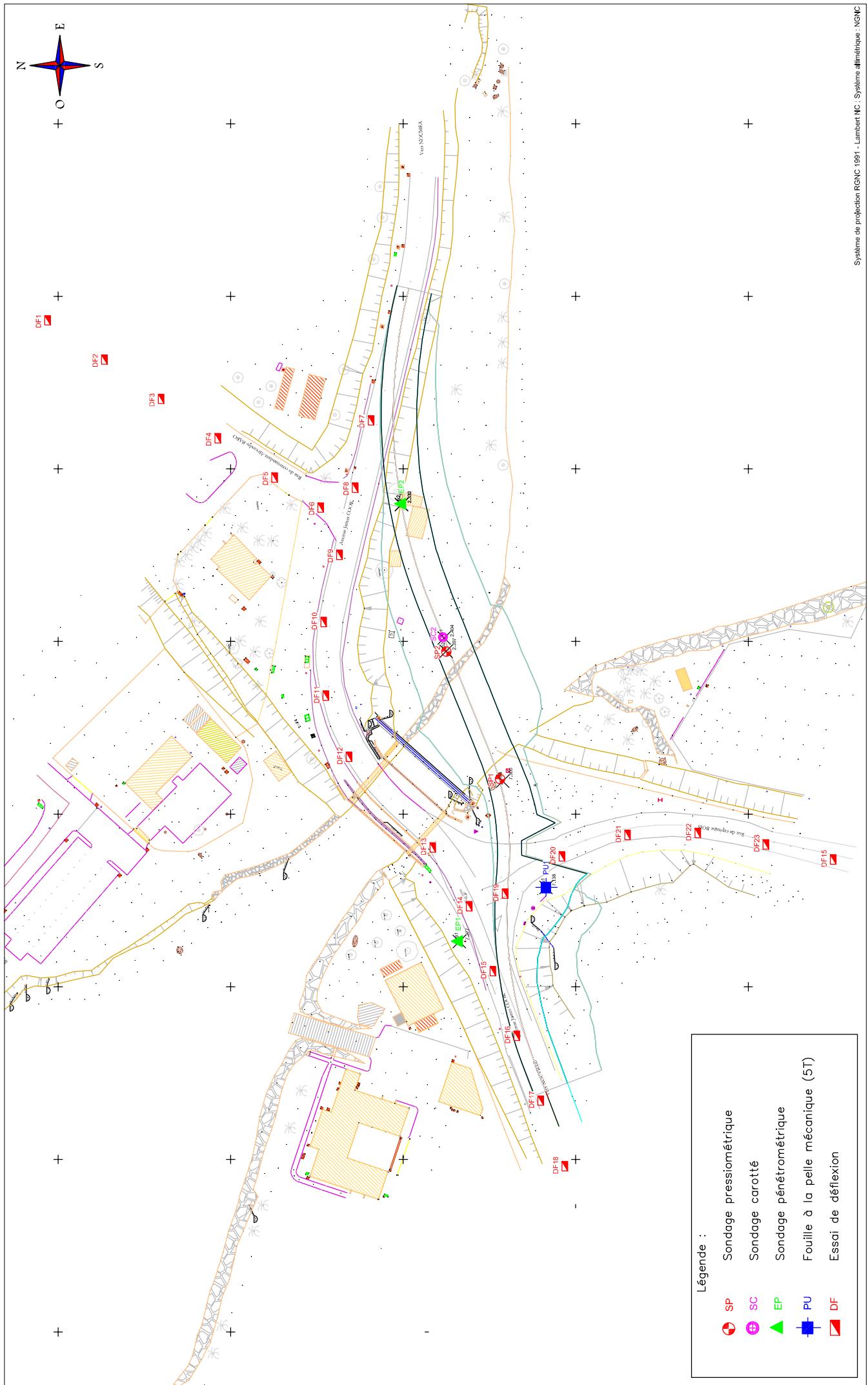
Annexe 3 : Sondages pénétrométriques et à la pelle au droit des voiries d'accès

Annexe 4 : Essais de déflexions

Annexe 5 : Analyses en laboratoire

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	<i>Indice : 01</i> 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception - Phase Avant-projet (G2 AVP)	<i>Annexes</i>	

Annexe 1 : Plan d'implantation



	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception - Phase Avant-projet (G2 AVP)	Annexes	

Annexe 2 : Sondages pressiométriques et carottés au droit de l'ouvrage d'art

Eléments de l'affaire

Client: SECAL
 Dossier: AF23-0806
 Description du dossier: Mission G2 PRO
 Chantier: Pont de Nouville
 Observation: Arrêt à 15 m

Cote début
0 m

Cote fin
15 m

Coordonnées

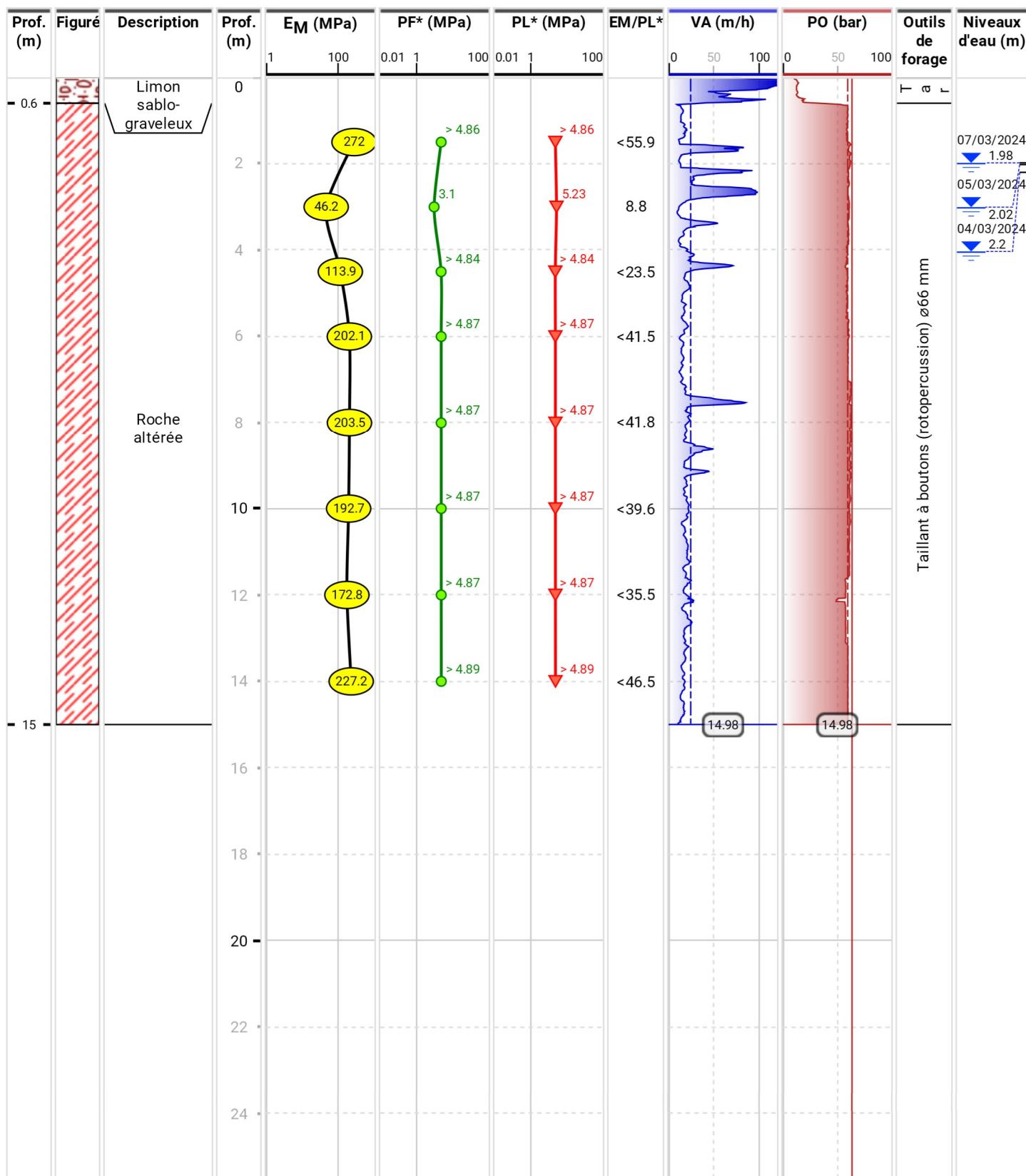
RGNC Lambert NC / NGNC
 X: 443959.54
 Y: 214871.16
 Altitude GPS: 7.3 m

Sondage Pressiométrique

Norme NF EN ISO 22476-4

Forage

SP1



Eléments de l'affaire

Client: SECAL
 Dossier: AF23-0806
 Description du dossier: Mission G2 PRO
 Chantier: Pont de Nouville
 Observation: Arrêt à 15 m

Cote début: 0 m
 Date de début: 03/03/2024

Date de fin: 04/03/2024
 Machine: SEDIDRILL S200

Opérateur: FKA/PW
 Altitude GPS: 2.4 m

Coordonnées

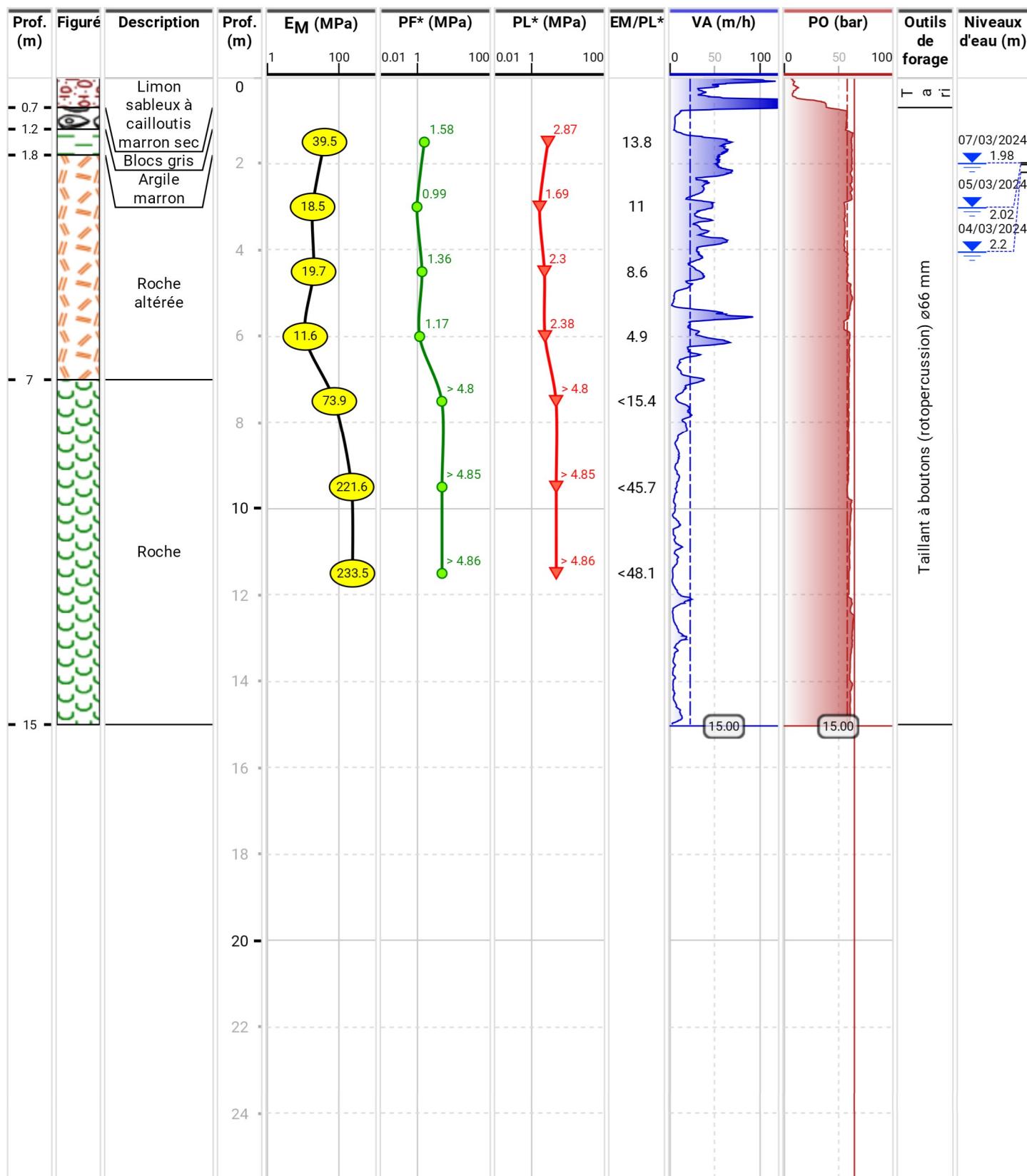
RGNC Lambert NC / NGNC
 X: 443997.17
 Y: 214887.58

Sondage Pressiométrique

Norme NF EN ISO 22476-4

Forage

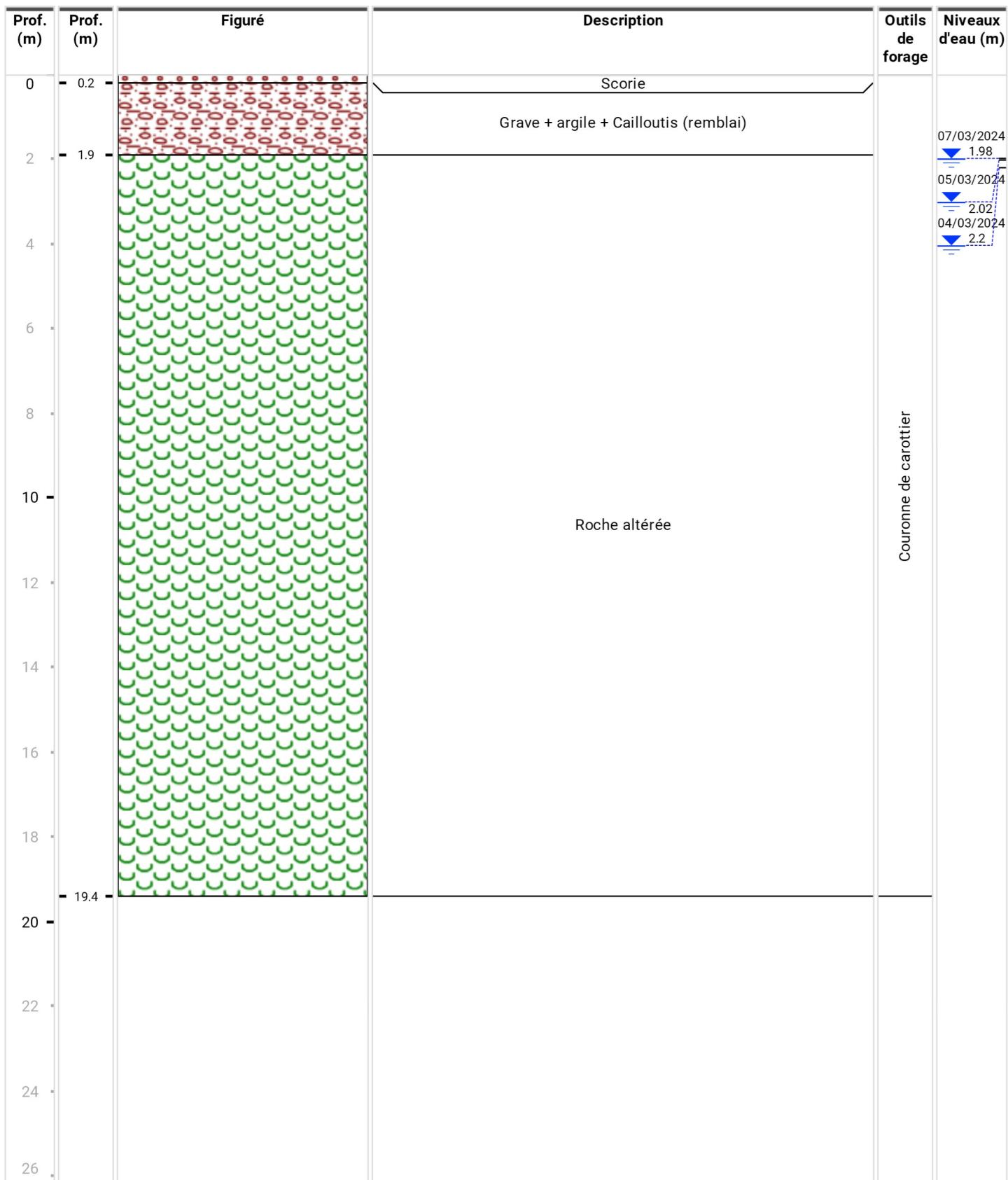
SP2

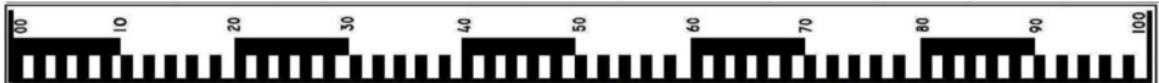
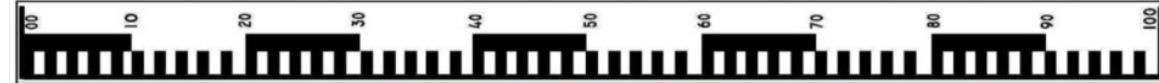


Eléments de l'affaire

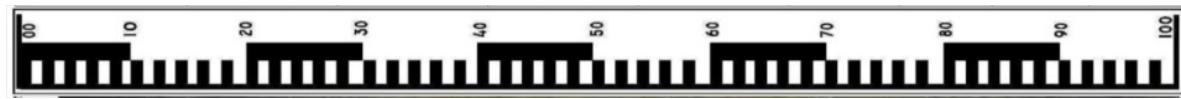
Client	0 m	Cote fin
SECAL	05/03/2024	19.4 m
Dossier	Date de début	
AF23-0806	07/03/2024	
Description du dossier	Date de fin	
Chantier	Machine	
Pont de Nouville	SEDIDRILL S200	
Observation	Opérateur	
	FKA PW	

Coordonnées
Carottage

Forage
SC2


	  <div data-bbox="203 797 1394 909">  <p>Forage de 0.0 à 4.35 m en carotté HQ avec enregistrement des paramètres de forage</p> </div>	
	  <div data-bbox="203 1567 1394 1680">  <p>Forage de 4.35 à 8.4 m en carotté HQ avec enregistrement des paramètres de forage</p> </div>	

Haut



Bas



Forage de 8.4 à 12.2 m en carotté HQ avec
enregistrement des paramètres de forage

Haut



Bas



Forage de 12.2 à 15.7m en carotté HQ avec
enregistrement des paramètres de forage



	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception - Phase Avant-projet (G2 AVP)	Annexes	

Annexe 3 : Sondages pénétrométriques et à la pelle au droit des voiries d'accès

Pénétromètre Geo Deep Drill

Norme NF EN ISO 22476-2

Forage

EP1

Opérateur

GM/HL

Eléments de l'affaire

 Client
SECAL
Dossier
AF23-0806

Description du dossier

Mission G2 PRO

Chantier

Nouvel ouvrage de Nouville Y

Observation

Refus à 1.8 m

Cote début

0 m

Date de début

03/03/2024

Cote fin

1.8 m

Date de fin

03/03/2024

Coordonnées

RGNC Lambert NC / NGNC Masse Marteau : 63.37 kg

X

443928.76

Masse Enclume : 29.85 kg

Y

214858.64

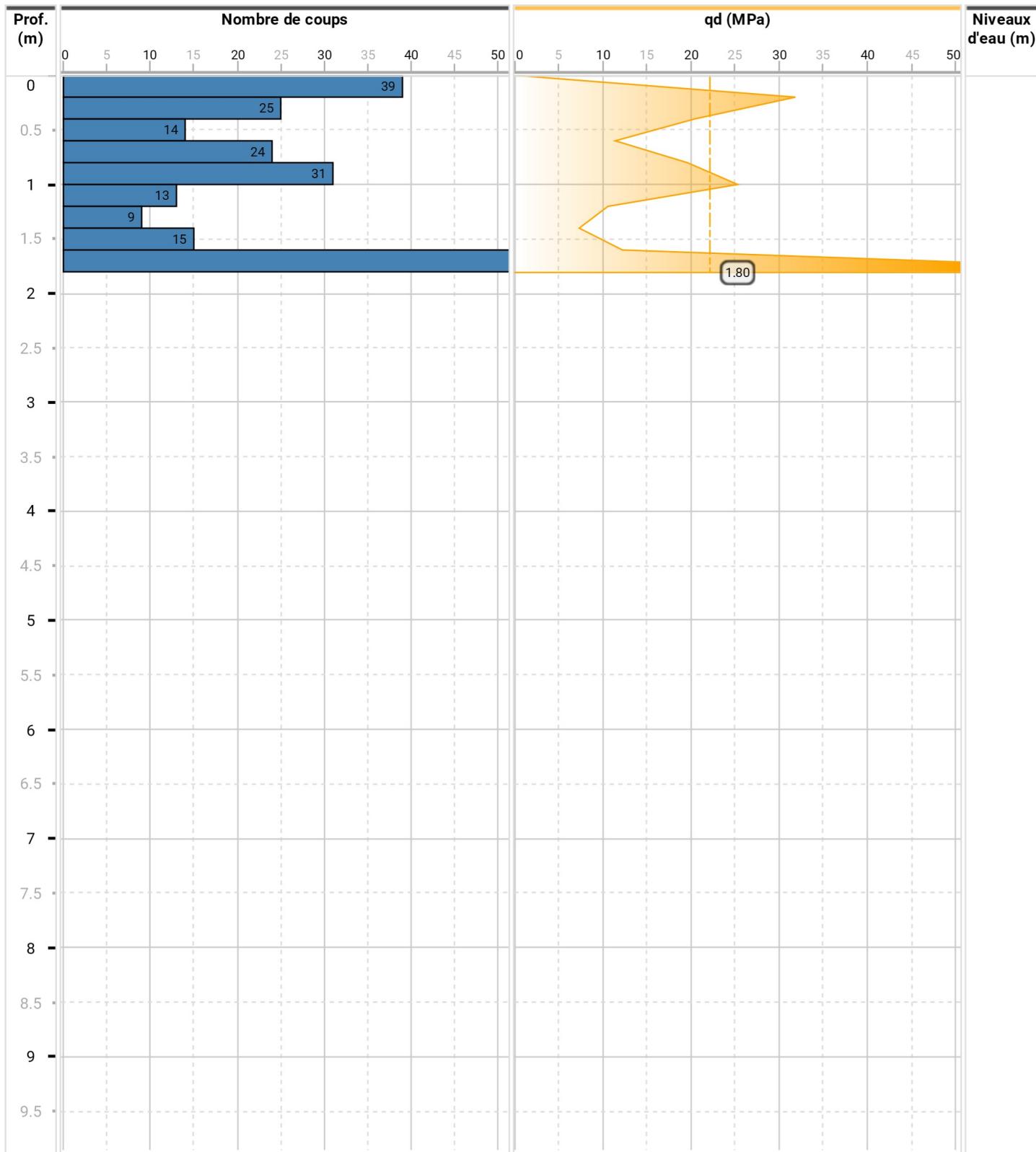
Masse Tige : 6.77 kg

Altitude GPS

7.1 m

Masse Pointe : 0.65 kg

Hauteur de chute : 0.75 m

 Section de Pointe : 20 cm²
Caractéristiques


Sondage à la pelle
Eléments de l'affaire

Client: SECAL
 Dossier: AF23-0806
 Chantier: Nouvel ouvrage de Nouville
 Description du dossier: Description du dossier

Cote début: 0 m

Cote fin: 0.7 m

Observation: Y

Refus 0.7 m

Date de fin: 04/03/2024

Altitude GPS: 7.1 m

Coordonnées

RGNC Lambert NC / NGNC
 X: 443928.79
 Y: 214858.64
 Altitude GPS: 7.1 m

Forage:

PU1

Date de début:

03/03/2024

Opérateur:

GM/HL

Prof. (m)	Figuré	Description	Niveaux d'eau (m)	Catégorie de prélèvement
- 0.3		Sable graveleux noir, sec		
- 0.7		Grave sableuse marron, sec		
		Refus à 0.7 m		

Pénétromètre Geo Deep Drill

Norme NF EN ISO 22476-2

Forage

EP2

Opérateur

GM/HL

Eléments de l'affaire

 Client
 SECAL
 Dossier
 AF23-0806

Description du dossier

Mission G2 PRO

Chantier

Nouvel ouvrage de Nouville Y

Observation

Refus à 0.8 m

Cote début

0 m

Date de début

03/03/2024

Cote fin

0.8 m

Date de fin

03/03/2024

Coordonnées

RGNC Lambert NC / NGNC Masse Marteau : 63.37 kg

X

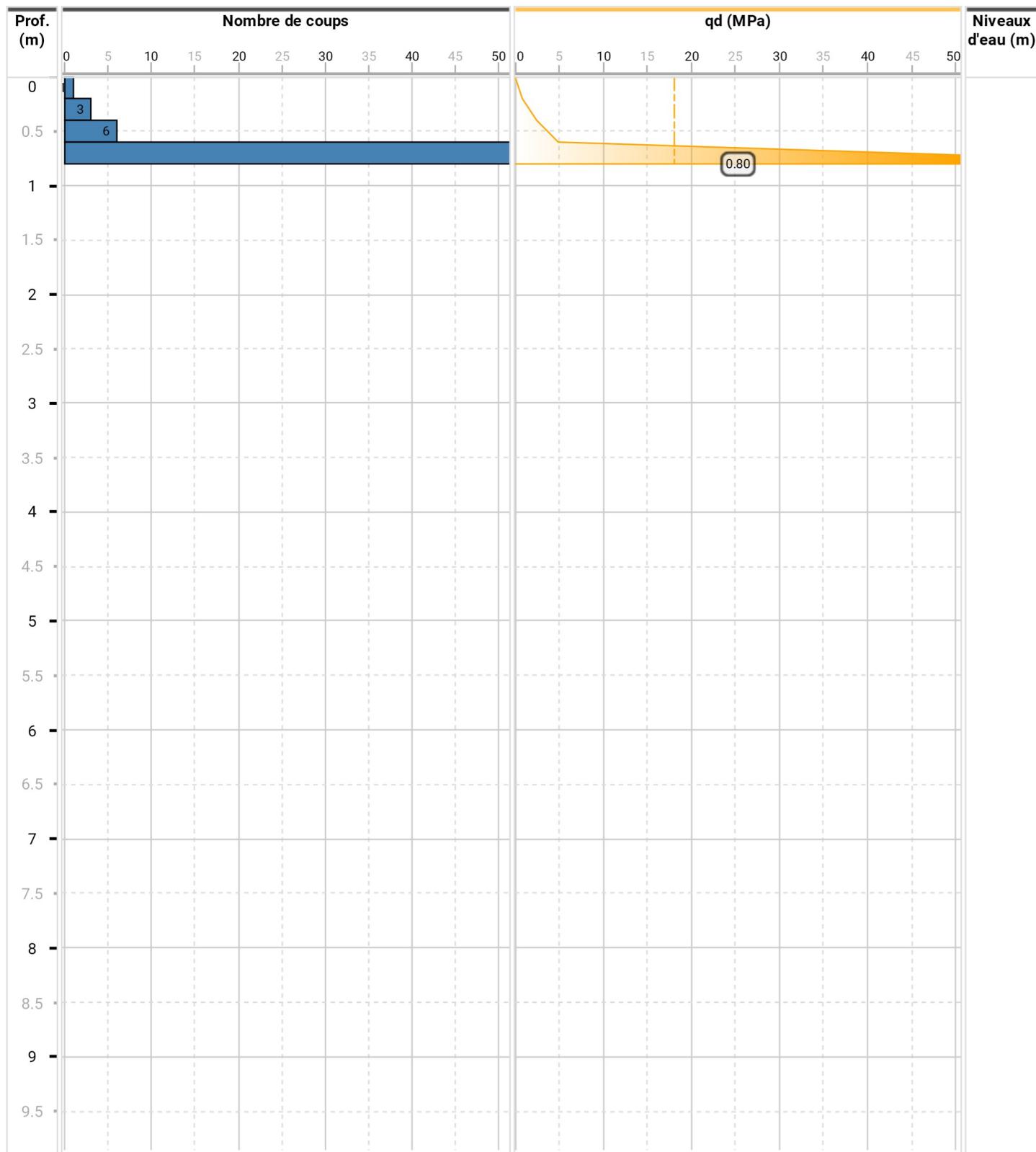
444039.69

Masse Enclume : 29.85 kg

Masse Tige : 6.77 kg

Masse Pointe : 0.65 kg

Hauteur de chute : 0.75 m

 Section de Pointe : 20 cm²
Caractéristiques


Pénétromètre Geo Deep Drill

Norme NF EN ISO 22476-2

Forage

EP2bis

Opérateur

GM/HL

Eléments de l'affaire

 Client
SECAL
Dossier
AF23-0806

 Description du dossier
Mission G2 PRO
Chantier
Nouvel ouvrage de Nouville Y
Observation
Refus à 5.8 m

 Cote début
0 m

 Date de début
03/03/2024

Cote fin

5.8 m

Date de fin

03/03/2024

Coordonnées

 RGNC Lambert NC / NGNC
Masse Marteau : 63.37 kg
X
444039.69
Y
214900.50
Observation
Refus à 5.8 m
Altitude GPS
2.3 m

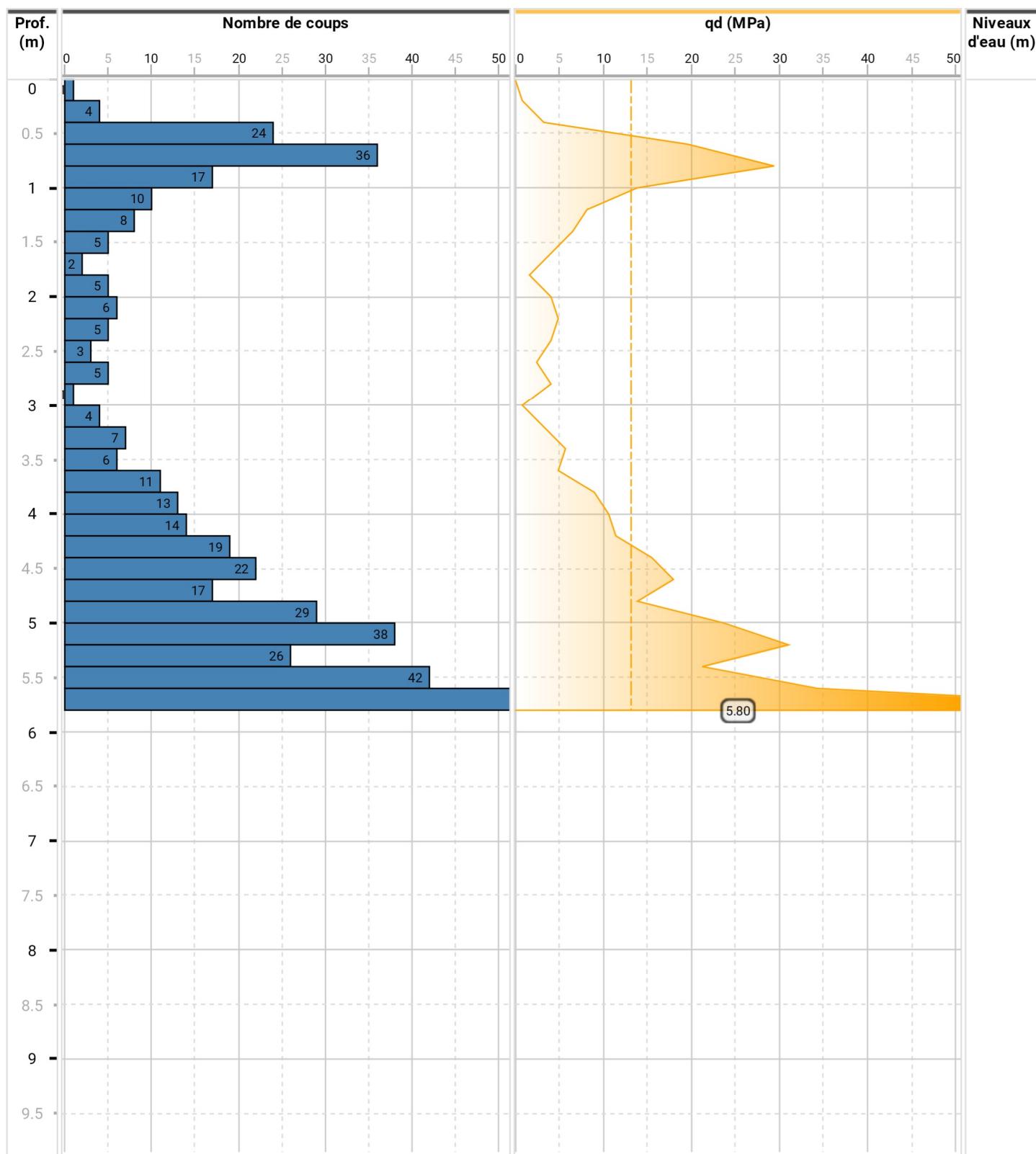
Caractéristiques

Masse Enclume : 29.85 kg

Masse Tige : 6.77 kg

Masse Pointe : 0.65 kg

Hauteur de chute : 0.75 m

 Section de Pointe : 20 cm²


MESURES DE DEFLEXION - DEFLECTOMETRE

NF P 98-200-2



PV IS-24-03/06

CHANTIER : Reconstruction du pont de Nouville

Situation des essais : Voir Plan

N° d'affaire : AF23-0806 - G/G

Date : 22/03/2024

SENS DES MESURE : Nouméa vers Nouville

Technicien : GM / FK

PAS DE MESURE : Tous les 20 m			SYNTHESE			PAS DE MESURE : Tous les 20 m retour			SYNTHESE		
Vn°1 - Rue BABO						V n°2 Avenue J.COOK					
N° Essai	N° PR	Déflexion 1/100 mm				N° Essai	N° PR	Déflexion 1/100 mm			
1	0	12	1	5	10	7	0	16	1	5	10
2	20	11	2	5	10	8	20	13	2	5	10
3	40	12	3	5	10	9	40	21	3	5	10
4	60	12	4	5	10	10	60	22	4	5	10
5	80	13	5	5	10	11	80	21	5	5	10
6	100	16	6	5	10	12	100	13	6	5	10
7						13	120	20	7		
8						14	140	12	8		
9						15	160	25	9		
10						16	180	8	10		
11						17	200	6	11		
12						18	220	13	12		
13									13		
14									14		
15									15		
16									16		
17									17		
18									18		
19									19		
20									20		
21											

Valeur critique d=100/100 mm

Tableau de SYNTHESE

Sens	Vn°1	Vn°2	Vn°3
Moyenne	12.7	15.8	17.6
Ecart-type	1.8	6.0	7.8
Déf. Car.	16.2	27.7	33.3
Nbre valeurs	6	12	5
CLASSE	D1	D2	D2
Valeur min.	11	6	12
Valeur max.	16	25	31

Responsable laboratoire

Quentin VINCENT

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception - Phase Avant-projet (G2 AVP)	Annexes	

Annexe 4 : Essais de déflexions

MESURES DE DEFLEXION - DEFLECTOMETRE

NF P 98-200-2



PV IS-24-03/06

CHANTIER : Reconstruction du pont de Nouville

Situation des essais : Voir Plan

N° d'affaire : AF23-0806 - G/G

Date : 22/03/2024

SENS DES MESURE : Nouméa vers Nouville

Technicien : GM / FK

PAS DE MESURE : Tous les 20 m			SYNTHESE			PAS DE MESURE : Tous les 20 m retour			SYNTHESE		
Vn°1 - Rue BABO						V n°2 Avenue J.COOK					
N° Essai	N° PR	Déflexion 1/100 mm				N° Essai	N° PR	Déflexion 1/100 mm			
1	0	12	1	5	10	7	0	16	1	5	10
2	20	11	2	5	10	8	20	13	2	5	10
3	40	12	3	5	10	9	40	21	3	5	10
4	60	12	4	5	10	10	60	22	4	5	10
5	80	13	5	5	10	11	80	21	5	5	10
6	100	16	6	5	10	12	100	13	6	5	10
7						13	120	20	7		
8						14	140	12	8		
9						15	160	25	9		
10						16	180	8	10		
11						17	200	6	11		
12						18	220	13	12		
13									13		
14									14		
15									15		
16									16		
17									17		
18									18		
19									19		
20									20		
21											

Valeur critique d=100/100 mm

Tableau de SYNTHESE

Sens	Vn°1	Vn°2	Vn°3
Moyenne	12.7	15.8	17.6
Ecart-type	1.8	6.0	7.8
Déf. Car.	16.2	27.7	33.3
Nbre valeurs	6	12	5
CLASSE	D1	D2	D2
Valeur min.	11	6	12
Valeur max.	16	25	31

Responsable laboratoire

Quentin VINCENT

	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	<i>Indice : 01</i> 17 Avril 2024	 
	Mission géotechnique de conception - Phase Avant-projet (G2 AVP)	<i>Annexes</i>	

Annexe 5 : Analyses en laboratoire

IDENTIFICATION DE MATERIAUX



ANALYSE GRANULOMETRIQUE

- Méthode par tamisage à sec après lavage NF P94-056 (03/1996)
VALEUR AU BLEU DE METHYLENE NF P94-068 (10/1998)
TENEUR EN EAU PAR ETUVAGE NF P94-050 (09/1995)

PROCÈS VERBAL S/24-04-01

Réf: PV S-03

DOSSIER

Titre de l'affaire : Ouvrage d'Art de Nouville
N° affaire : AF23-0806

REFÉRENCES DE L'ECHANTILLON

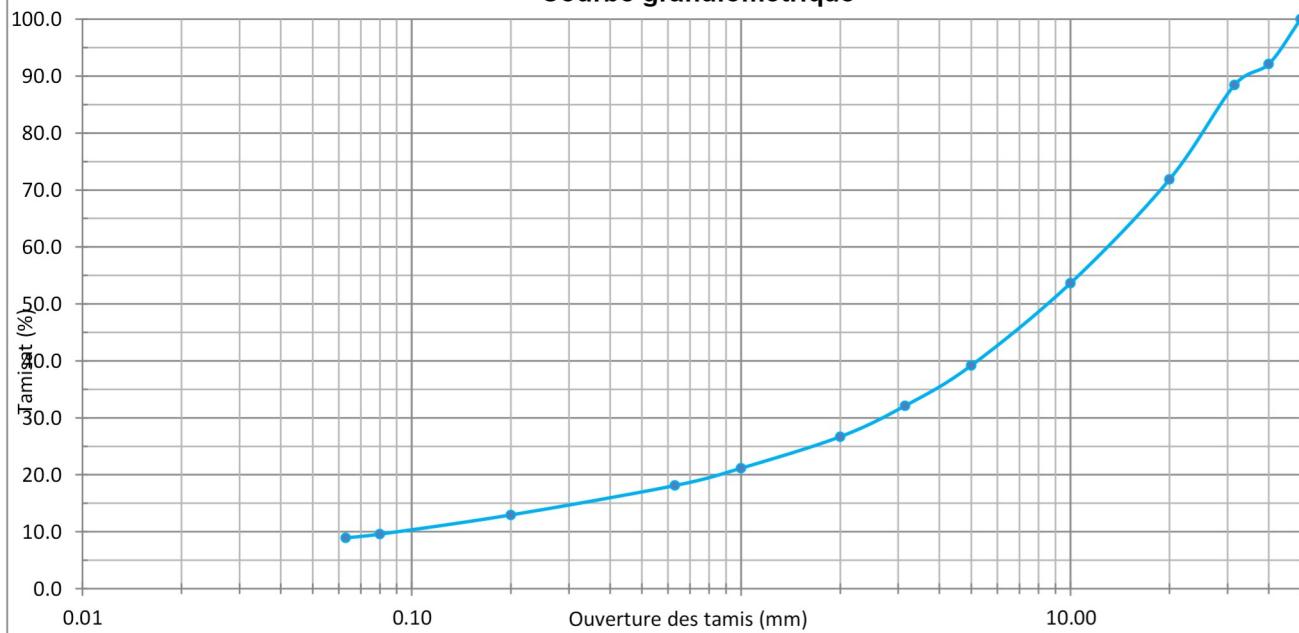
Nature de l'échantillon : Grave sableuse Sondage n° : PU 1
N° de l'échantillon : S24-10 Profondeur de : 0 à 0.70m
Date de prélèvement : 28 février 2024 Mode de prélèvement : Puit à la pelle hydraulique
Lieu de prélèvement : site Conditions de conservation : Sac hermétiquement fermé

ESSAI

Date d'essai : 25 mars 2024 Teneur en eau W : 8.1%
T° étuvage : 105°C Dmax : 124 mm
 50°C Fraction 0/50 mm : 95.2% VBS : 0.3 g de bleu pour 100g de sol sec

Tamis (mm)		50	40	31.5	20	10	5	3.15	2	1	0.63	0.20	0.080	0.063
% Passants		100	92	88	72	54	39	32	27	21	18	13	9.6	8.9

Courbe granulométrique



Silts

Sables fins

Sables moyens

Sables grossiers

Graviers

Galets et cailloux

Classification selon C.K WENTWORTH

OBSERVATIONS

LE RESPONSABLE DU LABORATOIRE

G.NDJOUNTCHE



	Construction du nouvel ouvrage d'Art de Nouville – Commune de NOUMEA	Indice : 01 17 Avril 2024	
	Mission géotechnique de conception - Phase Avant-projet (G2 AVP)	<i>Nota</i>	

OBSERVATIONS SUR L'UTILISATION DU RAPPORT

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable; en conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou reproduction partielle de ce rapport et annexes ainsi que toute interprétation au-delà des indications et énonciations de la société A2EP ne saurait engager la responsabilité de celle-ci.

Les conclusions du présent rapport sont valables pour une durée maximum de deux ans, sous réserve de l'absence de modifications ou travaux concernant la zone du projet ou ses avoisinants. Au-delà ou en cas de modifications ou travaux concernant la zone du projet ou ses avoisinants, nous vous recommandons de faire réaliser par un bureau d'étude spécialisé une mission visant à évaluer les éventuelles évolutions des conditions géologiques et environnementales et leurs conséquences sur le projet.

4 ANNEXE 4 : LISTE POISSONS DEXEN JANVIER 2018

VIII.4 Annexe : liste des espèces de poissons observées en janvier 2018 et caractéristiques biologiques

Annotations - C : carnivore / H : herbivore / P : piscivore / Z : planctonophage / nc : non-commercial / c : commercial

Famille	Genre	Espèce	Groupe trophique	Potentiel commercial
ACANTHURIDAE	Acanthurus	blochii	H	c
ACANTHURIDAE	Acanthurus	dussumieri	H	c
ACANTHURIDAE	Acanthurus	grammoptilus	H	c
ACANTHURIDAE	Acanthurus	nigricauda	H	c
ACANTHURIDAE	Acanthurus	nigrofucus	H	c
ACANTHURIDAE	Acanthurus	sp	H	c
ACANTHURIDAE	Ctenochaetus	binotatus	H	c
ACANTHURIDAE	Ctenochaetus	striatus	H	c
ACANTHURIDAE	Zebrasoma	scopas	H	nc
ACANTHURIDAE	Zebrasoma	veliferum	H	nc
APOGONIDAE	Archamia	fucata	Z	nc
APOGONIDAE	Archamia	sp	Z	nc
APOGONIDAE	Cheilodipterus	quinquelineatus	P	nc
APOGONIDAE	Ostorhinchus	compressus	Z	nc
APOGONIDAE	Ostorhinchus	cyanosoma	Z	nc
APOGONIDAE	Ostorhinchus	doederleini	Z	nc
APOGONIDAE	Ostorhinchus	norfolcensis	Z	nc
APOGONIDAE	Zoramia	leptacantha	Z	nc
BALISTIDAE	Balistoides	viridescens	C	nc
BLENNIIDAE	Atrosalarias	holomelas	H	nc
BLENNIIDAE	Ecsenius	bicolor	H	nc
BLENNIIDAE	Meiacanthus	atrodorsalis	C	nc
BLENNIIDAE	Plagiotremus	rhinorhynchos	P	nc
CAESIONIDAE	Caesio	caeruleaurea	Z	c
CAESIONIDAE	Caesio	cuning	Z	c
CENTRISCIDAE	Aeoliscus	strigatus	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	auriga	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	baronessa	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	bennetti	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	citrinellus	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	ephippium	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	flavirostris	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	lineolatus	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	lunulatus	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	melannotus	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	mertensii	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	plebeius	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	trifascialis	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	ulietensis	C	nc
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	vagabundus	C	nc
CHAETODONTIDAE	Coradion	altivelis	C	nc
CHAETODONTIDAE	Heniochus	acuminatus	C	nc
CHAETODONTIDAE	Heniochus	chrysostomus	C	nc
CHAETODONTIDAE	Heniochus	monoceros	C	nc
CHAETODONTIDAE	Heniochus	singularis	C	nc
CHAETODONTIDAE	Microcanthus	strigatus	C	nc

GOBIESOCIDAE	Diademichthys	lineatus	C	nc
GOBIIDAE	Amblygobius	nocturnus	C	nc
GOBIIDAE	Amblygobius	phalaena	C	nc
GOBIIDAE	Astropteryx	semipunctatus	H	nc
GOBIIDAE	Cryptocentrus	strigilliceps	C	nc
GOBIIDAE	Exyrias	bellissimus	C	nc
GOBIIDAE	Fusigobius	signipinnis	C	nc
GOBIIDAE	Gobiodon	citrinus	C	nc
GOBIIDAE	Gobiodon	okinawae	C	nc
GOBIIDAE	Istigobius	decoratus	C	nc
GOBIIDAE	Istigobius	sp	C	nc
GOBIIDAE	Olopomus	caninoides	C	nc
GOBIIDAE	Oxyurichthys	papuensis	C	nc
GRAMMISTIDAE	Diploprion	bifasciatum	C	nc
HAEMULIDAE	Plectorhinchus	chaetodonoides	C	c
HOLOCENTRIDAE	Myripristis	violacea	Z	c
HOLOCENTRIDAE	Neoniphon	sammara	C	c
LABRIDAE	Bodianus	axillaris	C	nc
LABRIDAE	Cheilinus	chlorourus	C	c
LABRIDAE	Cheilinus	trilobatus	C	c
LABRIDAE	Choerodon	graphicus	C	c
LABRIDAE	Coris	batuensis	C	nc
LABRIDAE	Epibulus	insidiator	C	c
LABRIDAE	Gomphosus	varius	C	nc
LABRIDAE	Halichoeres	melanurus	C	nc
LABRIDAE	Halichoeres	richmondi	C	nc
LABRIDAE	Hemigymnus	melapterus	C	nc
LABRIDAE	Labrichthys	unilineatus	C	nc
LABRIDAE	Labroides	dimidiatus	C	nc
LABRIDAE	Stethojulis	sp	C	nc
LABRIDAE	Stethojulis	strigiventer	C	nc
LABRIDAE	Thalassoma	hardwicke	C	nc
LABRIDAE	Thalassoma	lunare	C	nc
LABRIDAE	Thalassoma	lutescens	C	nc
LETHRINIDAE	Lethrinus	atkinsoni	C	c
LETHRINIDAE	Lethrinus	harak	C	c
LUTJANIDAE	Lutjanus	fulviflamma	C	c
LUTJANIDAE	Lutjanus	fulvus	C	c
LUTJANIDAE	Lutjanus	gibbus	C	c
LUTJANIDAE	Lutjanus	monostigma	P	nc
MICRODESMIDAE	Ptereleotris	microlepis	Z	nc
MONACANTHIDAE	Oxymonacanthus	longirostris	C	nc
MUGILOIDIDAE	Parapercis	australis	C	nc
MUGILOIDIDAE	Parapercis	clathrata	C	nc
MUGILOIDIDAE	Parapercis	hexophtalma	C	nc
MUGILOIDIDAE	Parapercis	sp	C	nc
MULLIDAE	Mulloidichthys	flavolineatus	C	c
MULLIDAE	Parupeneus	barberinus	C	c
MULLIDAE	Parupeneus	ciliatus	C	c
MULLIDAE	Parupeneus	indicus	C	c
MULLIDAE	Parupeneus	multifasciatus	C	nc
MULLIDAE	Upeneus	tragula	C	nc
NEMIPTERIDAE	Scolopsis	bilineata	C	nc
NEMIPTERIDAE	Scolopsis	ciliata	C	nc
OSTRACIIDAE	Ostracion	cubicus	C	nc
PLESIOPIDAE	Assessor	macneili	C	nc
POMACANTHIDAE	Centropyge	bispinosus	H	nc
POMACANTHIDAE	Centropyge	tibicen	H	nc

POMACANTHIDAE	Pomacanthus	sexstriatus	C	nc
POMACENTRIDAE	Abudefduf	sexfasciatus	Z	nc
POMACENTRIDAE	Abudefduf	whitleyi	Z	nc
POMACENTRIDAE	Amblyglyphidodon	curacao	Z	nc
POMACENTRIDAE	Amblyglyphidodon	orbicularis	Z	nc
POMACENTRIDAE	Amphiprion	akindynos	Z	nc
POMACENTRIDAE	Amphiprion	clarkii	Z	nc
POMACENTRIDAE	Amphiprion	melanopus	Z	nc
POMACENTRIDAE	Cheiloprion	labiatus	C	nc
POMACENTRIDAE	Chromis	atripectoralis	Z	nc
POMACENTRIDAE	Chromis	viridis	Z	nc
POMACENTRIDAE	Chrysiptera	rollandi	Z	nc
POMACENTRIDAE	Chrysiptera	taupou	Z	nc
POMACENTRIDAE	Dascyllus	aruanus	Z	nc
POMACENTRIDAE	Hemiglyphidodon	plagiometopon	H	nc
POMACENTRIDAE	Neoglyphidodon	melas	C	nc
POMACENTRIDAE	Neoglyphidodon	nigroris	H	nc
POMACENTRIDAE	Neoglyphidodon	polyacanthus	H	nc
POMACENTRIDAE	Neopomacentrus	azysron	Z	nc
POMACENTRIDAE	Neopomacentrus	nemurus	Z	nc
POMACENTRIDAE	Pomacentrus	adelus	H	nc
POMACENTRIDAE	Pomacentrus	aurifrons	Z	nc
POMACENTRIDAE	Pomacentrus	bankanensis	H	nc
POMACENTRIDAE	Pomacentrus	brachialis	Z	nc
POMACENTRIDAE	Pomacentrus	moluccensis	Z	nc
POMACENTRIDAE	Pomacentrus	nagasakiensis	Z	nc
POMACENTRIDAE	Stegastes	nigricans	H	nc
POMACENTRIDAE	Stegastes	punctatus	H	nc
SCARIDAE	Chlorurus	sordidus	H	c
SCARIDAE	Scarus	ghobban	H	c
SCARIDAE	Scarus	rivulatus	H	c
SCARIDAE	Scarus	schlegeli	H	c
SERRANIDAE	Cephalopholis	boenak	P	c
SERRANIDAE	Epinephelus	hexagonatus	P	c
SERRANIDAE	Epinephelus	maculatus	C	c
SERRANIDAE	Plectropomus	leopardus	P	c
SERRANIDAE	Pseudanthias	squamipinnis	Z	nc
SIGANIDAE	Siganus	argenteus	H	c
SIGANIDAE	Siganus	corallinus	H	c
SIGANIDAE	Siganus	doliatus	H	c
SIGANIDAE	Siganus	fuscescens	H	c
SIGANIDAE	Siganus	puellus	H	c
SPARIDAE	Acanthopagrus	berda	C	c
SPHYRAENIDAE	Sphyraena	flavicauda	P	c
SYNGNATHIDAE	Corythoichthys	haematopterus	C	nc
SYNODONTIDAE	Saurida	gracilis	P	nc
TETRAODONTIDAE	Canthigaster	compressa	C	nc
TETRAODONTIDAE	Canthigaster	valentini	C	nc
ZANCLIDAE	Zanclus	cornutus	C	nc



Développement & Expertise
en Environnement



Juillet 2022

SUIVI ENVIRONNEMENTAL DES ZONES RÉCIFALES AU SEIN DU DOMAINE MARITIME DU PORT AUTONOME DE NOUVELLE-CALÉDONIE

CAMPAGNE 2022 : ANALYSE DES ÉVOLUTIONS 2021-2022

RAPPORT FINAL



Auteurs principaux :

N. GUILLEMOT (DEXEN)
A. GILBERT & T. HEINTZ (GINGER-SOPRONER)

Commanditaire :



DEXEN SARL | K BIS : RCS NOUMEA 2014 B 1232339

Immeuble Carcopino 3000, 85 avenue du Général De Gaulle

✉ : BP 32401, 98 897 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie

📞 : +687 45 76 07 | +687 96 79 91

✉ : nicolas.guillemot@dexen-nc.com

Contrat PANC-DEXEN N° :

DX-2019-093C

Intervenants

La présente étude a été pilotée et réalisée par la société DEXEN, en collaboration avec la société GINGER-SOPRONER (pour la mission d'observations *in situ* et l'expertise des invertébrés benthiques).

Auteurs principaux



Nicolas GUILLEMOT

DEXEN | BP 32401, 98 897 Nouméa | Nouvelle-Calédonie
Email : nicolas.guillemot@dexen-nc.com



Antoine GILBERT

Tom HEINTZ

GINGER SOPRONER | BP 3583, 98 846 Nouméa | Nouvelle-Calédonie
Email : antoine.gilbert@soproner.nc

Responsabilité

Le présent document a été établi sur la base des informations fournies à DEXEN et à ses collaborateurs, ainsi que des observations et données collectées et/ou disponibles. La société DEXEN ne pourra être tenue responsable si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Le commanditaire de l'étude utilisera les éléments présentés dans le présent document intégralement ou, à défaut, de manière objective. Toute modification ou utilisation partielle (extraits, résumés) sera faite sous la seule et entière responsabilité du commanditaire.

Les avis et recommandations formulés par DEXEN et ses collaborateurs dans le cadre des prestations qui leur sont confiées ont une vocation consultative et d'aide à la décision, leur responsabilité ne peut donc en aucun cas se substituer à celle du décideur.

Citation du document

Guillemot N, Gilbert A, Heintz T (2022) *Suivi environnemental des zones récifales au sein du domaine maritime du Port Autonome de Nouvelle-Calédonie - Campagne 2021. Rapport d'étude scientifique PANC, 79 pages.*

RESUME EXECUTIF

Suite à un état de référence environnemental du milieu marin dans son domaine maritime de Nouméa en 2018, le Port Autonome de Nouvelle-Calédonie (PANC) a initié depuis 2020 un suivi environnemental annuel composé de stations sentinelles représentatives des principales zones récifales. Étant donnée la forte valeur patrimoniale des milieux récifaux mis en évidence lors de l'état de référence, ce suivi s'inscrit dans les objectifs du PANC d'intégrer les enjeux écologiques et énergétiques dans sa programmation stratégique de long terme et d'anticiper au mieux les considérations environnementales liées à son fonctionnement et à ses projets de développement.

Ce réseau de stations sentinelles concerne la composante biologique du milieu et porte plus spécifiquement sur les écosystèmes de récifs coralliens (porteurs des principaux enjeux écologiques sur cette zone).

Le suivi se focalise notamment sur les trois principales composantes de ces écosystèmes :

- Les habitats coralliens (recouvrement en coraux vivants, en algues, etc.) ;
- La faune macro-invertébrée (mollusques, crustacés, etc.) ;
- L'ichtyofaune (poissons).

Le plan de suivi se fonde sur 14 stations d'observation *in situ* (6 stations en Grade Rade, 2 stations en Petite Rade, 4 stations en sorties de rades, et 2 stations de référence), échantillonées annuellement en janvier-février.

Suite à une première campagne réalisée en 2020 sur la base d'une méthodologie standardisée et de l'installation *in situ* de stations de suivi fixes, la campagne de 2021 avait permis la mise en place d'une démarche analytique complète qui permet désormais de suivre annuellement l'évolution des zones récifales du PANC et de rechercher d'éventuels signaux de changements de ses écosystèmes patrimoniaux dans les différentes zones suivies. La campagne 2022 permet désormais de disposer d'un recul de trois ans sur les évolutions des zones récifales du PANC, et se focalise notamment sur leur évolution récente de 2021 à 2022.

Habitats coralliens

Les habitats retrouvés dans les différentes zones présentent une structure essentiellement constituée d'alternances entre coraux scléractiniaires et turf algal en proportions variables, et ont montré des profils cohérents avec ceux mis en évidence lors des précédentes campagnes (2020 et 2021). Le recouvrement en coraux durs est apparu significatif sur l'ensemble des zones, allant d'environ 10 % en moyenne en sortie de Petite Rade à plus de 40 % en moyenne en Grande Rade.

En Grande Rade, le profil d'habitat dominant correspond à un recouvrement corallien relativement important et fortement dominé par les coraux massifs, s'altérant progressivement vers le fond de la baie (dominance accrue des substrats sablo-vaseux et des peuplements algues). Dans cette zone, les analyses statistiques et graphiques réalisées selon une approche *Control-Impact* n'ont détecté aucun signal d'impact significatif sur la période 2020-2022 et mettent en évidence une bonne stabilité des habitats coralliens locaux.

En Petite Rade, les habitats sont contrastés : la zone interne de l'îlot Brun présente des substrats durs et des peuplements coralliens majoritairement branchus, tandis que la station Chaux correspond à une zone de substrat sablo-vaseux essentiellement peuplée de coraux mous. Le système plus fermé, moins étendu, et potentiellement plus anthropisé de la Petite Rade suggère des habitats plus pauvres mais également plus variables qu'en Grande Rade. Les analyses statistiques et graphiques réalisées

selon une approche *Control-Impact* n'y ont détecté aucun signal d'impact sur la période 2020-2022 et mettent en évidence une bonne stabilité des habitats coralliens.

En sorties de rades, il s'agit d'écosystèmes de transition entre les rades et le lagon plus ouvert, engendrant des habitats plus diversifiés et relativement riches. En sortie de Grande Rade, une dégradation importante avait été observée en 2021 sur la station Freycinet suite aux effets du cyclone Lucas. En 2022, les effets de cette perturbation ponctuelle persistent, tandis que l'autre station de la zone est restée stable. En sortie de Petite Rade, les analyses statistiques et graphiques réalisées sur les données 2020 et 2021 n'avaient pas détecté de signal de changement notable, en revanche les données 2022 indiquent une dégradation des habitats dans cette zone, manifestement reliée aux épisodes météorologiques violents survenus fin 2021 et début 2022 (perturbation mécanique sur ces stations directement exposées).

Enfin, la station située sur le Banc des Japonais est constituée majoritairement de vase et de monticules de rochers/coraux morts (présents ponctuellement et pouvant être colonisés par des coraux, éponges, bivalves, ou holothuries). La densité de coraux vivants reste très faible et se limite à la présence de rares individus de petite taille sur les blocs rocheux, parmi lesquels on retrouve notamment l'espèce endémique *Cantharellus noumeae*. Les évaluations qualitatives menées sur cette zone n'ont pas fait apparaître d'évolutions majeures entre 2020 et 2022.

Faune macro-invertébrée benthique

Sur l'ensemble des zones, l'abondance est fortement dominée par un petit nombre d'espèces, notamment des Mollusques et des Échinodermes. Les Crustacés et les Vers sont globalement apparus peu abondants. La structure de la faune invertébrée au niveau des deux rades présente une certaine vitalité tout en étant typique des milieux de fond de baie.

L'approche analytique *Control-Impact* sur les paramètres de richesses spécifiques et de densités en Grande Rade et en Petite Rade démontrent, malgré quelques fluctuations mineures, une absence de signal de dégradation dans ces deux zones entre 2020 et 2022.

L'analyse de l'évolution temporelle de ces mêmes paramètres dans les deux zones de sorties de rades indique également une bonne stabilité de la faune invertébrée entre 2020 et 2022. Contrairement aux observations réalisées sur les habitats et l'ichtyofaune, les signaux de perturbation observés sur la station Freycinet en sortie de Grande Rade en 2021 n'ont pas persisté en 2022, la faune invertébrée montrant des signes de récupération dès 2022.

Ichtyofaune (poissons)

En cohérence avec les observations réalisées lors des deux premières campagnes de suivi, l'ichtyofaune retrouvée en 2022 dans les différentes zones correspond à des peuplements modérément diversifiés et caractéristiques de récifs frangeants de baies : dominance des planctonophages, forte contribution des Pomacentridae, densité et richesse spécifique dominées par un petit nombre de familles taxonomiques.

En Grande Rade et en Petite Rade, les analyses statistiques et graphiques réalisées selon une approche *Control-Impact* sur les données 2020-2022 n'ont détecté aucun signal de changement sur cette période de suivi, et mettent en évidence une bonne stabilité de l'ichtyofaune récifale dans cette zone.

En sortie de Grande Rade, les observations 2022 indiquent une inertie dans les variations déjà observées entre 2020 et 2021 (principalement sur la station FREYCINET et en lien avec la perturbation des habitats mentionnée précédemment).

En sortie de Petite Rade, des changements plus structurels ont été observés en 2022 et indiquent une dégradation de l'état de santé moyen de l'ichtyofaune sur les deux stations de cette zone, et

notamment devant l'îlot Brun, en lien avec les perturbations d'origines naturelles constatées également sur les habitats.

Bilan

L'analyse des données 2022 a permis d'examiner de manière détaillée les évolutions des écosystèmes récifaux sur l'ensemble des stations d'observations, échantillonnées selon une méthodologie d'inventaire standardisée et complète.

Le plan d'échantillonnage réalisé a permis de mettre en œuvre avec succès les démarches analytiques nécessaires à un diagnostic complet des évolutions interannuelles de ces écosystèmes d'intérêt patrimonial dans le domaine du PANC. La possibilité de disposer d'une zone de référence apparaît comme un atout indispensable pour l'implémentation d'un schéma d'analyse *Control-Impact* qui devra impérativement être poursuivi sur le long terme.

Plus généralement, aux vues des évolutions constatées sur les trois premières années de suivi et des enjeux environnementaux forts associés aux zones récifales suivis (dans l'absolu mais également au regard des grands projets de travaux en grande et petite rades), il est fortement recommandé d'assurer sa continuité sur le long terme et de poursuivre ce suivi *a minima* en l'état.

TABLE DES MATIÈRES

I	INTRODUCTION	11
II	MATERIELS ET METHODES	12
II.1	Démarche générale pour le suivi biologique des zones récifales.....	12
II.2	Plan d'échantillonnage.....	12
II.2.1	<i>Zones d'étude</i>	12
II.2.2	<i>Nombre et répartition des stations</i>	13
II.2.3	<i>Structuration d'une station d'observation</i>	13
II.3	Réalisation de la campagne de suivi 2021	14
II.4	Approche analytique globale	15
II.5	Description et analyse des évolutions des habitats coralliens	17
II.5.1	<i>Protocole in situ.....</i>	17
II.5.2	<i>Traitements des données.....</i>	18
II.5.3	<i>Approche analytique Contrôle-Impact pour la recherche de changements dans les zones de rades</i>	19
II.5.4	<i>Analyse de l'évolution temporelle des zones adjacentes (sorties de rades).....</i>	20
II.6	Description et analyse des évolutions de la faune invertébrée macrobenthique	20
II.6.1	<i>Protocole in situ.....</i>	20
II.6.2	<i>Traitements des données.....</i>	21
II.6.3	<i>Description générale de la faune macrobenthique par zone en 2022.....</i>	21
II.6.4	<i>Évolution de la faune macrobenthique par zone à l'échelle des communautés entre 2020 et 2022.....</i>	22
II.6.5	<i>Approche analytique Contrôle-Impact pour la recherche de changements dans les zones de rades</i>	22
II.6.6	<i>Analyse de l'évolution temporelle des zones adjacentes (sorties de rades).....</i>	23
II.6.7	<i>Genres d'invertébrés remarquables</i>	24
II.7	Description et analyse des évolutions de l'ichtyofaune	24
II.7.1	<i>Protocole in situ.....</i>	24
II.7.2	<i>Traitements des données.....</i>	25
II.7.3	<i>Description générale de l'ichtyofaune par zone en 2022</i>	27
II.7.4	<i>Approche analytique Contrôle-Impact pour la recherche de changements dans les zones de rades</i>	27
II.7.5	<i>Analyse de l'évolution temporelle des zones adjacentes (sorties de rades).....</i>	28

III EVOLUTIONS DES HABITATS CORALLIENS	29
III.1 Description générale des habitats coralliens par zone en 2022	29
III.2 Analyses Contrôle-Impact pour la recherche de changements dans les zones de rades	31
III.3 Analyse des évolutions temporelles dans les zones de sorties de grande rade et de petite rade	34
IV EVOLUTIONS DE LA FAUNE INVERTEBREE MACROBENTHIQUE	36
IV.1 Description générale par zone en 2022	36
IV.1.1 Densité à l'échelle des communautés	36
IV.1.2 Densité à l'échelle des groupes & richesse spécifique	37
IV.1 Évolution du macrobenthos à l'échelle des communautés par zone entre 2020 et 2022	38
IV.2 Analyses Contrôle-Impact pour la recherche de changements dans les zones de rades	39
IV.2.1 Richesse spécifique	39
IV.2.2 Densité par groupes	40
IV.2.3 Densité de genres remarquables	42
IV.3 Analyse des évolutions temporelles dans les zones de sorties de grande rade et de petite rade	42
IV.3.1 Richesse spécifique	42
IV.3.2 Densité par groupes	43
IV.3.3 Densité de genres remarquables	45
V EVOLUTIONS DE L'ICHTYOFaUNE	47
V.1 Description générale de l'ichtyofaune par zone en 2022	47
V.2 Analyses Contrôle-Impact pour la recherche de changements dans les zones de rades	48
V.3 Analyse des évolutions temporelles dans les zones de sorties de grande rade et de petite rade	53
VI EVALUATION QUALITATIVE DE LA ZONE DU BANC DES JAPONAIS	59
VII CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	61
VI.1 Habitats coralliens	61
VI.2 Invertébrés macrobenthiques	62
VI.3 Ichtyofaune	62
VI.4 Perspectives pour la poursuite du suivi	63

VIII ANNEXES 65

VII.1	Annexe 1 : Évolution des densités et richesses spécifiques d'invertébrés par station	66
VII.1.1	<i>Analyses CI - Grande rade et petite rade</i>	66
VII.1.2	<i>Evolutions temporelles - sorties de rades</i>	68
VII.1	Annexe 2 : Évolution des densités d'invertébrés par sous-groupe	70
VII.1.1	<i>Par zone</i>	70
VII.1.2	<i>Par station</i>	71
VII.2	Annexe 3 : Liste des espèces de poissons récifaux observées lors de la campagne 2022 et caractéristiques biologiques	73
VII.3	Annexe 4 : Références bibliographiques	76

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Figure 1 : Navire d'opération technique et scientifique RAIRA (gauche) et plongeurs biologistes à proximité du Banc des Japonais (droite). Source : DEXEN.	14
Figure 2 : Positionnement des 14 stations de suivi récifal mises en place à partir de 2020	16
Figure 3 : Illustration de la méthode du <i>Line Intercept Transect</i> (LIT, English et al. 1997), pour la description des habitats récifo-lagonaires (Source : Kulbicki 2006)	17
Figure 4 : Illustration de la technique du <i>Belt Transect</i> (Source : Hill et al. 2004)	21
Figure 5 : Déroulement schématique d'un comptage en plongée selon la méthode des transects à largeur variable (Source : Labrosse et al. 2001)	25
Figure 6 : Composition, par morphotype, des communautés coralliniennes pour chacune des zones en 2022.	31
Figure 7 : Représentation graphique de l'évolution des paramètres décrivant les habitats coralliens entre 2020 et 2022, pour les deux rades et la zone de référence. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes	33
Figure 8 : Représentation graphique des variations des paramètres décrivant les habitats benthiques entre 2020 et 2022, pour les sorties des deux rades. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes	35
Figure 9 : Haut : Résultats de l'OCP sur les données de densité par genre moyennées par station (les deux axes représentent 55,4% de l'inertie du jeu de données). Bas : dendrogramme de classification	36
Figure 10 : Composition de la densité moyenne d'invertébrés par zone (ind./ha) en 2022	37
Figure 11 : Haut : Résultats de l'OCP sur les données de densité par genre moyennées par station (les deux axes représentent 45,4% de l'inertie du jeu de données). Bas : dendrogramme de classification	38
Figure 12 : Évolution de la richesse spécifique moyenne d'invertébrés par zone pour l'analyse de type CI entre 2020 et 2022	39
Figure 13 : Évolution de la densité moyenne par groupe et par zone pour l'analyse de type CI entre 2020 et 2022	40
Figure 14 : Densité élevée d'oursins diadèmes (<i>Diadema setosum</i>) sur les transects de la station Nbi (Grande rade)	41
Figure 15 : Évolution de la densité moyenne des espèces remarquables par zone pour la grande rade, petite rade et la zone de référence	42
Figure 16 : Évolution de la richesse spécifique moyenne d'invertébrés par zone entre 2020 et 2022	43
Figure 17 : Évolution de la densité moyenne par groupe et par zone en sortie de grande rade et sortie de petite rade entre 2020 et 2022	44
Figure 18 : Photographie illustrative de <i>Pedum spondyloideum</i> , <i>Pteria sp</i> et <i>Isognomon isognomon</i> (Source : Google Images)	45
Figure 19 : Évolution de la densité moyenne des espèces remarquables pour les zones de sorties de rades	46
Figure 20 : Représentation graphique des variations de la densité de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, pour les deux rades et le site de référence. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes	51

Figure 21 : Représentation graphique des variations de la biomasse de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, pour les deux rades et le site de référence. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.....	52
Figure 22 : Représentation graphique des variations de la richesse spécifique de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, pour les deux rades et le site de référence. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.	53
Figure 23 : Représentation graphique des variations de densité de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, pour les sorties des deux rades. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.	56
Figure 24 : Représentation graphique des variations de biomasse de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, pour les sorties des deux rades. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.....	57
Figure 25 : Représentation graphique des variations de richesse spécifique de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, pour les sorties des deux rades. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.....	58
Figure 26 : Photographies : a. Monticules de coraux morts, b : Présence de poissons papillons sur ce type de monticules, c : Holothuries (<i>Stichopus hermanni</i>), coraux (<i>Cantharellus noumeae</i>) et éponges encroûtantes sur monticules de coraux morts, d : Vase et monticules de débris coralliens, brassés par les mouillages répétitifs de navires dans la zone.	60

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste et caractéristiques des stations de suivi récifal échantillonnées en 2022	14
Tableau 2 : Catégories de substrat retenues pour l'échantillonnage par LIT (English et al. 1997)	18
Tableau 3 : Profil des genres d'invertébrés remarquables étudiés séparément	24
Tableau 4 : Variables utilisés pour la caractérisation et l'analyse des peuplements ichtyologiques.....	27
Tableau 5 : Recouvrement moyen pour les principaux descripteurs des habitats observés en 2022, sur chacune des zones. Les écart-types pour les moyennes sont fournis entre parenthèses.....	30
Tableau 6 : Résultats des modèles pour la détection de signaux de changements (représentés par le facteur d'interaction « zone x campagne ») sur les habitats coralliens dans la zone de la grande rade ; NS : non-significatif ; * : significatif avec $P<0,05$; ** : $P<0,01$; *** : $P<0,001$	32
Tableau 7 : Résultats des modèles pour la détection de signaux de changements (représentés par le facteur d'interaction « zone x campagne ») sur les habitats coralliens dans la zone de la petite rade ; NS : non-significatif ; * : significatif avec $P<0,05$; ** : $P<0,01$; *** : $P<0,001$	32
Tableau 8 : Résultats des analyses statistiques testant la significativité des variations temporelles des paramètres décrivant les habitats pour les deux zones de sorties de rades entre 2020 et 2022. NS : non-significatif ; * : significatif avec $P<0,05$; ** : $P<0,01$; *** : $P<0,001$	34
Tableau 9 : Densité moyenne et écart type (ind./ha) par groupe d'invertébrés et par zone en 2022.....	37
Tableau 10 : Résultats de l'ANOVA à deux facteurs (campagne et zone) sur la richesse spécifique transformée (racine carrée) par couple de zones : grande rade <i>versus</i> référence, petite rade <i>versus</i> référence	39
Tableau 11 : Résultats de l'ANOVA à deux facteurs (campagne et zone) sur la densité transformée (racine carrée) par couple de zones : grande rade <i>versus</i> référence, petite rade <i>versus</i> référence	40
Tableau 12 : Résultats de l'ANOVA à un facteur (campagne) sur la richesse spécifique transformée (racine carrée), par zone (sortie de petite rade et sortie de grande rade)	43

Tableau 13 : Résultats de l'ANOVA à un facteur (campagne) sur la densité de chaque groupe transformée (racine carrée) par zone (sortie de petite rade et sortie de grande rade)	44
Tableau 14 : Niveaux moyens de densité, de biomasse et de richesse spécifique observés en 2022 sur chacune des zones. Les écart-types pour les moyennes sont fournis entre parenthèses.	48
Tableau 15 : Résultats des modèles pour la détection de signaux de changements (représentés par le facteur d'interaction « zone x campagne ») sur l'ichtyofaune dans la zone de la grande rade ; NS : non-significatif ; * : significatif avec $P<0,05$; ** : $P<0,01$; *** : $P<0,001$	49
Tableau 16 : Résultats des modèles pour la détection de signaux de changements (représentés par le facteur d'interaction « zone x campagne ») sur l'ichtyofaune dans la zone de la petite rade ; NS : non-significatif ; * : significatif avec $P<0,05$; ** : $P<0,01$; *** : $P<0,001$	50
Tableau 17 : Résultats des analyses statistiques testant la significativité des variations temporelles des paramètres décrivant l'ichtyofaune dans les deux zones de sorties de rades entre 2020 et 2022. NS : non-significatif ; * : significatif avec $P<0,05$; ** : $P<0,01$; *** : $P<0,001$	54

I INTRODUCTION

Le Port Autonome de Nouvelle-Calédonie (PANC) a réalisé en 2018 un état de référence environnemental du milieu marin dans son domaine maritime de Nouméa. Cette étude a permis de décrire de manière approfondie les caractéristiques et les spécificités des milieux naturels présents dans l'enceinte et à proximité immédiate du PANC.

Les éléments suivants étaient en particulier ressortis concernant la composante biologique de cet état de référence :

- Aucune zone significative d'herbier n'a été *a priori* identifiée ;
- L'existence d'un couvert de mangrove de surface restreinte au fond de l'Anse Ndu a été notée, représentant la seule occurrence de cet écosystème sensible sur le domaine d'étude ;
- Le recouvrement en coraux vivants est apparu significatif voire important sur l'ensemble des stations échantillonnées, conférant à la majorité des zones frangeantes de la zone d'emprise du PANC une valeur patrimoniale importante, et une sensibilité forte aux pressions exercées par les nombreux usages et activités dans les deux rades et aux impacts potentiels de travaux d'aménagement sur ces écosystèmes.

La PANC mène depuis 2020 une réflexion visant à amorcer sa transition écologique et énergétique, et à intégrer les enjeux environnementaux dans sa programmation stratégique de long terme. Afin de pouvoir anticiper au mieux les considérations environnementales liées à son fonctionnement et à ses projets d'aménagement et de développement, et étant donnée la valeur patrimoniale des milieux frangeants que renferme son domaine maritime, le PANC a mis en place un suivi environnemental composé de stations sentinelles représentatives des principales zones récifales, devant être échantillonnées annuellement sur le long terme. Ce réseau de stations sentinelles concerne la composante biologique du milieu et porte plus spécifiquement sur les écosystèmes de récifs coralliens (porteurs des principaux enjeux environnementaux sur cette zone).

Le présent rapport fait suite à la réalisation de la campagne 2022, qui correspond à la troisième itération de ce suivi depuis sa mise en place en 2020.

II MATERIELS ET MÉTHODES

II.1 Démarche générale pour le suivi biologique des zones récifales

Les informations fournies par l'état de référence réalisé en 2018 et les discussions préparatoires avec la direction du PANC ont permis de définir en 2020 un plan de suivi rigoureux scientifiquement et optimal dans son dimensionnement.

En conformité avec les approches scientifiques de référence pour le suivi biologique d'écosystèmes récifaux, ce plan de suivi a été construit sur la base de 14 stations d'observations (cf. détails du plan d'échantillonnage en partie suivante) permettant de caractériser en détail :

- les habitats coralliens *via* la méthode du LIT (*Line Intersect Transect*), qui est la méthode quantitative de référence pour ce type d'observation en milieu corallien ;
- les peuplements de macro-invertébrés benthiques, *via* des inventaires visuels sur du couloir d'observation à largeur fixe ;
- les peuplements ichtyologiques, *via* des inventaires visuels selon la méthode du transect à largeur variable.

Ces trois méthodes, et les modalités d'analyse des données qui y sont associées, constituent des méthodes de référence en Nouvelle-Calédonie dans le cadre des suivis environnementaux en milieu récifal. Elles représentent une combinaison optimale en vue de caractériser rigoureusement les écosystèmes coralliens locaux et de produire un diagnostic écologique pertinent. Étant actuellement et ayant été historiquement très utilisées pour l'évaluation des habitats et peuplements biologiques récifaux en Nouvelle-Calédonie, le choix de ces méthodes favorisera également, le cas échéant, la comparaison avec d'autres suivis réalisés sur le territoire dans le cadre de futures études d'impact ou suivis réglementaires.

II.2 Plan d'échantillonnage

II.2.1 Zones d'étude

En cohérence avec l'état de référence réalisé en 2018 et les objectifs de surveillance environnementale du PANC, les zones devant faire l'objet d'un suivi long terme à partir de 2020 correspondent :

- A l'emprise maritime du PANC sur Nouméa, telle que définie dans ses statuts : schématiquement, il s'agit donc de l'ensemble des zones de la Grande Rade et de la Petite Rade, limitées à l'intérieur des rades par le trait de côte actuel et à leurs sorties par une ligne tracée entre les pointes de terre encadrant les Rades (Pointe Kongou et Pointe Destelle pour la Grande Rade ; Pointe du Four à chaux et Pointe de l'Îlot Brun pour la Petite Rade). Dans ce périmètre, les stations sont donc positionnées dans les zones de récifs coralliens frangeants identifiées lors de l'état de référence. Le Banc des Japonais, d'intérêt écologique particulier, est également considéré mais abordé de manière qualitative en raison de la nature des fonds dans ce secteur.
- Aux zones récifales jouxtant directement les sorties des deux Rades : il s'agit notamment des zones situées sur la façade extérieure des quatre pointes délimitant la zone d'étude, et donc directement adjacentes à celles-ci (Îlot Brun, Pointe du Four à Chaux, Pointe Kongou, Pointe Destelle). Bien que non comprises dans le domaine du PANC, il est à prévoir que les activités et travaux au sein des rades puissent avoir un effet significatif sur ces zones proches, et qu'elles nécessitent donc d'être considérées dans de futures opérations de surveillance environnementale.

Par ailleurs, la mise en place d'un suivi temporel des milieux naturels impose l'échantillonnage d'une zone témoin (dite « de référence », échantillonnée au même moment et avec des méthodes strictement identiques aux autres stations), qui est nécessaire pour pouvoir interpréter les évolutions observées en zone de suivi. L'existence d'une zone de référence est notamment indispensable à la mise en œuvre de l'approche BACI (*Before-After-Control-Impact*), qui sous-tend tout suivi environnemental légitime et rigoureux et fait foi internationalement dans ce type de contexte.

II.2.2 Nombre et répartition des stations

Tenant compte de la géomorphologie de la Petite Rade et de la Grande Rade, de leur superficie, et des informations générales existant sur les zones potentiellement corallines, un ensemble de 8 stations d'observations avait été échantillonnées dans le cadre de l'état initial réalisé en 2018 et avait permis une caractérisation satisfaisante des zones récifales d'intérêt au sein des deux rades (selon une répartition positionnant 6 stations en Grande Rade et 2 stations en Petite Rade).

Parmi ces 8 stations, 7 stations étaient situées en zones frangeantes et avaient été échantillonnées selon la méthodologie principale de suivi (cf. parties suivantes), tandis que la station positionnée au niveau du Banc des Japonais avait fait l'objet d'une simple reconnaissance avec une caractérisation qualitative du milieu (substrat et peuplements macrobenthiques)¹.

Par ailleurs, 4 stations adjacentes avaient été échantillonnées respectivement sur la façade extérieure des quatre pointes délimitant les deux rades (Ilot Brun, Pointe du Four à Chaux, Pointe Kongou, Pointe Destelle).

Avéré pertinent, ce plan d'échantillonnage mis en œuvre lors de l'état de référence des récifs des deux rades et des zones récifales adjacentes a donc été conservé lors de la mise en place du suivi long terme en 2020.

Enfin, 2 stations de référence (non considérées en 2018) ont été ajoutées et positionnées lors de la mise en place du suivi en 2020, autant que possible dans des secteurs écologiquement comparables, en baie Maa.

Le plan de suivi récifal correspond donc depuis 2020 à l'échantillonnage annuel de 14 stations qui, à l'exception de la station de veille située sur le Banc des Japonais, ont toutes été balisées *in situ* par des piquets permanents (fers à béton) afin d'assurer un rééchantillonnage rigoureux d'une année sur l'autre. La Figure 2 présente la répartition géographique des stations du réseau de suivi mis en place.

II.2.3 Structuration d'une station d'observation

Une station correspond à une zone récifale sur laquelle ont été mis en place 3 transects d'observations de 20 m, qui constituent des répliquats d'observation de la station et sur lesquels sont mis en œuvre les protocole *in situ* décrits en parties suivantes.

Cette réplication est indispensable à une évaluation fiable et informative des peuplements biologiques présents localement, en fournissant une mesure de leur variabilité spatiale à l'échelle de la station. Dans le cadre d'un suivi temporel, cette réplication est de plus indispensable à la réalisation des analyses statistiques et/ou des modélisations destinées à rechercher des signaux de changements ou de perturbations des écosystèmes suivis.

¹ Les éléments recueillis en 2018 suggéraient en effet un fort envasement du Banc des Japonais associé à un très faible recouvrement corallien, avec toutefois une composition originale en espèces. Bien que semblant en voie de régression du fait d'une pression sédimentaire intense (difficilement maitrisable dans le contexte des usages de la rade), cette zone présente toutefois un intérêt écologique particulier et il était apparu souhaitable de disposer d'une veille régulière de son évolution générale.

II.3 Réalisation de la campagne de suivi 2021

La campagne 2022 été réalisée du lundi 14 février au vendredi 18 février, à bord du navire professionnel RAIRA de la société SOPRONER (Figure 1). L'intégralité des stations prévues au plan de suivi a pu être échantillonnée dans de bonnes conditions.

Le Tableau 1 présente la liste et les caractéristiques des stations de suivi et leur date d'échantillonnage en 2021.



Figure 1 : Navire d'opération technique et scientifique RAIRA (gauche) et plongeurs biologistes à proximité du Banc des Japonais (droite). Source : DEXEN.

Tableau 1 : Liste et caractéristiques des stations de suivi récifal échantillonnées en 2022

Zone	Station	Profondeur d'installation (m)	Longitude	Latitude	Date d'échantillonnage
Sortie de rade	FREYCINET	2	166,389741	-22,226324	14-févr
Référence	MAA_NORD	2	166,34003	-22,19714	14-févr
Référence	MAA_SUD	2	166,34404	-22,2097	14-févr
Grande Rade	KOUMOUROU	2	166,395664	-22,232625	15-févr
Petite Rade	CHAUX	1	166,426453	-22,277951	15-févr
Petite Rade	BRUN_INT	2	166,4315	-22,2914722	15-févr
Sortie de rade	KUENDU	3	166,387004	-22,255702	16-févr
Sortie de rade	SERPENT	2	166,422689	-22,281007	16-févr
Sortie de rade	BRUN_EXT	2	166,424978	-22,290969	16-févr
Grande Rade	KONGOU	2	166,397769	-22,253512	17-févr
Grande Rade	PADDON	2	166,410214	-22,262544	17-févr
Grande Rade	JAP*	8	166,41564	-22,2608889	17-févr
Grande Rade	NBI	2	166,415971	-22,247418	18-févr
Grande Rade	UARE	2	166,426093	-22,247819	18-févr

*Reconnaissance et caractérisation qualitative des habitats coralliens

Il convient de noter que la visite du point d'observation du Banc des Japonais n'avait pu être réalisée au cours de la campagne 2021 en raison de la présence de la barge Cali, ni dans les semaines qui suivirent en raison de la présence quasi-systématique de navires mouillés directement sur ce point, empêchant toute investigation en plongée. Cette situation s'est reproduite lors de la campagne 2022 (mouillage de navires sur

le point d'observation toute la semaine), et il a donc été décidé de décaler le point de suivi afin de permettre les observations et d'y garantir une meilleure faisabilité du suivi à l'avenir. Les coordonnées ajustées pour ce point sont indiquées dans le Tableau 1.

II.4 Approche analytique globale

Le suivi récifal de long terme a débuté en 2020 avec l'installation de stations d'observations sous-marines fixes et la mise en place de stations de référence (Figure 2). Lors de l'état initial de 2018, les stations de référence n'avaient pas encore été définies et les autres stations avaient été échantillonnées sur des transects libres (donc non-rigoureusement comparables aux transects permanents installés à partir de 2020). En conséquence, une approche analytique complète n'était pas possible à l'issue de la campagne 2020 et les analyses réalisées avaient porté sur les évolutions des écosystèmes entre la campagne de 2018 et celle de 2020. Ces comparaisons restaient toutefois indicatives en raison des incertitudes liées au positionnement fin des stations entre ces deux campagnes.

La campagne 2021, en fournissant un second jeu de données collecté selon le plan de suivi définitif, avait permis d'obtenir la première série temporelle de données sur l'ensemble des stations (zones d'impact et de référence). Des modélisations statistiques selon un schéma CI (*Control-Impact*, cf. détails ci-dessous) avaient donc été réalisées pour la première fois en 2021, et sont désormais implémentées en routine pour les campagnes suivantes².

L'approche analytique mise en œuvre dans ce rapport consistera donc, pour chacun des compartiments biologiques étudiés (habitats coralliens, faune macrobenthique, ichtyofaune, cf. parties suivantes) :

- à décrire globalement les caractéristiques des écosystèmes récifaux telles qu'observés en février 2022 dans chacune des zones du plan de suivi :
 - o petite rade
 - o grande rade
 - o sortie de petite rade
 - o sortie de grande rade
 - o zone de référence
- sur les deux zones constituant le point focal du suivi sentinelle (i.e. petite rade et grande rade) : à mettre en œuvre une approche analytique de type CI (*Control-Impact*) permettant la détection d'éventuelles signaux de changement ou de perturbation des zones récifales dans ces deux zones du PANC³ ;
- sur les deux zones de sorties de rades : à examiner l'évolution temporelle des écosystèmes entre 2021 et 2022, le suivi de ces zones ayant essentiellement un rôle de veille du périmètre proche des rades (sans toutefois faire l'objet d'une approche analytique CI telle que celle déployée sur les zones principales situées dans le domaine du PANC).

² La série temporelle utilisée ne comportant à ce stade que trois années de données, il convient de souligner l'aspect préliminaire des résultats et interprétations auxquels elle donnera lieu pour la présente expertise. Il est communément considéré qu'un minimum de trois points de données est en effet nécessaire pour commencer à appréhender correctement des tendances. Si les résultats présentés fournissent ici de premières indications, il conviendra donc que celles-ci soient confirmées suite aux campagnes et expertises ultérieures.

³ La caractérisation détaillée des écosystèmes propres à chaque station du plan de suivi est disponible dans l'état de référence réalisé en 2018 (stations situées dans les rades et en sorties de rades) et dans le premier rapport de suivi réalisé en 2020 (stations de référence en Baie Maa). Le point focal des analyses portera désormais et en routine sur le suivi des évolutions temporelles de ces écosystèmes, et notamment vis-à-vis de la nouvelle campagne de suivi.

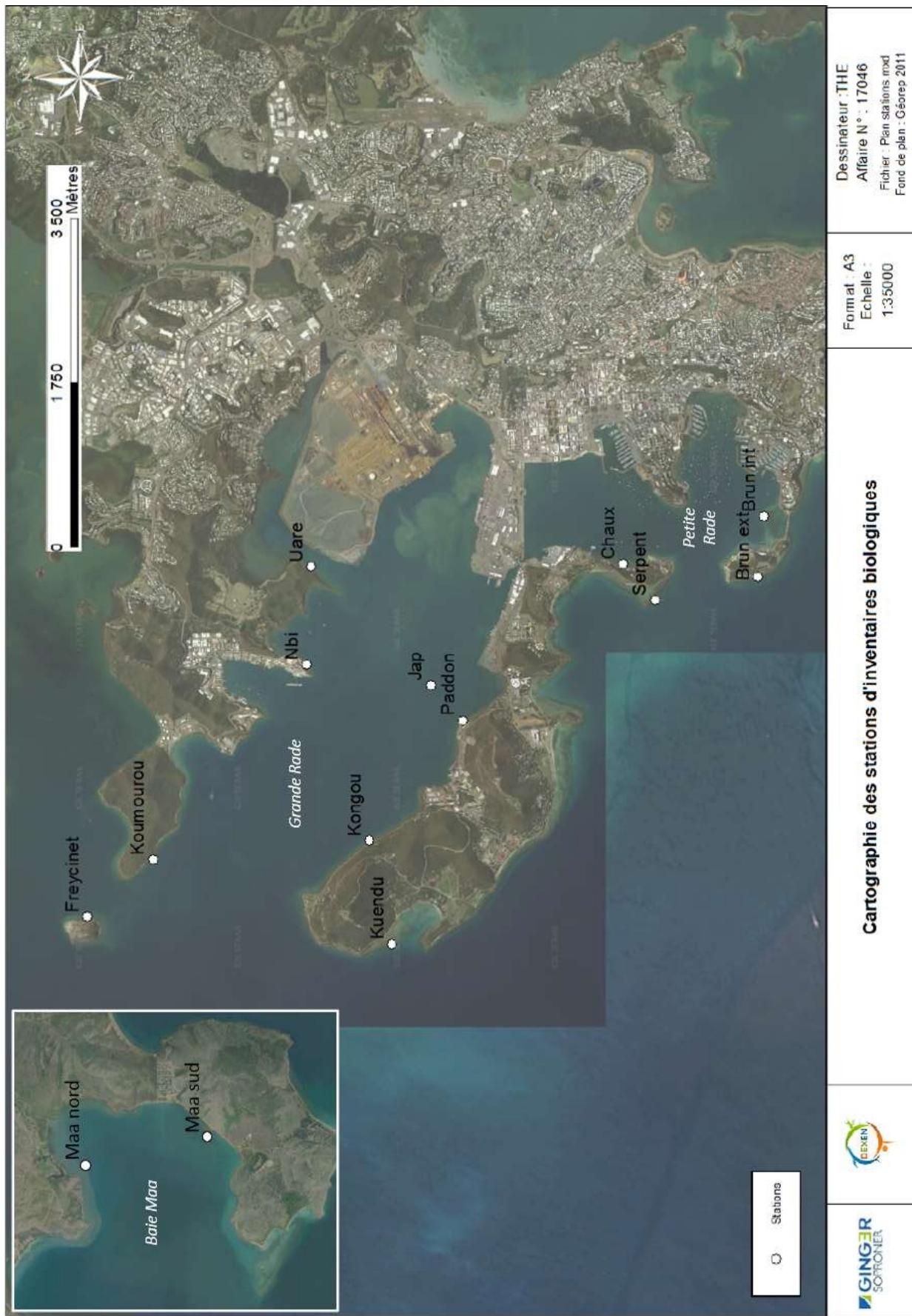


Figure 2 : Positionnement des 14 stations de suivi récifal mises en place à partir de 2020

II.5 Description et analyse des évolutions des habitats coralliens

II.5.1 Protocole *in situ*

Sur chaque station d'observation, la caractérisation du substrat benthique et des habitats associés a été effectuée selon la méthode du LIT (*Line Intersect Transect*, English et al. 2007). Cette méthode est classiquement utilisée en milieu récifo-lagonaire afin de déterminer la nature et le recouvrement (%) pour différentes catégories de substrat. Elle fournit, pour chaque transect de mesure, des données en pourcentage de recouvrement pour les différentes catégories de substrats abiotiques (classés selon des critères granulométriques) ou biotiques (différents types d'organismes vivants et notamment de coraux).

Sur chaque transect de 20 m, un ruban gradué est donc déroulé sur le substrat et la distance couverte par chaque catégorie est notée au fur et à mesure du parcours du transect par le plongeur (Figure 3).

Le Tableau 2 fournit la liste des catégories et sous-catégories utilisées (telles que définies dans English et al. 1997). De plus, à des fins d'inventaire approfondi, les colonies corallines observées par LIT ont été systématiquement identifiées au niveau du genre taxonomique, permettant ainsi de caractériser la diversité des coraux sur chaque transect et chaque station.

Suite à l'échantillonnage de chaque station, les données collectées sont saisies par le plongeur dans une base de données standardisée, puis contrôlées et archivées en vue de leur traitement.

En parallèle des relevés LIT, des prises de vues photographiques et un parcours vidéo de chaque transect ont été réalisés à des fins de compléments d'interprétation, d'illustration, et d'archivage.

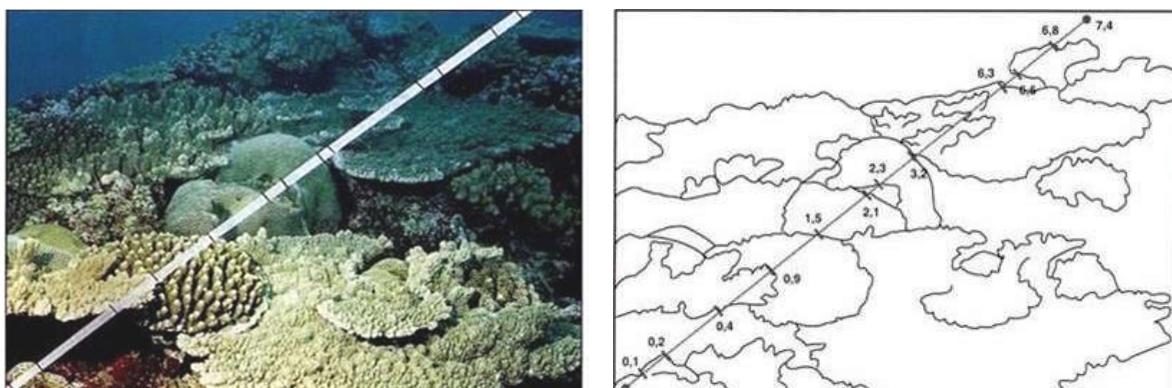


Figure 3 : Illustration de la méthode du *Line Intersect Transect* (LIT, English et al. 1997), pour la description des habitats récifo-lagonaires (Source : Kulbicki 2006).

Tableau 2 : Catégories de substrat retenues pour l'échantillonnage par LIT (English et al. 1997)

Codes	Signification	Description
dc	Corail mort récemment	Couleur blanche
dca	Corail mort en place recouvert d'algues	Corail mort recouvert d'algues
acb	Acropora branchu	Au moins 2 niveaux de branches
acs	Acropora submassif	
acd	Acropora digité	Branches en forme de doigts
act	Acropora tabulaire	Branches aplatises horizontalement
ace	Acropora encroûtant	
cb	Corail branchu	Au moins 2 niveaux de branches
ce	Corail encroûtant	
cf	Corail foliaire	Corail en forme de feuille
cm	Corail massif	
cs	Corail submassif	
cmr	Fungia spp.	Corail solitaire
cme	Millepora spp.	Corail de feu
sc	Corail mou	
sp	Eponge	
zo	Zoanthaires	
ot	Autres organismes	Ascidies, anémones, gorgones, bénitiers
aa	Assemblage d'algues	
ma	Macrophyte	
ta	Turf algaires	
ca	Algues calcaires	
ha	Halimeda spp.	
s	Sable	Particules < 2 cm
r	Débris	2 cm = particules < 10 cm
si	Vase	
wa	Crevasses	Crevasse de plus de 50 cm
rck	Roches et dalle corallienne	

II.5.2 Traitements des données

Les paramètres d'habitats coralliens correspondent à des pourcentages de recouvrement pour une large gamme de catégories descriptives, qui ont été calculés par station (moyenne sur les trois transects) sur la base des données collectées par LIT.

La description des habitats par zones (qui sont l'unité principale d'analyse dans le cadre de ce suivi long terme) est ensuite fondée sur la valeur moyenne des stations qu'elles contiennent (tenant en compte l'ensemble des répliquats constituant chaque station). Ceci permet de fournir une image pertinente des habitats présents dans chaque zone, incluant notamment une mesure de la variabilité spatiale à petite échelle.

Les compilations et traitements de données nécessaires au calcul des paramètres, moyennes, et écart-types associés, ainsi que la création des matrices utilisées pour les tableaux synthétiques et les graphiques caractérisant les habitats coralliens par zone ont été réalisés avec les logiciels Microsoft Excel® et R®.

II.5.3 Approche analytique Contrôle-Impact pour la recherche de changements dans les zones de rades

De même que pour les autres compartiments biologiques, traités ci-après, la détection de signaux d'impact sur des peuplements biologiques se heurte à la difficulté de distinguer les effets respectifs des nombreux facteurs naturels et anthropiques qui influencent ces peuplements (Osenberg et al. 1994, Pitcher et al. 1998). Ce problème est particulièrement important s'agissant des écosystèmes coralliens, qui sont caractérisés par une grande diversité et une hétérogénéité spatiale et temporelle importante, répondant à un déterminisme complexe (Sale et al. 1984, Connell & Kingsford 1998, Kulbicki et al. 2007, Guillemot et al. 2010). Dans le cas présent, l'objectif est donc de pouvoir dissocier au mieux les éventuels changements ou perturbations qui seraient reliés aux activités/aménagements du PANC et les fluctuations naturelles de fond des écosystèmes (Roset et al. 2007, Guillemot 2009).

Dans cette optique, il apparaît indispensable d'adopter une approche de type CI (Control-Impact), rendue possible par l'existence d'une zone de référence dans le plan d'échantillonnage mis en place en 2020. Selon ce type d'approche, qui fait foi internationalement et depuis de nombreuses années pour la définition de plans de surveillance environnementaux (Underwood 1992 ; Underwood 1994 ; Osenberg et al. 1994), une détection fiable des changements écologiques doit s'effectuer par analyse de l'évolution des différences entre zones sous impact potentiel et zones de référence. Examiner le différentiel de variation temporelle entre ces deux zones (nommé interaction « zone x campagne ») permet seul de détecter de manière rigoureuse des signaux de perturbation (i.e. de déterminer si les variations observées en zone sous impact peuvent effectivement être attribuées à l'impact étudié ou si elles sont la conséquence d'autres phénomènes).

D'un point de vue analytique, la mise en œuvre de cette démarche doit s'appuyer sur des modèles statistiques permettant de prendre en compte simultanément plusieurs facteurs explicatifs afin d'en dissocier les effets et les interactions.

Dans le cas des données d'habitats coralliens, des analyses de variance à deux facteurs (« zone » et « campagne ») ont été réalisées sur les paramètres d'intérêt afin d'évaluer la significativité du facteur d'interaction « zone x campagne », lorsque les conditions de mise en œuvre d'analyse paramétriques étaient réunies (i.e. distribution gaussienne et homoscédasticité). Dans le cas contraire, des tests non-paramétriques équivalents ont été mis en œuvre (Scherrer 1984, Zar 1999).

Lorsqu'un signal potentiel de perturbation a été détecté sur l'un des paramètres décrivant les habitats coralliens (i.e. réponse significative du facteur d'interaction « zone x campagne »), un examen approfondi des données est réalisé. Notamment, des graphiques sont produits afin de préciser l'amplitude et le profil de cette variation, et d'en discuter les implications vis-à-vis des objectifs de surveillance.

L'ensemble de la démarche a été menée deux fois, séparément pour la petite rade et pour la grande rade (toutes deux comparées à la même zone de référence), afin de distinguer les éventuels changements propres à ces deux zones.

II.5.4 Analyse de l'évolution temporelle des zones adjacentes (sorties de rades)

Afin d'examiner l'évolution temporelle des habitats coralliens entre 2020 et 2022 dans les deux zones adjacentes (sortie de petite rade et sortie de grande rade), et afin de tester la significativité des variations éventuellement observées, des tests statistiques univariés (un facteur « campagne ») ont été réalisés sur les principales variables décrivant les habitats.

Afin de choisir le type d'analyse le plus adapté, il a tout d'abord été déterminé si les données propres à chaque variable répondaient aux exigences de mise en œuvre de tests paramétriques (i.e. distribution gaussienne et homoscédasticité) (Scherrer 1984, Zar 1999). Lorsque les conditions nécessaires étaient remplies, des tests t de Student ont donc été utilisées afin d'étudier l'effet du facteur « campagne » sur la variable en question. Dans le cas contraire, des tests non-paramétriques de type Mann-Whitney ont remplacé les tests de Student (Zar 1999, Rosner 2000).

À l'issue des différentes analyses conduites, et la série temporelle à ce stade du suivi ne comprenant que deux années d'observation, l'amplitude et le profil des variations significatives éventuellement mises en évidence ont été caractérisés graphiquement (sans nécessité de mener des analyses *post hoc*).

Nota bene - Pour toute variable et sur tout biotope, l'absence de variation significative au cours du temps constitue un résultat à part entière et important en soi. Cette absence de significativité suggère en effet que la variable en question est restée stable au cours de la période de suivi, tant concernant de possibles variations ponctuelles que concernant des tendances générales continues (housse ou baisse). Dans certains cas, l'examen graphique peut certes suggérer des variations apparentes entre les valeurs moyennes des différentes années, mais il convient alors de considérer le niveau de variabilité spatio-temporelle correspondant à ces valeurs (illustré par les écart-types associés aux moyennes). En ce sens, l'absence de significativité statistique signifie bien que les évolutions éventuellement observées ne reflètent pas de réel changement et que le paramètre peut être considéré comme stable dans le temps.

II.6 Description et analyse des évolutions de la faune invertébrée macrobenthique

II.6.1 Protocole *in situ*

La faune macrobenthique a été inventoriée par la méthode du Belt Transect (Hill et al. 2004). Pour chaque station, les recensements par comptage visuel sont réalisés sur 3 transects de 20 m présentant chacun une largeur totale de 2 m (1 m de chaque côté du ruban matérialisant le ruban, soit 40 m² de zone inventoriée par transect).

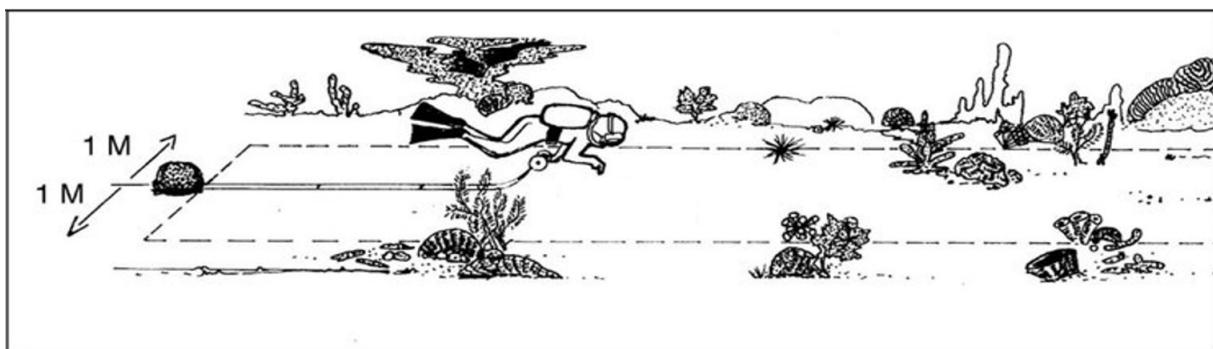


Figure 4 : Illustration de la technique du *Belt Transect* (Source : Hill et al. 2004).

Le plongeur note, pour chaque observation, l'espèce et le nombre d'individus observés. La détermination des organismes n'est pas toujours possible jusqu'au niveau de l'espèce, auquel cas la meilleure résolution taxonomique possible est utilisée. Dans le cadre la présente étude, l'échantillonnage du benthos s'est focalisé sur 4 groupes taxonomiques : Vers, Crustacés, Mollusques et Échinodermes. Ces groupes ont été sélectionnés car ils regroupent les espèces les plus abondantes sur les récifs échantillonnés et que leurs caractéristiques de taille permettent un échantillonnage quantitatif par dénombrement.

Suite à l'échantillonnage *in situ*, les données collectées pour chaque transect ont été saisies par le plongeur biologiste dans une base de données standardisée, puis contrôlées et archivées en vue de leur traitement.

II.6.2 Traitements des données

L'ensemble des données a fait l'objet d'une compilation dans une base de données commune et spécifique aux analyses de données.

Cette base de données est utilisée par différentes routines d'analyse et de représentations graphiques développées sous le logiciel R[®].

L'ensemble des observations *in situ* présent dans les bases fait l'objet d'un contrôle qualité puis les métriques de densité et de biodiversité sont calculées pour différentes échelles d'agrégation spatiales (valeurs par transect, moyennes par station, ou moyennes par zone).

Les densités sont calculées en considérant comme unité de base le transect et sont exprimées en ind./ha.

Les données de richesse spécifique sont exprimées en considérant comme unité de base le transect et sont donc exprimées en nombre d'espèce par transect.

Comme mentionné précédemment et de même que pour les autres compartiments biologiques, les données de 2018 ne sont pas intégrées dans les analyses CI et d'évolution temporelle car l'absence de matérialisation des transects permanents en 2018 constitue un biais vis-à-vis des campagnes ultérieures.

II.6.3 Description générale de la faune macrobenthique par zone en 2022

II.6.3.1 Analyse à l'échelle des communautés : OCP et CAH

L'Ordination en Coordonnées Principales (OCP ou PCO) est une généralisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette méthode est recommandée à la place de l'ACP pour des données non-quantitatives ou ayant un grand nombre de 0 comme c'est le cas pour les densités d'invertébrés.

Cette représentation factorielle (OCP) se réalise classiquement sur la matrice des densités d'espèces par transect ou sur différents regroupements de données selon le niveau de précision taxonomique (genre, famille, sous-groupe ou groupe) et spatiale (station). Présentement et compte-tenu de la configuration de l'échantillonnage, une matrice de densité par genre, moyennée par station a été utilisée sur les données 2022. Ces analyses sont réalisées à l'aide du logiciel Primer®.

Cette représentation visuelle de la structuration spatiale des communautés est complétée par une analyse statistique de type PERMANOVA (Analyse de la variance par permutation) (Anderson 2001). Cette analyse statistique non-paramétrique à un facteur (Campagne) permet d'évaluer la significativité de la typologie de regroupement des stations par zone.

L'OCP est complétée par une classification ascendante hiérarchique (CAH) des stations en fonction de leur similarité (Bray-Curtis). Un dendrogramme illustratif permet d'appréhender la similarité statistique entre les stations.

II.6.3.2 Analyse de la richesse spécifique totale et de la densité par groupes

Pour chaque zone, la richesse spécifique et de la densité d'invertébrés par groupe (Mollusques, Échinodermes, Vers, Crustacés) est décrite en 2022.

II.6.4 Évolution de la faune macrobenthique par zone à l'échelle des communautés entre 2020 et 2022

Une matrice de densité par genre, moyennée par station a été utilisée sur les données de 2020 à 2022 afin de réaliser une analyse OCP similaire à celle décrite précédemment mais incluant le facteur temporel « campagne ». Ces analyses sont réalisées à l'aide du logiciel Primer®.

Cette représentation visuelle de la structuration spatiale des communautés est complétée par une analyse statistique de type PERMANOVA (analyse de la variance par permutation) (Anderson 2001). Cette analyse statistique non-paramétrique à deux facteurs (campagne et zone) permet d'évaluer la significativité de la typologie de regroupement des stations par zone et de leur évolution temporelle.

L'OCP est complétée par une classification ascendante hiérarchique (CAH) des stations en fonction de leur similarité (Bray-Curtis). Un dendrogramme illustratif permet d'appréhender la similarité statistique entre les stations.

II.6.5 Approche analytique Contrôle-Impact pour la recherche de changements dans les zones de rades

II.6.5.1 Approche générale

L'approche consiste à étudier l'évolution croisée de différents indicateurs entre les zones situées dans le périmètre du PANC (petite rade et grande rade) et la zone de référence.

L'objectif de cette approche est de détecter une évolution statistique différentielle entre ces deux zones et la zone de référence, pouvant indiquer un signal de changement ou de perturbation des peuplements dans les zones du PANC. En cas de détection d'un signal, on cherchera notamment à identifier les stations et les taxons à l'origine des évolutions constatées.

II.6.5.2 Densité et richesse spécifique

Pour chaque couple de zone (« petite rade *versus* référence » d'une part, et « grande rade *versus* référence » d'autre part), l'évolution croisée de la richesse spécifique et de la densité en invertébrés par groupe (Mollusques, Échinodermes, Vers, Crustacés) est étudiée entre 2020 et 2022.

Une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs (zone et campagne) a été réalisée sur les densités par groupe et la richesse spécifique afin d'évaluer la significativité de chacun des facteurs individuellement mais également de l'interaction entre ces deux facteurs. Les données ont été transformées (racine carrée) afin de remplir les conditions de normalité des données et d'homogénéité des variances exigées pour ce type de test (Zar 1999).

Le facteur « zone » correspond à l'analyse comparée des deux zones (référence *versus* grande rade ou petite rade). Une évolution significative de ce facteur traduit une différence statistique (positive ou négative) de la variable étudiée entre les zones toutes campagnes confondues. Ces différences témoignent de différences spatiales.

Le facteur « campagne » correspond à l'analyse comparée entre les campagnes de terrain. Une évolution significative de ce facteur traduit une différence statistique (positive ou négative) de la variable étudiée entre les campagnes toutes zones confondues. Ces différences témoignent d'évolutions temporelles globales.

Le facteur d'interaction « zone x campagne » correspond à l'évolution (positive ou négative) d'au moins une zone entre les campagnes. Cette interaction traduit donc la présence d'évolutions différentes dans le temps selon les zones. Dans le reste du document on utilisera le terme de signal d'impact pour parler de l'interaction significative « zone x campagne ».

Dans le cas de différences significatives ($p\text{-value} < 0,05$), un test *post hoc* de Tukey est réalisé afin de déceler quelles campagnes ou stations sont à l'origine des différences observées. De plus, lorsqu'une évolution significative est identifiée, l'origine taxonomique de ce changement est explorée à l'échelle des sous-groupes et/ou de l'espèce.

II.6.6 Analyse de l'évolution temporelle des zones adjacentes (sorties de rades)

II.6.6.1 Approche générale

L'approche analytique consiste à évaluer les évolutions temporelles en sorties de rades, considérées comme zones sentinelles vis-à-vis de l'intérieur des rades.

L'objectif de cette approche est d'identifier les évolutions temporelles significatives pour chacune des deux sorties de rade (grande rade et petite rade) et d'identifier l'origine des évolutions mise en évidence. On cherchera notamment à identifier les stations et les taxons à l'origine des évolutions constatées.

II.6.6.2 Densité et richesse spécifique

Pour chaque sortie de rade, l'évolution de la richesse spécifique et de la densité d'invertébrés par groupe (Mollusques, Échinodermes, Vers, Crustacés) est étudiée entre 2020 et 2022.

Un test non-paramétrique (Kruskal-Wallis) à un facteur (« campagne ») est réalisée sur les transects par zone pour chaque variable (richesse spécifique ou densité par groupe) afin d'évaluer la significativité du facteur. Le risque de première espèce α a été fixé à 0,05. Dans le cas de différences significatives ($p\text{-value} < 0,05$), une exploration des données est réalisée afin de déceler quelles stations sont à l'origine des différences observées. De plus, lorsqu'une évolution significative est identifiée, l'origine taxonomique de ce changement est explorée à l'échelle des sous-groupes.

Le facteur « campagne » correspond à l'analyse comparée entre les campagnes de terrain. Une évolution significative de ce facteur traduit une différence statistique (positive ou négative) de la variable étudiée entre les campagnes au sein de la zone, témoignant d'évolutions temporelles.

II.6.7 Genres d'invertébrés remarquables

Enfin, l'évolution temporelle des densités d'invertébrés remarquables (genres *Acanthaster*, *Coralliophila*, *Drupella*, *Trapezia* et *Tridacna*) a été étudiée par zone. Les profils de ces genres sont présentés ci-dessous (Tableau 3). Compte tenu des faibles abondances, aucune analyse statistique n'est conduite et les évolutions sont discutées à dire d'expert.

Tableau 3 : Profil des genres d'invertébrés remarquables étudiés séparément

Acanthaster	Coralliophila	Drupella	Trapezia	Tridacna
Etoile de mer responsable de la destruction de nombreux récifs dans la région Indo-Pacifique	Gastéropode corallivore de la famille des Coralliophiliidae	Gastéropode corallivore de la famille des Muricidae. Se regroupe en forte densité et peut impacter de larges surfaces de corail	Petit crabe fortement lié à son habitat corallien (colonie de Pocilloporidae). Défend son habitat de la prédation par les <i>Acanthaster</i> notamment	Bénitier inscrit sur l'annexe II de la liste CITES

II.7 Description et analyse des évolutions de l'ichtyofaune

II.7.1 Protocole *in situ*

Sur chaque transect de comptage de 20 m, les peuplements ichtyologiques ont été évalués par comptages visuels en plongée. La méthode de comptage utilisée est l'échantillonnage par transect à largeur variable (*Distance Sampling*, Buckland et al. 1993).

Lors de l'échantillonnage, un plongeur ichtyologue progresse le long du transect et recense l'ensemble des poissons observés. Toutes les espèces de poissons observables sont prises en compte.

Pour chaque observation, le plongeur note (Figure 5) :

- l'espèce ;
- le nombre d'individus observés ;
- la taille moyenne des individus (longueur à la fourche, en cm) ;
- la distance (en m) du poisson au transect. Dans le cas d'un banc monospécifique, le plongeur note la distance du poisson le plus proche (d1) et du poisson le plus éloigné (d2).

Suite à l'échantillonnage de chaque station, les données collectées sont saisies par le plongeur dans une base de données standardisée, puis contrôlées et archivées en vue de leur traitement.

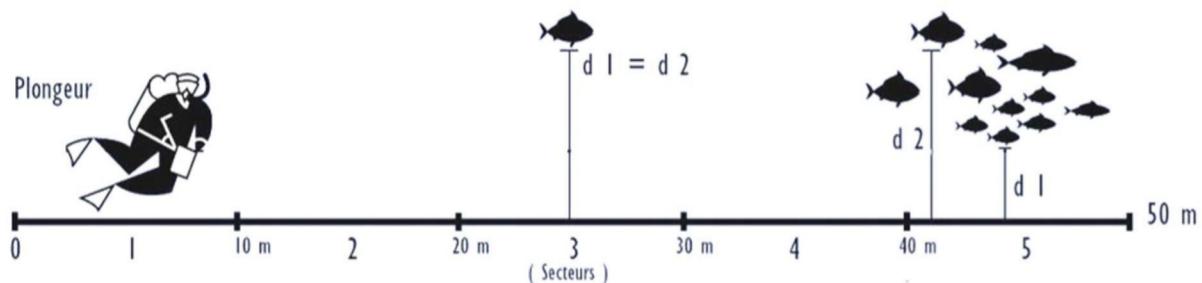


Figure 5 : Déroulement schématique d'un comptage en plongée selon la méthode des transects à largeur variable
(Source : Labrosse et al. 2001).

II.7.2 Traitements des données

II.7.2.1 Calcul des paramètres d'ichtyofaune

Pour chaque transect, les données issues des observations visuelles en plongée permettent de calculer les principaux paramètres décrivant l'ichtyofaune locale : densité, biomasse et richesse spécifique.

Les densités (en individus/m²) et les biomasses (en g/m²) caractérisant chaque espèce ont été calculées selon les algorithmes propres à la méthode des distances moyennes pondérées (Kulbicki & Sarramegna 1999, également rappelés dans Chabanet et al. 2010).

- La densité D d'une espèce est donnée par la formule :

$$D = \frac{\sum_i n_i}{2 \times dm \times L}$$

Où,

- n_i est le nombre de poissons notés pour l'observation i (i.e. un ou plusieurs dans le cas d'un banc)
- L est la longueur du transect (ici, 20m)
- dm est la distance moyenne pondérée de l'espèce sur le transect, elle est donnée par la formule :

$$dm = \frac{\sum_i n_i \times (\frac{d1_i + d2_i}{2} + 0,5)}{\sum_i n_i}$$

Où, $d1_i$ et $d2_i$ sont les distances d'observation de l'observation i

- La biomasse B d'une espèce est donnée par la formule :

$$B = \frac{\sum_i n_i \times P_i}{2 \times dm \times L}$$

Où,

- n_i est le nombre de poissons notés pour l'observation i (i.e. un ou plusieurs dans le cas d'un banc)
- dm est la distance moyenne pondérée de l'espèce sur le transect (même formule que précédemment)

- L est la longueur du transect (ici, 20m)
- P_i est le poids des individus de l'observation i . Ce poids peut être obtenu à partir de la taille observée T_i des individus, selon la formule longueur-poids suivante :

$$P_i = a \times (T_i)^b$$

Où, a et b sont deux coefficients morphométriques, dont les valeurs pour les espèces considérées proviennent de Kulbicki et al. (2005a).

- La richesse spécifique (notée RS, en nombre d'espèces/transect) est directement donnée par le nombre d'espèces observées sur un transect.

II.7.2.2 Modalités de description des peuplements ichtyologiques

Les formules précédentes permettent d'obtenir les niveaux de densité, de biomasse et de richesse spécifique pour l'ensemble du peuplement observé sur une station, et fournissent ainsi de premiers éléments de caractérisation. En vue d'analyser la structure écologique et fonctionnelle de l'ichtyofaune locale, une décomposition de ces descripteurs selon différentes catégories d'intérêt est indispensable, notamment selon les critères suivants : groupes taxonomiques, groupes trophiques, et potentiel commercial.

Taxonomie - La décomposition des paramètres décrivant les peuplements selon les familles, genres et espèces qui les composent fournit des informations sur leur structure écologique et son évolution. La nature des taxons présents sur une station donnée est en effet reliée à la nature des habitats et aux conditions environnementales propres à cette station, et donc à leur éventuelle perturbation. Lors des analyses, un focus particulier sera notamment réalisé sur les Chaetodontidae et les Pomacentridae, qui constituent des indicateurs reconnus du niveau de perturbation des habitats coralliens et des peuplements biologiques qui y sont liés (Pomacentridae : Roberts & Ormond 1987, Jones 1991, Graham et al. 2006, Wilson et al. 2008 ; Chaetodontidae : Reese 1981, Bouchon-Navaro et al. 1985, Hourigan et al. 1988, Roberts et al. 1992, Jones et al. 2004).

Groupes trophiques - Décrire et analyser les peuplements ichtyologiques selon une approche fonctionnelle, en parallèle d'une approche taxonomique classique, fournit des informations complémentaires et directement reliées au fonctionnement et à la dynamique de l'écosystème observé (Hooper et al. 2002, McGill et al. 2006, Petchey & Gaston 2006). Ce type d'approche permet en effet d'aborder la structure des peuplements sous l'angle des fonctions que remplissent les différentes espèces au sein de l'écosystème (Steele 1991, Schwartz et al. 2000, Petchey & Gaston 2002a et 2002b, Guillemot et al. 2011). Parmi les différentes fonctions possibles, la fonction trophique des peuplements ichtyologiques permet en particulier d'apporter des informations précieuses pour expliquer d'éventuelles variations异常 de richesse spécifique, de densité ou de biomasse. Afin de permettre ce type d'analyse, les espèces observées ont été classées selon quatre grands groupes trophiques : carnivores, herbivores, piscivores et planctonophages, sur la base d'informations tirées de FishBase[®] (Froese & Pauly 1997), FISHEYE (Labrosse et al. 1999), Kulbicki et al. (2005b), et Kulbicki (comm. pers. 2016).

Potentiel commercial - Une liste restreinte d'espèce dite « commerciales » a été considérée. Cette liste, historiquement utilisée lors des suivis marins en Nouvelle-Calédonie, regroupe les espèces présentant un potentiel commercial dans le Pacifique Sud. Bien que toutes ces espèces ne soient pas systématiquement consommées en Nouvelle-Calédonie, il est intéressant de prendre en compte cette distinction lors de l'étude de la structure des peuplements ichtyologiques, notamment afin de distinguer une éventuelle perturbation sélective des peuplements.

Pour chacune des catégories taxonomiques, trophiques et commerciales décrites précédemment, les niveaux de densité, de biomasse et de richesse spécifique ont été recalculés à partir des formules susmentionnées, afin de produire un panel détaillé et complet de variables descriptives de l'ichtyofaune. Les compilations de données et calculs nécessaires à la construction des différentes variables ont été réalisés avec les logiciels Microsoft Excel[®] et R[®].

Le Tableau 4 présente de manière synthétique les grands types de variables qui constitueront la base des analyses descriptives réalisées pour l'ichtyofaune.

La liste de l'ensemble des espèces observées lors de la campagne 2022, ainsi que toutes les informations nécessaires aux calculs et traitements décrits précédemment (famille, genre, espèce, potentiel commercial, groupe trophique) sont fournies en Annexe.

Il convient enfin de noter que lors des estimations de densité et de biomasse, certaines observations ponctuelles ont été écartées des calculs en raison du très fort biais d'estimation qu'elles auraient induit, faussant la recherche de signaux de perturbation de l'ichtyofaune. Il s'agit par exemple des requins et raies occasionnellement observés et dont l'occurrence sur un transect reste très aléatoire au moment du comptage.

Tableau 4 : Variables utilisés pour la caractérisation et l'analyse des peuplements ichtyologiques

Paramètre	Catégorie
	Toutes espèces
Potentiel commercial	Espèces "commerciales" Espèces "non-commerciales"
Densité ; biomasse ; richesse spécifique	Herbivores Groupe trophique Carnivores Planctonophages Piscivores
	Chaetodontidae Pomacentridae

II.7.3 Description générale de l'ichtyofaune par zone en 2022

La description de l'ichtyofaune pour chaque zone est fondée sur la valeur moyenne des stations qu'elle contient (prenant en compte l'ensemble des répliquats constituant chaque station). Ceci permet de fournir une image pertinente de l'ichtyofaune par zone, incluant notamment une mesure de la variabilité spatiale à petite échelle.

Les compilations et traitements de données nécessaires au calcul des paramètres, moyennes, et écart-types associés, ainsi que la création des matrices utilisées pour les tableaux synthétiques et les graphiques caractérisant l'ichtyofaune par zone ont été réalisés avec les logiciels Microsoft Excel[®] et R[®].

II.7.4 Approche analytique Contrôle-Impact pour la recherche de changements dans les zones de rades

Tel que présenté pour les habitats coralliens, la mise en œuvre d'une démarche analytique de type CI doit s'appuyer sur des modèles statistiques permettant de dissocier les effets et les interactions de plusieurs facteurs explicatifs. Dans le cas de l'ichtyofaune, les modèles linéaires généralisés (GLM, *Generalized Linear Models*) sont classiquement utilisés pour modéliser des données de comptage, dont

les caractéristiques et la structuration se prêtent bien à ce type de méthode statistique. Typiquement, la forme générique d'un modèle comprenant deux variables explicatives est de la forme :

$$Y \sim X_1 + X_2 + X_1 \cdot X_2 + \epsilon$$

Avec, Y : variable à expliquer (ex. densité totale, biomasse des Chaetodontidae, etc.)

X_1 et X_2 : variables explicatives (ex. zone, campagne, etc.)

$X_1 \cdot X_2$: facteur d'interaction entre les variables explicatives X_1 et X_2

ϵ : résidus du modèle statistique

Dans le cas présent, les modèles mis en œuvre seront donc de la forme :

$$Y \sim \text{zone} + \text{campagne} + \text{zone} \cdot \text{campagne} + \epsilon$$

Pour chacune des 27 variables ichtyologiques considérées (Tableau 4), des modèles de ce type ont été construits puis exécutés. Lorsqu'un signal potentiel de perturbation a été détecté sur l'un des paramètres décrivant l'ichtyofaune (i.e. réponse significative du facteur d'interaction « zone x campagne »), un examen approfondi des données est réalisé. Notamment, des graphiques sont produits afin de préciser l'amplitude et le profil de cette variation, et d'en discuter les implications vis-à-vis des objectifs de surveillance.

L'ensemble de la démarche a été menée deux fois, séparément pour la petite rade et pour la grande rade (toutes deux comparées à la même zone de référence), afin de distinguer les éventuels changements propres à ces deux zones.

II.7.5 Analyse de l'évolution temporelle des zones adjacentes (sorties de rades)

Afin d'examiner l'évolution temporelle de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, et afin de tester la significativité des variations éventuellement observées, des tests statistiques univariés (un facteur « campagne ») ont été réalisés sur les 27 variables ichtyofaunistiques (Tableau 4), et ce pour chacune des deux zones considérées (sortie de petite Rade, sortie de grande Rade).

Afin de choisir le type d'analyse le plus adapté, il a tout d'abord été déterminé si les données propres à chaque variable répondaient aux exigences de mise en œuvre de tests paramétriques (i.e. distribution gaussienne et homoscédasticité des données) (Scherrer 1984, Zar 1999). Lorsque les conditions nécessaires étaient remplies, des analyses de variance (ANOVA) ont été réalisées afin d'étudier l'effet du facteur « campagne » sur la variable en question. Dans le cas contraire, des tests non-paramétriques (de type test de Kruskal-Wallis) ont été effectués (Zar 1999, Rosner 2000).

Dans le cas de différences significatives ($p\text{-value} < 0,05$), des tests complémentaires *post hoc* (test de Tukey-HSD dans le cas des ANOVA, et test de Steel-Dwass dans le cas des tests non-paramétriques) ont été réalisés afin de déterminer précisément quelles campagnes et quelles variations sont à l'origine de cette réponse significative (Scherrer 1984). Les résultats de ces tests *post hoc*, associés à des représentations graphiques de l'évolution des paramètres, permettent de préciser l'amplitude et le profil de la variation considérée.

Les résultats de ces analyses pour la période 2020-2021 ayant déjà été commentés dans le précédent rapport, seuls les résultats mettant en évidence des différences entre l'année 2022 et la période historique de suivi seront présentés.

III EVOLUTIONS DES HABITATS CORALLIENS

III.1 Description générale des habitats coralliens par zone en 2022

Le Tableau 5 et la Figure 6 présentent les principales caractéristiques des habitats coralliens observés en 2022 sur les cinq zones suivies.

La **Grande Rade** a présenté un recouvrement en coraux durs apparaissant relativement élevé pour des récifs frangeants sous forte influence terrigène et anthropique (44 % en moyenne). Il est nettement supérieur au recouvrement observé en Petite Rade et dans les zones de récifs adjacents en sorties des rades ainsi qu'à celui des stations de référence. Ce recouvrement est quasi-exclusivement dominé par des coraux non-Acroporidae (42 % en moyenne, contre 2 % pour les coraux Acroporidae). Les formes massives (notamment du genre *Porites*) représentent, avec les formes sub-massives, environ 40 % de recouvrement. Le reste du recouvrement corallien vivant correspondant principalement à des formes branchues. Le substrat observé sur les stations de suivi de la Grande Rade est par ailleurs essentiellement composé de turf algaire colonisant les substrats durs (37 % en moyenne), et de sable ou de vase (12 % en moyenne).

Lors de la campagne 2022, l'ensemble de la station KOUMOUROU est apparue fortement dégradée (peu de piquets retrouvés, nombreuses colonies de coraux massifs du genre *Porites* retournées), indiquant une ou des perturbations mécaniques significatives depuis la précédente campagne. Ceci peut être rapproché de la situation exposée de cette station et des phénomènes dépressionnaires observés en début de saison cyclonique (notamment la dépression tropicale forte RUBY en décembre 2021, le cyclone tropical DOVI début février 2022), ainsi que de plusieurs épisodes de forts vents de type « coups d'ouest » sur la période. Bien que dans une moindre mesure, le transect T03 de la station KONGOU est apparu perturbé de manière similaire.

La **Petite Rade** a présenté un recouvrement modéré en coraux durs (21 % en moyenne, en lien notamment avec un fort recouvrement en coraux durs sur la station BRUN_INT), nettement inférieur à la Grande Rade. Ces coraux sont très largement dominés par la famille des Acroporidae (16% de recouvrement) et par les morphotypes branchus (près de 20 % du recouvrement total, les coraux massifs et sub-massifs complétant les assemblages locaux). Cette zone présente également un recouvrement notable en coraux mous (7 %, notamment dû à un fort recouvrement observé sur la station CHAUX). La fraction détritique fine du substrat (sable, vase) apparaît par ailleurs plus importante en Petite Rade (29 % en moyenne) que sur les autres zones d'étude.

Comme déjà mentionné lors des précédentes campagnes, la station CHAUX a présenté de nombreux macrودéchets et traces d'une forte anthropisation étant donné son positionnement au cœur de zones de mouillage forain et en faible profondeur à proximité du rivage. Ce contexte entraîne une dégradation récurrente de la structure de la station (disparition de piquets sur les transects T02 et T03 depuis la précédente campagne).

La **sortie de Grande Rade** a présenté un recouvrement significatif en coraux durs (31% en moyenne, toutefois contrasté entre les deux stations et avec un recouvrement sensiblement plus important sur la station KUENDU), quasi-exclusivement dominé par des coraux non-Acroporidae et notamment les morphotypes massifs. Les substrats sableux et vaseux apparaissent très peu présents (2 %), tandis que le turf algaire présente un recouvrement important (62 %) et nettement supérieur aux niveaux observés au sein de la Grande Rade.

En 2022, une couche d'eau douce de surface en lien avec de fortes précipitations au cours des jours ayant précédé l'échantillonnage a été observée sur la station FREYINET, sans toutefois engendrer un blanchissement corallien notable au moment des observations. La station KUENDU, fortement exposée, a quant à elle présenté des signes de perturbation mécanique récente similaires à ceux observés au niveau de la station KONGOU en Grande Rade.

La **sortie de Petite Rade** a présenté un faible recouvrement en coraux durs (9 % en moyenne), largement dominé par des coraux non-Acroporidae et par les morphotypes massifs. Le turf algaire présente un recouvrement particulièrement important dans cette zone (80 %) et ce sur les deux stations échantillonnées.

Lors de la campagne 2022, la station BRUN_EXT est apparue particulièrement dégradée (peu de piquets retrouvés, nombreuses colonies de coraux massifs du genre *Porites* retournées) indiquant une ou des perturbations mécaniques significatives depuis la précédente campagne, en lien probable avec les phénomènes météorologiques cités précédemment dans le cas semblable de la station KOUMOUROU. Bien que dans une moindre mesure, la station SERPENT a présenté des perturbations similaires.

Concernant la **zone de référence**, le recouvrement en coraux durs a présenté un niveau modéré (22 % en moyenne), toutefois cohérent avec les niveaux observés sur les deux zones de rades avec lesquelles cette zone de référence a vocation à être comparée statistiquement. Les peuplements coralliens sont majoritairement composés de coraux non-Acroporidae, et sont pour l'essentiel dominées par des formes massives (12 %) et branchues (10 %). La zone présente également un fort recouvrement en turf algaire (66% en moyenne).

Sur l'ensemble des zones, les débris et substrats durs non colonisés (blocs, dalle rocheuse) représentent des recouvrements anecdotiques, de même que les communautés d'algues hors turf algaire (macroalgues, algues calcaires ou encroûtantes). Les coraux morts en place sont également apparus quasi-inexistants sur l'ensemble des stations échantillonnées en 2022.

Tableau 5 : Recouvrement moyen pour les principaux descripteurs des habitats observés en 2022, sur chacune des zones. Les écart-types pour les moyennes sont fournis entre parenthèses.

Catégorie d'habitats (LIT)	Grande Rade	Petite Rade	Sortie de Grande Rade	Sortie de Petite Rade	Zone de référence
Substrats coralliens	Coraux durs	44 (± 16)	21 (± 21)	31 (± 26)	9 (± 9)
	<i>dont Acroporidae</i>	1 (± 1)	16 (± 21)	1 (± 1)	1 (± 2)
	<i>dont non-Acroporidae</i>	42 (± 16)	3 (± 5)	31 (± 25)	8 (± 9)
	Coraux mous	0 (± 1)	7 (± 11)	3 (± 3)	1 (± 1)
Substrats détritiques et rocheux	Corail mort en place	0 (± 0)	0 (± 0)	1 (± 3)	0 (± 0)
	Sable, vase, débris	12 (± 10)	29 (± 33)	2 (± 2)	5 (± 7)
	Dalle, blocs	3 (± 6)	6 (± 9)	0 (± 0)	0 (± 0)
Substrats biotiques non coralliens	Turf algaire	37 (± 11)	32 (± 27)	62 (± 28)	66 (± 10)
	Macroalgues	1 (± 2)	1 (± 2)	0 (± 0)	2 (± 4)
	Assemblages d'algues	0 (± 1)	4 (± 7)	0 (± 0)	2 (± 4)
	Faune non corallienne	2 (± 3)	1 (± 2)	1 (± 1)	5 (± 3)

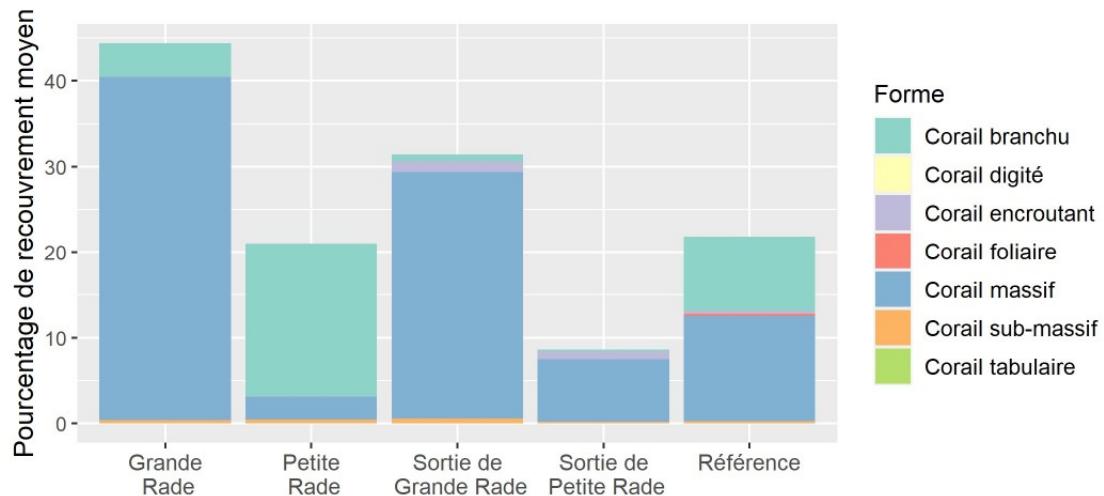


Figure 6 : Composition, par morphotype, des communautés coraliennes pour chacune des zones en 2022.

III.2 Analyses Contrôle-Impact pour la recherche de changements dans les zones de rades

Le Tableau 6 et le Tableau 7 présentent les résultats des modèles statistiques réalisés sur les variables décrivant les habitats coralliens, respectivement en Grande Rade et en Petite Rade. La colonne « Effet zone » indique s'il existe une différence significative entre zone d'impact et zone de référence (toutes années confondues). La colonne « Effet campagne » indique s'il existe des variations temporelles significatives (toutes zones confondues). Enfin, la colonne « Interaction zone x campagne » indique s'il existe une évolution différentielle entre zone d'impact et zone de référence, pouvant alors indiquer un changement spécifique à l'une de ces zones. Les deux premières colonnes de résultats sont fournies à titre indicatif et pour visualisation des résultats de modélisation, mais c'est sur la dernière colonne que se fonde la détection éventuelle de changement dans les habitats coralliens et donc celle qui est commentée ci-après.

La Figure 7 illustre graphiquement l'évolution conjointe des principales variables décrivant les habitats coralliens en Petite Rade, Grande Rade, et zone de référence, à des fins d'interprétation des changements significatifs qui seraient le cas échéant identifiés à l'issue des analyses statistiques.

En **Grande Rade**, la seule variable présentant une significativité du facteur d'interaction « zone x campagne » est le recouvrement en turf algaire. Le signal correspond à une augmentation du turf en zone de référence, tandis que le recouvrement reste globalement stable dans les rades (malgré une légère augmentation en grande rade, d'amplitude plus limitée), ne pointant donc par définition pas vers une dégradation des zones de rades.

En **Petite Rade**, aucun paramètre ne présente d'effet significatif de l'interaction « zone x campagne ».

Ces résultats suggèrent des évolutions cohérentes entre les deux zones de rades et la zone de référence à laquelle elles sont comparées, et conséutivement une absence de signaux d'impact significatif sur les habitats coralliens entre 2021 et 2022 vis-à-vis des activités dans les zones de rade.

En marge des résultats statistiques et sans que cela ne corresponde à un signal d'impact spécifique aux zones de rades suivies, il convient de mentionner les diminutions de recouvrement en coraux durs

observées de manière concomitante dans les trois zones entre 2021 et 2022 (de l'ordre de 10 % en zone de référence, et de 5% en zones de rades, concernant principalement les Acroporidae en zone de référence et en Petite Rade, et les non-Acroporidae en Grande Rade).

Tableau 6 : Résultats des modèles pour la détection de signaux de changements (représentés par le facteur d'interaction « zone x campagne ») sur les habitats coralliens dans la zone de la grande rade ; NS : non-significatif ; * : significatif avec $P<0,05$; ** : $P<0,01$; * : $P<0,001$.**

Variable	Grande rade			
	Effet zone		Interaction zone x campagne	
	Significativité	Significativité	Significativité	Détail
Coraux durs	ns	ns	ns	
dont Acroporidae	ns	ns	ns	
dont Non Acroporidae	** (p=0,005)	ns	ns	
Coraux mous	ns	ns	ns	
Coraux morts en place	ns	ns	ns	
Turf algare	** (p=0,008)	ns	* (p=0,02)	stabilité dans les rades, augmentation en référence
Macroalgues	ns	ns	ns	

Tableau 7 : Résultats des modèles pour la détection de signaux de changements (représentés par le facteur d'interaction « zone x campagne ») sur les habitats coralliens dans la zone de la petite rade ; NS : non-significatif ; * : significatif avec $P<0,05$; ** : $P<0,01$; * : $P<0,001$.**

Variable	Petite Rade			
	Effet zone		Interaction zone x campagne	
	Significativité	Significativité	Significativité	Détail
Coraux durs	ns	ns	ns	
dont Acroporidae	ns	ns	ns	
dont Non Acroporidae	* (p=0,036)	ns	ns	
Coraux mous	* (p=0,013)	ns	ns	
Coraux morts en place	ns	ns	ns	
Turf algare	ns	ns	ns	
Macroalgues	ns	ns	ns	

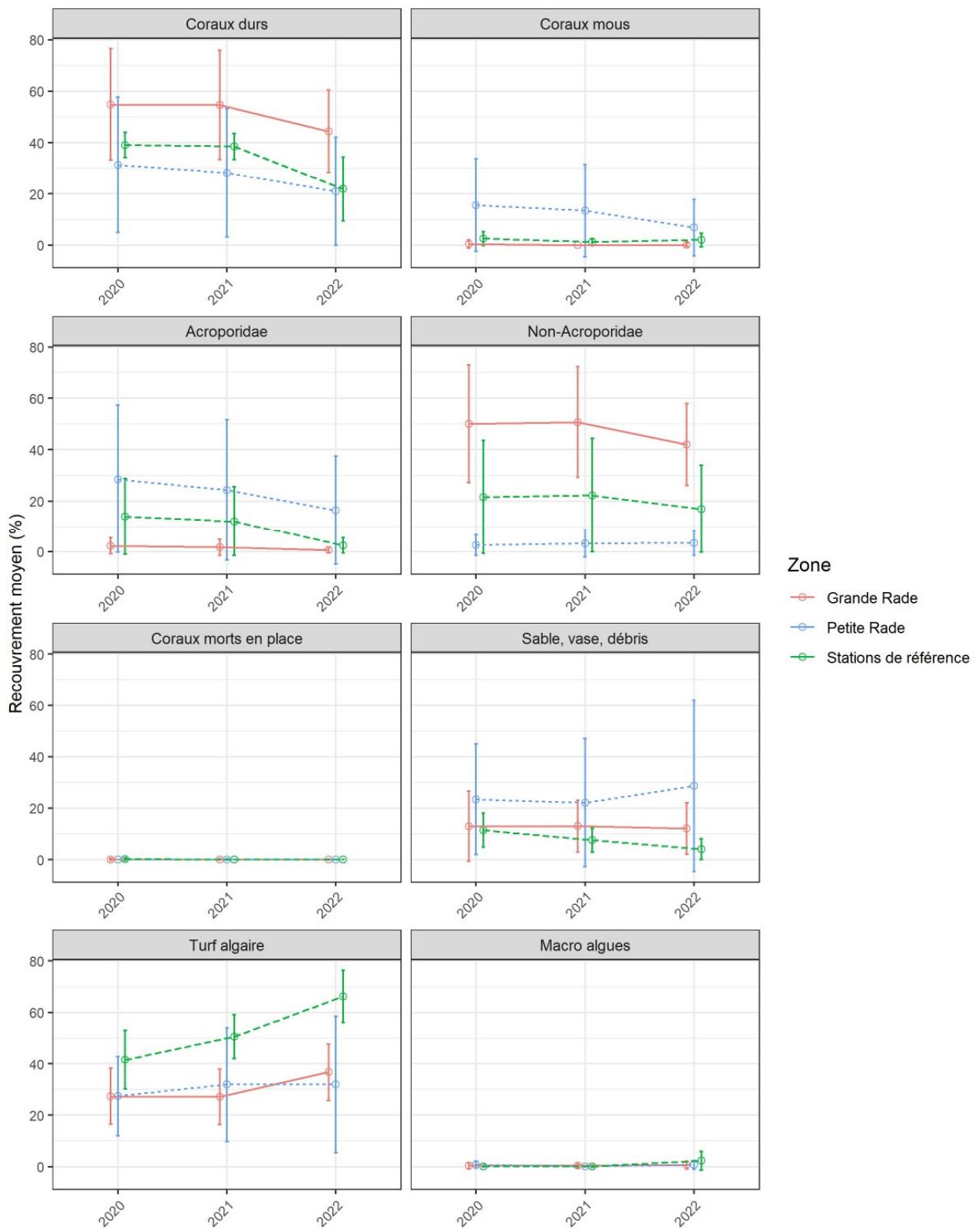


Figure 7 : Représentation graphique de l'évolution des paramètres décrivant les habitats coralliens entre 2020 et 2022, pour les deux rades et la zone de référence. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.

III.3 Analyse des évolutions temporelles dans les zones de sorties de grande rade et de petite rade

Le Tableau 8 présente les résultats des analyses statistiques et la Figure 8 présente les variations 2020-2022 des paramètres décrivant les habitats coralliens pour chacune des zones considérées. Lorsqu'un paramètre présente une variation significative sur la période considérée, l'examen simultané du résultat statistique et de la représentation graphique de la variation permet d'en déterminer l'importance et de l'interpréter.

En zone de **sortie de Grande Rade**, seul le recouvrement moyen en turf algae présente une évolution temporelle statistiquement significative, à laquelle est associée une augmentation de 38 % entre 2021 et 2022 (faisant suite à une diminution moyenne de 14 % de 2020 à 2021). Ceci peut possiblement être rapproché de l'important recouvrement en coraux morts en place observé en 2021 (en particulier sur la station FREYCINET où une mortalité récente avait été observée), et qui seraient désormais colonisés par du turf algae.

Les autres paramètres ne font pas l'objet de variations significatives et apparaissent graphiquement stables. On notera cependant une légère augmentation du recouvrement moyen en coraux durs de 2021 à 2022, se retrouvant notamment au niveau des non-Acroporidæ (bien que non-significatives statistiquement, probablement en raison d'une dispersion importante des données comme l'indiquent les larges écart-types associés aux moyennes). Cette absence de signaux d'impact sur les autres paramètres d'habitat permet de tempérer l'augmentation observée du turf algale, qui sera à surveiller avec attention lors de la prochaine campagne mais ne semble pas associée à ce stade à une dégradation profonde des habitats à l'échelle de cette zone.

Tableau 8 : Résultats des analyses statistiques testant la significativité des variations temporelles des paramètres décrivant les habitats pour les deux zones de sorties de rades entre 2020 et 2022. NS : non-significatif ; * : significatif avec $P<0,05$; ** : $P<0,01$; * : $P<0,001$.**

Descripteurs des habitats	Sortie de Grande Rade		Sortie de Petite Rade	
	Significativité des variations 2020-2022	Détail des variations impliquant 2022	Significativité des variations 2020-2022	Détail des variations impliquant 2022
Coraux durs	ns		ns	
<i>dont Acroporidæ</i>	ns		** ($p = 0,003$)	2022 < 2020,2021
<i>dont non-Acroporidæ</i>	ns		ns	
Coraux mous	ns		ns	
Coraux morts en place	ns		ns	
Sable, vase, débris	ns		ns	
Turf algae	* ($p = 0,010$)	2022 > 2020,2021	ns	
Macroalgues	ns		NA	

En zone de **sortie de Petite Rade**, seul le recouvrement moyen en Acroporidæ présente une évolution temporelle statistiquement significative, à laquelle est associée une diminution de 4 % entre 2021 et 2022. On observe également graphiquement une diminution notable des coraux durs et une augmentation importante du turf algae (bien que non-significatives statistiquement, probablement en raison d'une dispersion importante des données comme l'indiquent les larges écart-types associés aux moyennes).

L'ensemble de ces variations, significatives statistiquement ou non, pointe vers l'amorce d'une dégradation des habitats dans cette zone susceptible d'être reliée aux perturbations mécaniques observées lors de l'échantillonnage (probablement suite des épisodes météorologiques extrêmes cf. III.1.). Cette tendance sera à surveiller et à confirmer lors de la prochaine campagne de suivi.

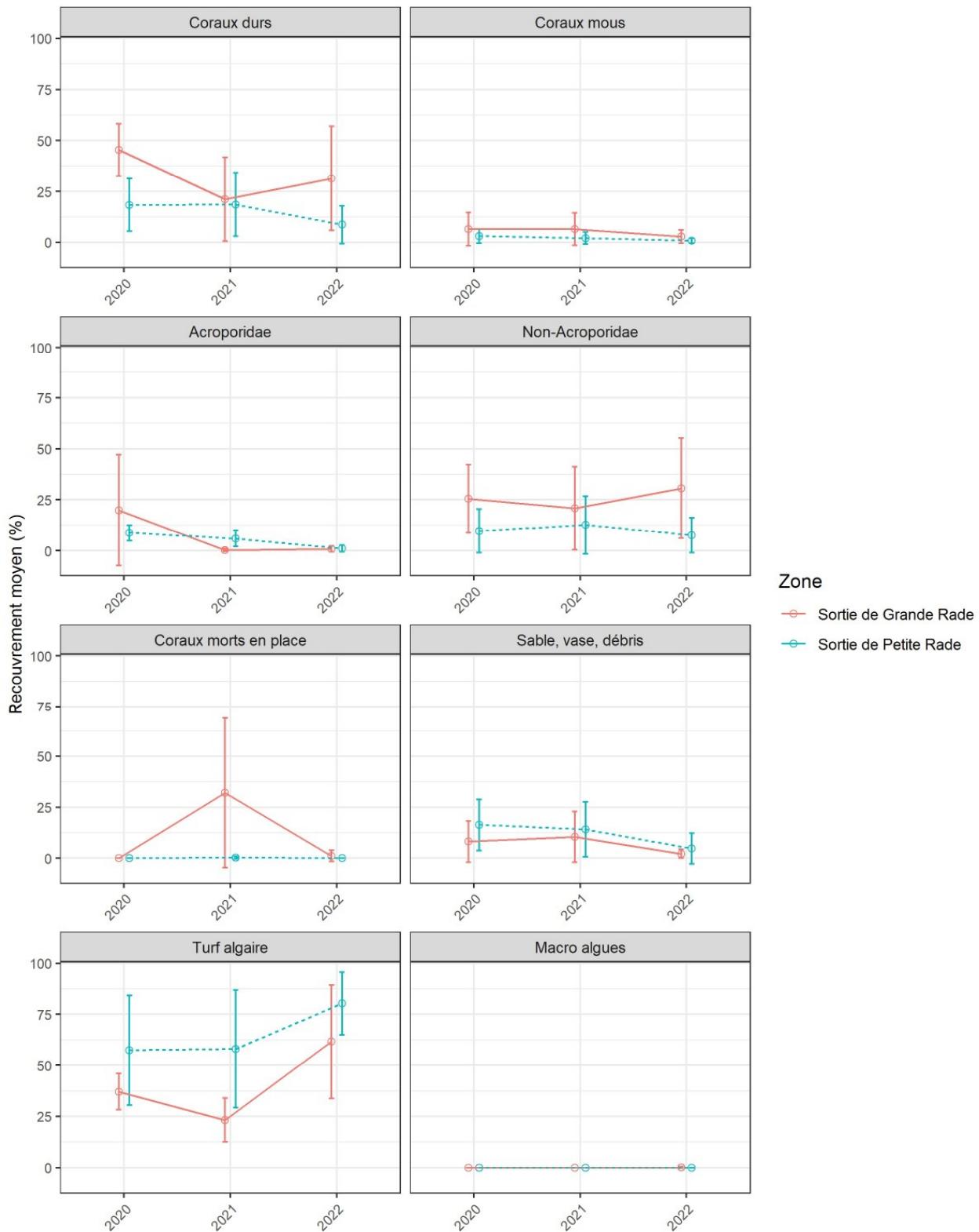


Figure 8 : Représentation graphique des variations des paramètres décrivant les habitats benthiques entre 2020 et 2022, pour les sorties des deux rades. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.

IV EVOLUTIONS DE LA FAUNE INVERTEBRÉE MACROBENTHIQUE

IV.1 Description générale par zone en 2022

IV.1.1 Densité à l'échelle des communautés

L'OCP et le dendrogramme (Figure 9) confirment que le zonage mis en place pour le suivi est pertinent, avec une structuration significative entre les zones (Permanova : facteur zone $< 0,05$).

On observe globalement une distinction des stations de la petite rade de celles de la grande rade, et de fortes similitudes entre stations au sein de chaque zone. Concernant les stations de sorties de rades, elles présentent davantage de similitudes avec les stations de grande rade qu'avec la petite rade. Enfin, les deux stations de la zone de référence présentent de faibles niveaux de similarité entre elles, la station Maa_Sud présentant un profil plus proche des stations de sorties de rades alors que la station Maa_Nord se démarque de la totalité des autres stations, comme chaque année.

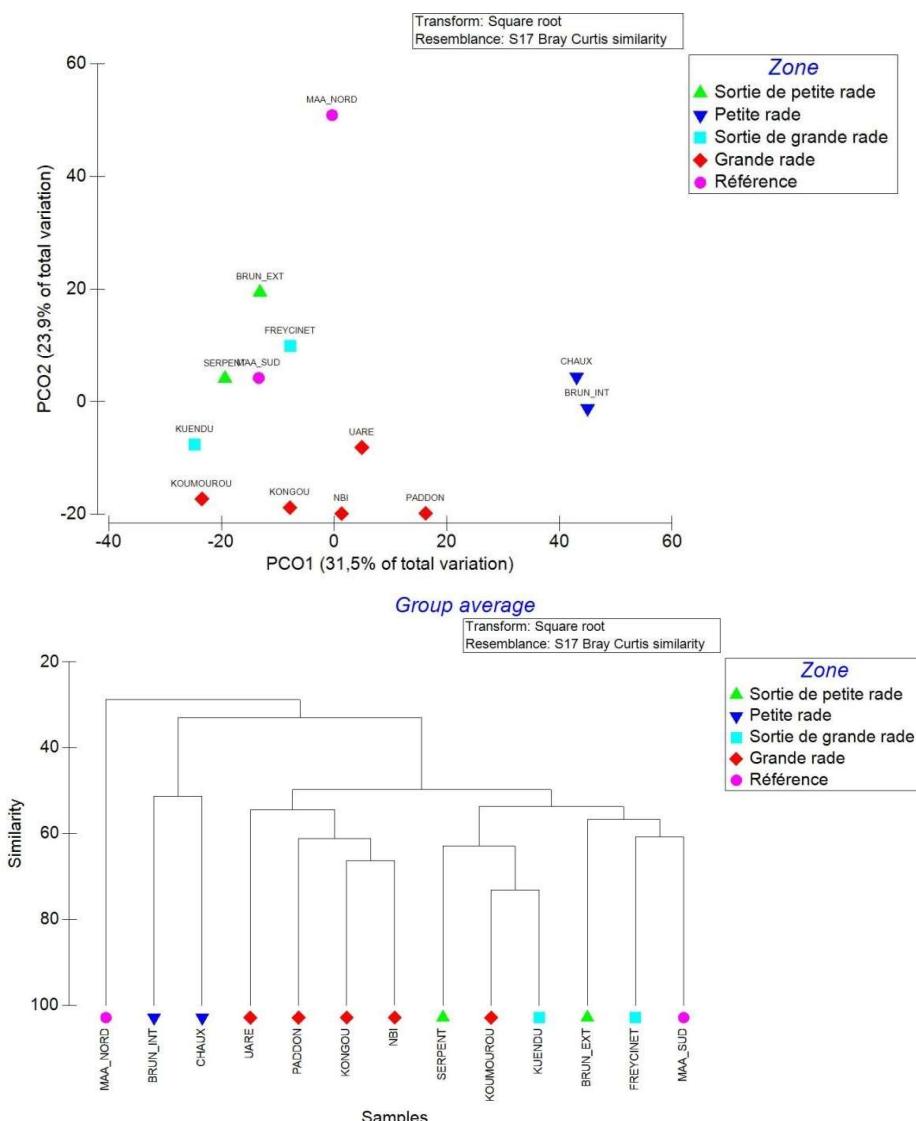


Figure 9 : Haut : Résultats de l'OCP sur les données de densité par genre moyennées par station (les deux axes représentent 55,4% de l'inertie du jeu de données). Bas : dendrogramme de classification

IV.1.2 Densité à l'échelle des groupes & richesse spécifique

La densité totale d'invertébrés est largement supérieure en grande rade et en petite rade que dans les autres zones où elle ne dépasse pas 40 000 ind./ha (Tableau 9 et Figure 10). La zone de référence présente la densité totale la plus faible de toutes les zones.

Les mollusques et les échinodermes dominent largement la densité de la petite rade et de la grande rade, tandis que les mollusques sont les principaux contributeurs de la densité dans les zones de sorties de rades. Les crustacés et vers sont peu présents dans chaque zone.

En 2022, la richesse spécifique moyenne varie de 9,2 espèces (petite rade) à 15,3 espèces (sortie de petite et grande rade) (Tableau 9). Ainsi, à l'inverse des densités, la richesse spécifique n'est pas maximale en grand rade et petite rade.

Tableau 9 : Densité moyenne et écart type (ind./ha) par groupe d'invertébrés et par zone en 2022

Zone	Crustacés		Echinodermes		Mollusques		Vers		Richesse spécifique	
	Moyenne	ET	Moyenne	ET	Moyenne	ET	Moyenne	ET	Moyenne	ET
Grande rade	2683	5056	37000	42945	49400	15324	183	200	14,6	3,7
Petite rade	16583	37853	72083	42988	65750	67025	0	0	9,2	3,4
Référence	1500	1423	1417	1571	13667	11246	625	787	13,0	4,2
Sortie de grande rade	667	585	5208	1965	31917	18731	250	316	15,3	4,7
Sortie de petite rade	1375	1403	1667	1008	21792	18211	42	102	15,3	5,2

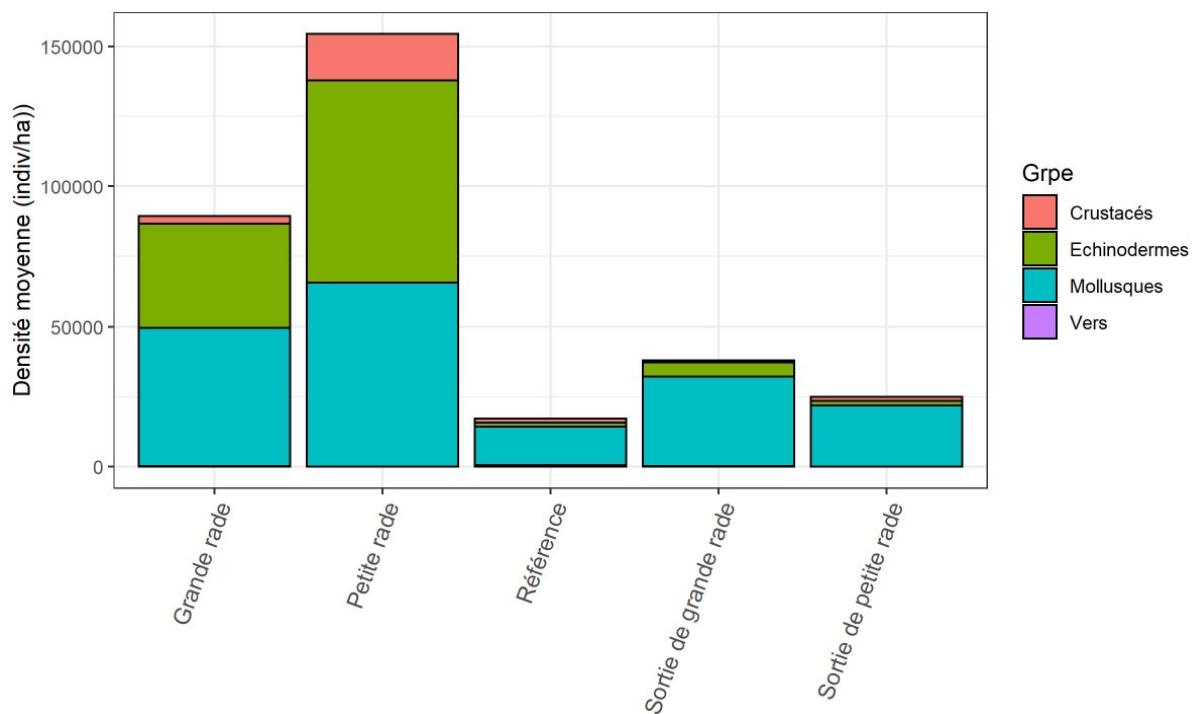


Figure 10 : Composition de la densité moyenne d'invertébrés par zone (ind./ha) en 2022

IV.1 Évolution du macrobenthos à l'échelle des communautés par zone entre 2020 et 2022

L'OCP et le dendrogramme (Figure 11) confirment une structuration significative entre les zones valable toutes campagnes confondues depuis 2020 (Permanova : facteur zone < 0,05, facteur campagne > 0,05, facteur campagne \times zone > 0,05).

La structuration des données selon les zones, décrite à l'échelle des communautés en 2022 en Figure 9, reste globalement valable chaque année depuis 2020. Si les stations montrent peu d'évolutions de leur densité à l'échelle des communautés entre 2020 et 2022, on remarque une évolution de la station Chaux en 2022 qui fera l'objet d'une attention particulière par la suite.

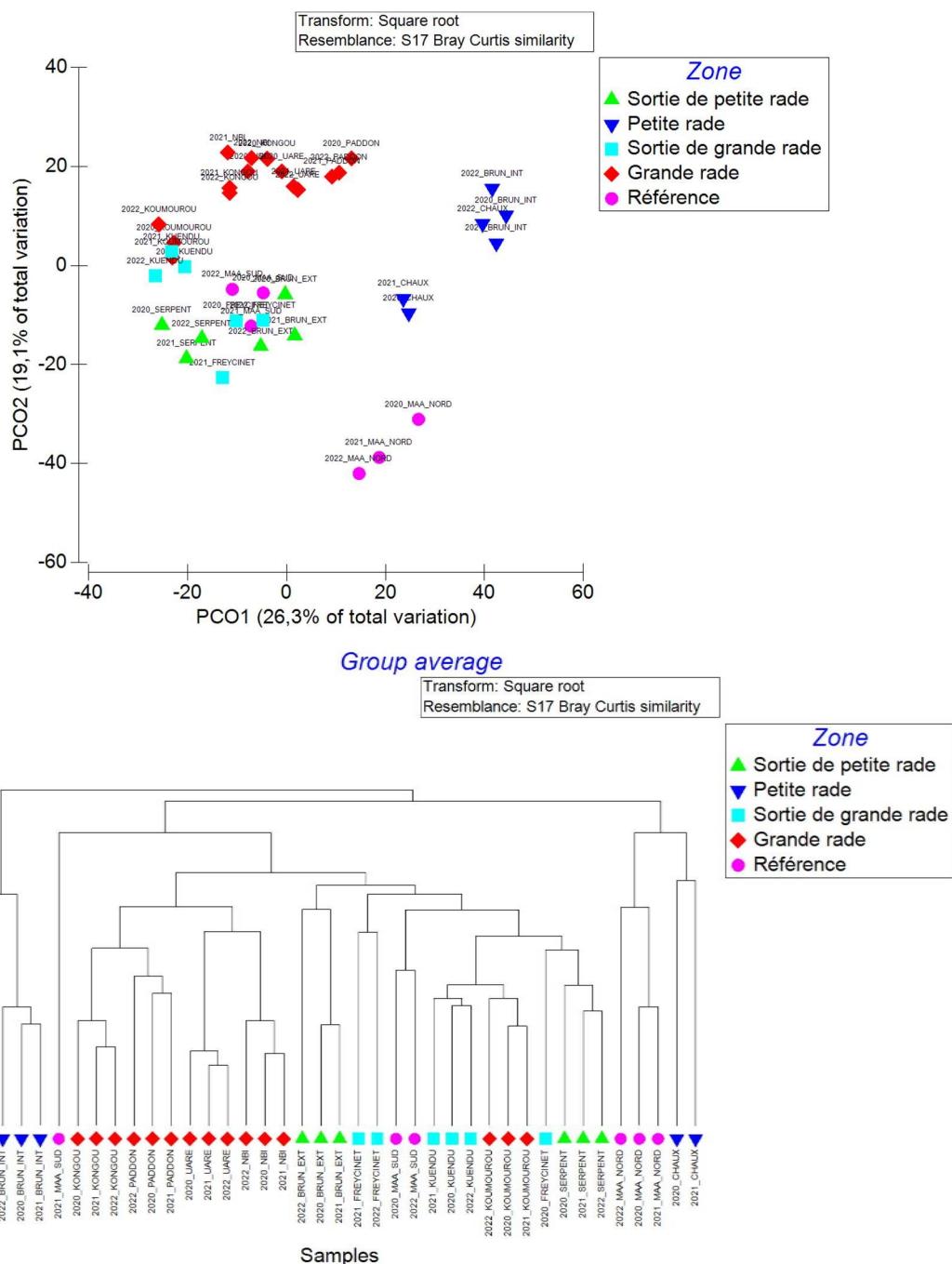


Figure 11 : Haut : Résultats de l'OCP sur les données de densité par genre moyennées par station (les deux axes représentent 45,4% de l'inertie du jeu de données). Bas : dendrogramme de classification

IV.2 Analyses Contrôle-Impact pour la recherche de changements dans les zones de rades

IV.2.1 Richesse spécifique

La richesse spécifique moyenne par zone en 2020 et 2022, ainsi que les résultats des ANOVA à deux facteurs réalisées pour chaque couple de zones (grande rade *versus* référence ; petite rade *versus* référence) sont respectivement présentés dans la Figure 12 et Tableau 10.

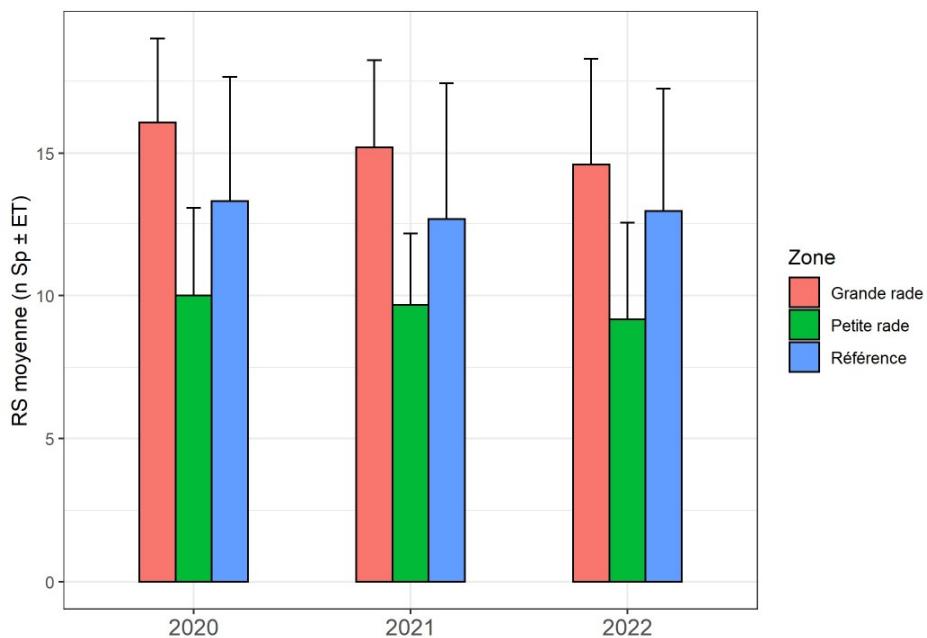


Figure 12 : Évolution de la richesse spécifique moyenne d'invertébrés par zone pour l'analyse de type CI entre 2020 et 2022

Tableau 10 : Résultats de l'ANOVA à deux facteurs (campagne et zone) sur la richesse spécifique transformée (racine carrée) par couple de zones : grande rade *versus* référence, petite rade *versus* référence

Richesse spécifique		
Grande rade	p value	post-hoc
Campagne	NS	
Zone	*	Grande rade > Référence
Campagne x Zone	NS	
Richesse spécifique		
Petite rade	p value	post-hoc
Campagne	NS	
Zone	*	Petite rade < Référence
Campagne x Zone	NS	

* (p<0,05), ** (p<0,01), *** (p<0,001)

Aucun signal de perturbation n'est détecté entre 2020 et 2022 pour la richesse spécifique en grande rade et en petite rade, en comparaison à la zone de référence (Tableau 10).

On constate que la RS est significativement supérieure en grande rade qu'en zone de référence pour chaque campagne (Tableau 10) et qu'elle montre une très légère diminution entre 2020 et 2022. A l'inverse, elle est significativement plus élevée en zone de référence qu'en petite rade toutes campagnes confondues depuis 2020.

IV.2.2 Densité par groupes

La densité d'invertébrés par groupe et par zone en 2020 et 2022 est présentée sur la Figure 13 et les résultats des ANOVA à deux facteurs dans le Tableau 11. Les densités par sous-groupes sont présentées en Annexe.

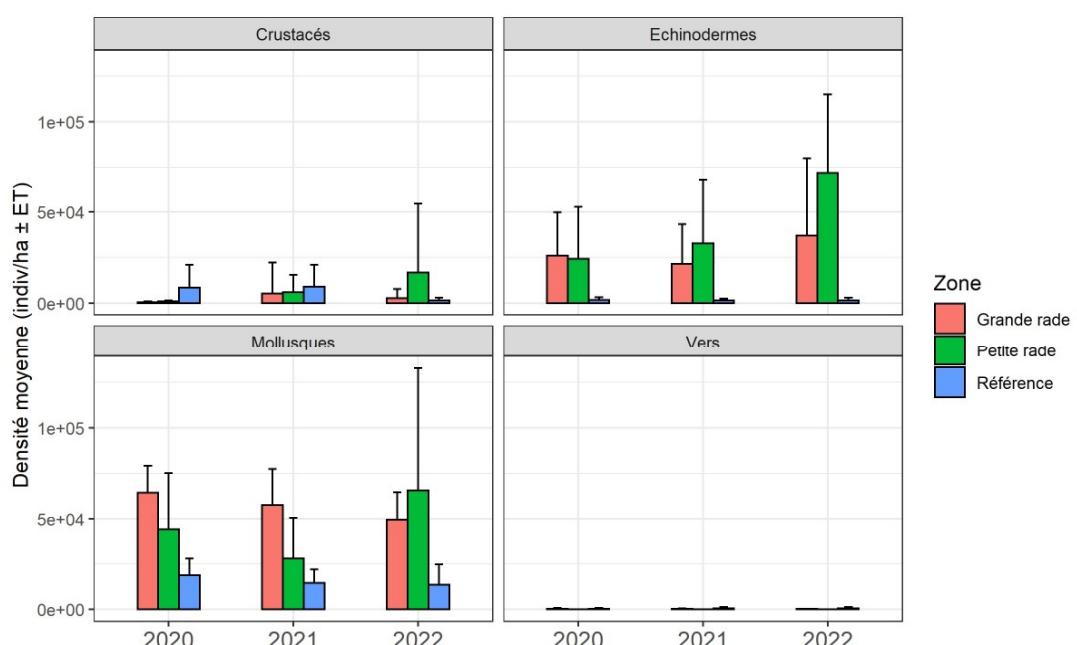


Figure 13 : Évolution de la densité moyenne par groupe et par zone pour l'analyse de type CI entre 2020 et 2022

Tableau 11 : Résultats de l'ANOVA à deux facteurs (campagne et zone) sur la densité transformée (racine carrée) par couple de zones : grande rade versus référence, petite rade versus référence

	Densité Mollusques		Densité Echinodermes		Densité Crustacés		Densité Vers	
Grande rade	p value	post-hoc	p value	post-hoc	p value	post-hoc	p value	post-hoc
Campagne	*	2020>2022	NS		NS		NS	
Zone	***	Grande rade > Référence	***	Grande rade > Référence	NS		*	Grande rade < Référence
Campagne × Zone	NS		NS		NS		NS	

	Densité Mollusques		Densité Echinodermes		Densité Crustacés		Densité Vers	
Petite rade	p value	post-hoc	p value	post-hoc	p value	post-hoc	p value	post-hoc
Campagne	NS		NS		NS		NS	
Zone	**	Petite rade > Référence	***	Petite rade > Référence	NS		**	Référence > Petite rade
Campagne × Zone	NS		NS		NS		NS	

IV.2.2.1 Grande rade

Aucun signal d'impact n'est détecté sur les densités d'invertébrés par groupe entre 2020 et 2022 en grande rade, comparé à la zone de référence (Tableau 11). Pour chaque groupe, les densités ont peu évolué en grande rade au regard de la variabilité inter-station existant dans la zone chaque année.

Une légère augmentation de la densité des échinodermes est toutefois observée en grande rade entre 2020/2021 et 2022, liée aux Echinidés et plus précisément aux oursins diadèmes (*Diadema setosum*) dont la densité a doublé sur la station Nbi. Cette station présente en effet une densité exceptionnelle pour ces oursins, avec parfois plus de 500 individus par transects en 2022 (Figure 14).



Figure 14 : Densité élevée d'oursins diadèmes (*Diadema setosum*) sur les transects de la station Nbi (Grande rade)

On note que la zone de référence présente des densités particulièrement faibles en mollusques et échinodermes comparées à celle des rades, induisant un effet zone significatif toutes campagnes confondues pour ces deux groupes.

Enfin, un effet zone est également détecté sur la densité de vers mais celle-ci reste très minime chaque année dans chaque zone (<1000 ind./ha soit 4 ind./transect).

IV.2.2.2 Petite rade

Comme pour la grande rade, aucun signal d'impact n'est détecté sur les densités d'invertébrés par groupe entre 2020 et 2022 en petite rade, par comparaison à la zone de référence (Tableau 11).

On observe toutefois une évolution en dents de scie de la densité de mollusques en petite rade entre 2020 et 2022 avec un minimum en 2021 (28 125 ind./ha) et un maximum en 2022 (65 750 ind./ha), associée à une forte variabilité inter-stations. L'examen des données par station (Annexe II) montre que ces variations sont liées principalement à la station Brun_int. Cette station montre en effet des variations de densités de bivalves, et plus précisément des huîtres *Isognomon isognomon*, *Saccostrea cucullata* et *Pteria sp.* (voir Figure 18) qui dominent largement la densité de la station chaque année (Annexe II).

La densité d'échinodermes montre également une évolution en 2022 (72 083 ind./ha) qui a doublé par rapport à 2021 (32 708 ind./ha). L'examen des données par station montre que cette évolution est liée aux deux stations de la zone : Brun_int et Chaux et plus précisément à l'oursin *Parasalenia gratiosa* qui contribue majoritairement à la densité d'échinodermes (Echinidés) sur ces stations. Si cette évolution est confirmée sur Brun_int, l'absence de piquets en 2022 sur la station Chaux introduit un biais qui a pu influencer cette évolution en 2022.

On note enfin une augmentation régulière de la densité de crustacés en petite rade entre 2020 et 2022, liée exclusivement à la station Chaux et à une espèce de crabe indéterminée de la famille Porcellanidae.

La densité de vers reste très faible chaque année dans les deux zones.

IV.2.3 Densité de genres remarquables

Les densités des genres remarquables restent faibles chaque année (inférieures à 1000 ind./ha soit 4 individus par transect), et aucune *Acanthaster* n'a été observée pour chaque zone et chaque année (Figure 15).

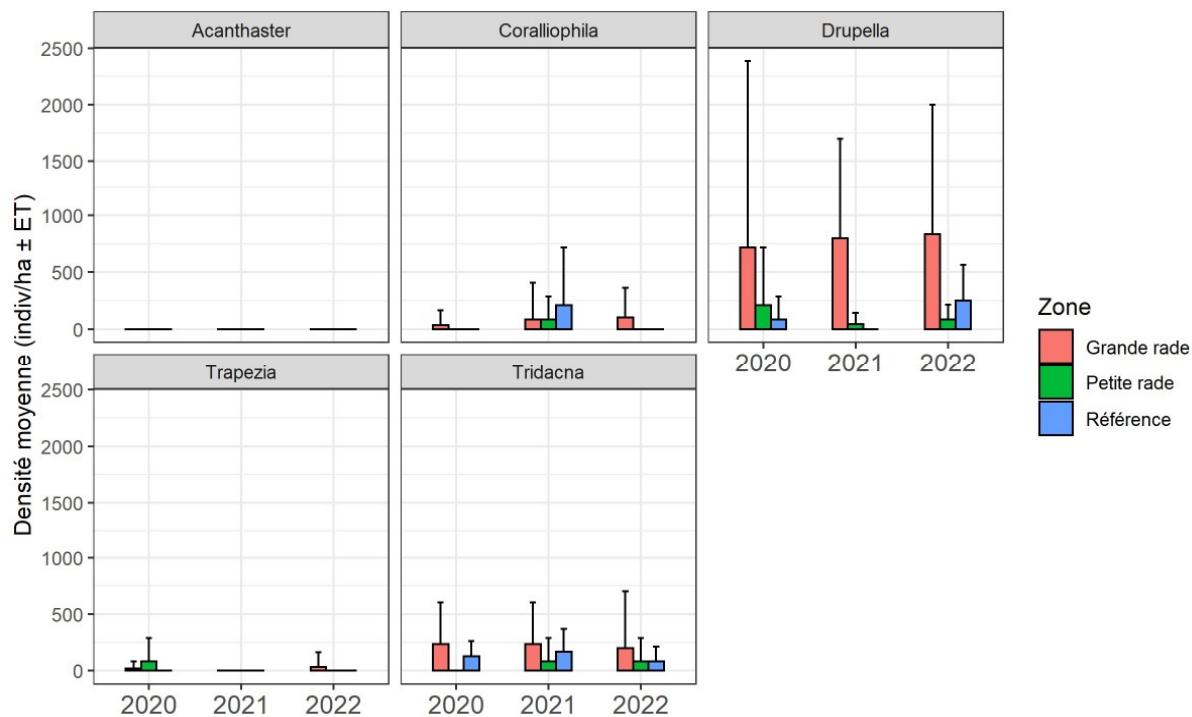


Figure 15 : Évolution de la densité moyenne des espèces remarquables par zone pour la grande rade, petite rade et la zone de référence

IV.3 Analyse des évolutions temporelles dans les zones de sorties de grande rade et de petite rade

IV.3.1 Richesse spécifique

La richesse spécifique a diminué régulièrement en sortie de petite rade entre 2020 et 2022, alors qu'elle a oscillé autour de 15 espèces en moyenne en sortie de grande, sans que ces évolutions ne soient significatives (Figure 16 et Tableau 12).

En sortie de grande rade, la baisse observée entre 2020 et 2021 était liée principalement à la station Freycinet qui a subi l'impact de la dépression Lucas (3 février 2021) en recevant les eaux douces et chargées de la rivière Dumbéa. Cette situation a de nouveau été observée lors de la campagne 2022 puisque la campagne a été réalisée quelques jours après la dépression Dovi. Bien que la dégradation observée sur l'habitat en 2021 soit confirmée en 2022, une légère récupération de la diversité d'invertébrés est observée en 2022 avec notamment la réapparition d'échinodermes (2 espèces d'holothuries et une espèce d'oursin) et une augmentation du nombre d'espèces de bivalves (11 à 14) sur la station.

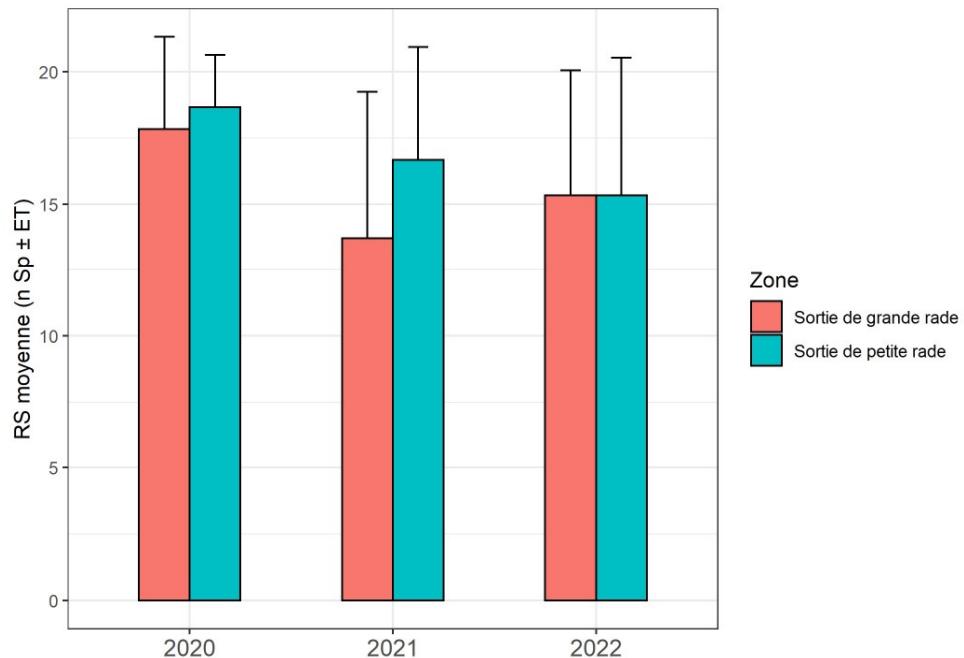


Figure 16 : Évolution de la richesse spécifique moyenne d'invertébrés par zone entre 2020 et 2022

Tableau 12 : Résultats de l'ANOVA à un facteur (campagne) sur la richesse spécifique transformée (racine carrée), par zone (sortie de petite rade et sortie de grande rade)

Sortie grande rade	Richesse spécifique	
	p value	post-hoc
Campagne	NS	
	Richesse spécifique	
Sortie grande rade	p value	post-hoc
Campagne	NS	

* (p<0,05), ** (p<0,01)

IV.3.2 Densité par groupes

La densité d'invertébrés par groupe et par zone en 2020 et 2022 est présentée sur la Figure 17 et les résultats de l'ANOVA à un facteur (campagne) sont présentés dans le Tableau 13. Toutes les densités par sous-groupes sont détaillées en Annexe II.

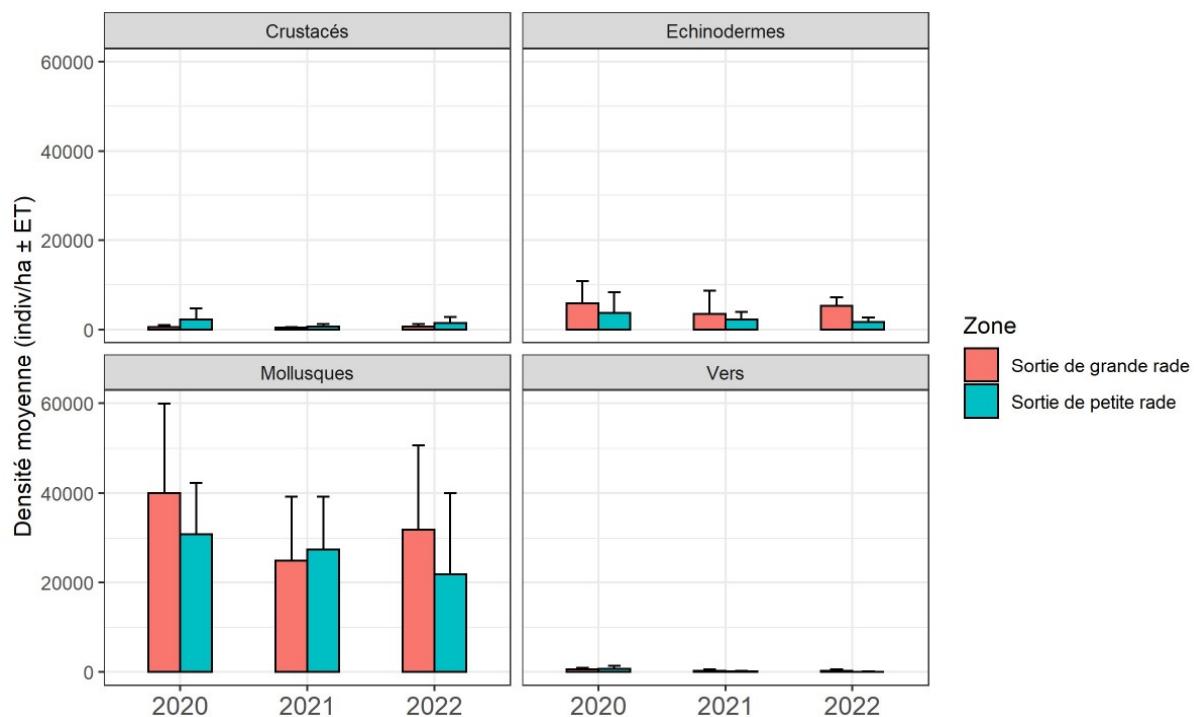


Figure 17 : Évolution de la densité moyenne par groupe et par zone en sortie de grande rade et sortie de petite rade entre 2020 et 2022

Tableau 13 : Résultats de l'ANOVA à un facteur (campagne) sur la densité de chaque groupe transformée (racine carrée) par zone (sortie de petite rade et sortie de grande rade)

Sortie grande rade	Densité Mollusques		Densité Echinodermes		Densité Crustacés		Densité Vers	
	p value	post-hoc	p value	post-hoc	p value	post-hoc	p value	post-hoc
Campagne	NS		NS		NS		NS	
Sortie petite rade	Densité Mollusques		Densité Echinodermes		Densité Crustacés		Densité Vers	
	p value	post-hoc	p value	post-hoc	p value	post-hoc	p value	post-hoc
Campagne	NS		NS		NS		*	2020, 2022>2021

IV.3.2.1 Sortie de grande rade

Aucune évolution significative de la densité de chaque groupe n'est observée en sortie de grande rade entre 2020 et 2022 (Figure 17 et Tableau 13). On observe toutefois une évolution en dents de scie de la densité de mollusques entre 2020 et 2022, liée aux deux stations de la zone qui montrent une baisse en 2021 puis une récupération en 2022 (Annexe I). L'examen des données par sous-groupe montre que cette diminution est due aux bivalves, représentants majoritaires du groupe (Annexe II) et plus précisément aux genres *Pteria*, *Pedium* et *Isognomon* qui représentent à eux seuls la majorité de la densité sur ces stations (Figure 18).

Les autres groupes ne montrent pas de fortes évolutions entre les années.



Figure 18 : Photographie illustrative de *Pedum spondyloideum*, *Pteria sp* et *Isognomon isognomon* (Source : Google Images)

IV.3.2.2 Sortie de petite rade

Aucune évolution significative de la densité de chaque groupe n'est observée en sortie de petite rade entre 2020 et 2022, à l'exception des vers (Figure 17 et Tableau 13). Pour ce groupe, on remarque toutefois que les densités sont extrêmement faibles chaque année (inférieure à 1 000 ind./ha, soit 4 individus par transect) et que la diminution observée à partir de 2021 ne traduit pas un signal d'impact en tant que tel.

Une légère diminution progressive de la densité de mollusques est observée entre 2020 et 2022. Bien qu'elle ne soit pas significative, elle semble majoritairement liée à la station Brun_ext et au sous-groupe des bivalves (Annexe I et II) qui représente la très grande majorité des mollusques. En effet, la densité d'*Isognomon isognomon* et *Pteria sp* qui représentaient la majorité des bivalves en 2021 a drastiquement diminué en 2022, en lien probable avec les perturbations de l'habitat observées sur cette station.

Les autres groupes ne montrent pas d'évolutions particulières.

IV.3.3 Densité de genres remarquables

La densité des genres remarquables est très faible chaque année dans chaque zone. La densité de Drupella a diminué en sortie de petite rade à la suite de la disparition d'un regroupement d'individus sur la station Brun_ext en 2020 (environ 30 individus en 2020 sur un transect). A l'inverse, elle a augmenté en 2022 en sortie de grande rade, à la suite de l'apparition d'une invasion localisée sur un transect de la station Kuendu (30 individus sur un transect).

Les autres genres ne montrent pas de fortes évolutions et les Acanthaster sont absentes ou très peu présentes chaque année.

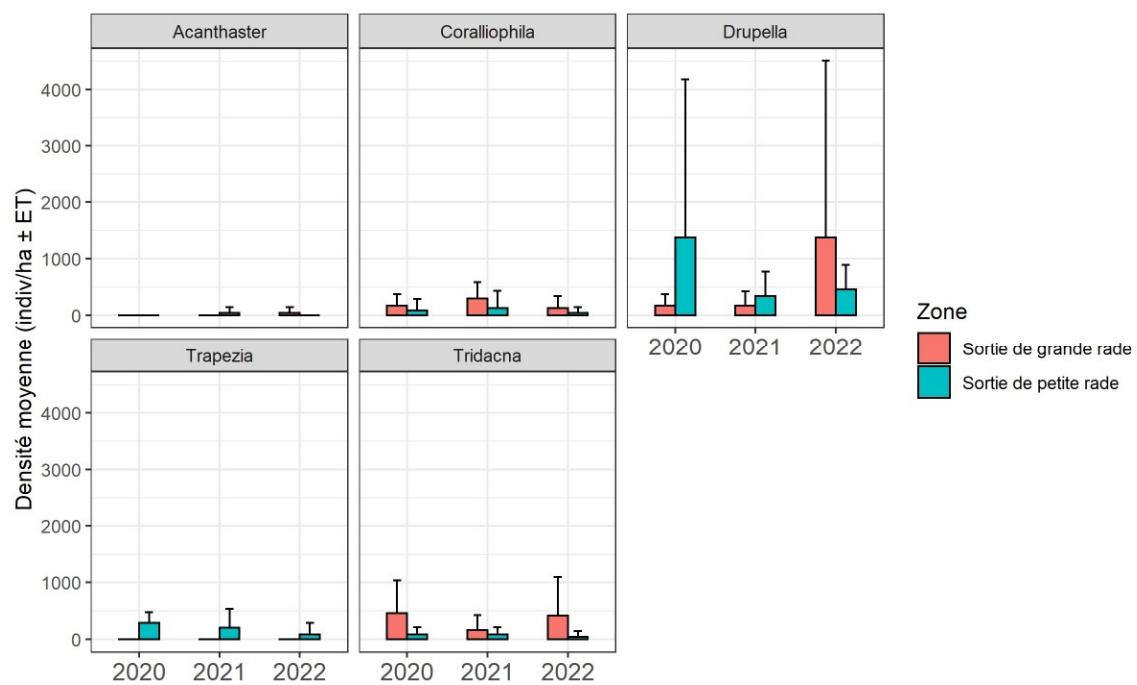


Figure 19 : Évolution de la densité moyenne des espèces remarquables pour les zones de sorties de rades

V EVOLUTIONS DE L'ICHTYOFaUNE

V.1 Description générale de l'ichtyofaune par zone en 2022

Sur l'ensemble de la campagne 2022, 137 espèces correspondant à 74 genres et 32 familles de poissons ont été recensées.

La densité moyenne observée est de 3,9 individus/m², avec une densité maximum de 9,5 individus/m² atteinte sur le transect T01 de la station NBI. La biomasse moyenne observée est de 101,0 g/m², avec une biomasse maximum de 757,3 g/m² sur le transect T02 de la station KOUMOUROU. La richesse spécifique moyenne observée est de 20,7 espèces, avec une richesse maximum de 41 espèces sur le transect T01 de la station KOUMOUROU.

Le Tableau 2 présente les niveaux moyens de densité, biomasse et richesse spécifique en 2022 au sein des cinq zones du plan de suivi.

La densité totale est maximale en Grande Rade (5,1 ind./m²) et minimale en sortie de Petite Rade (2,0 ind./m², correspondant toutefois à des niveaux de densités cohérents pour des récifs frangeants globalement exposés tels que ceux échantillonnés dans cette zone). Dans toutes les zones, la densité est très largement dominée par les espèces non-commerciales, auxquelles les Pomacentridae (et consécutivement les planctonophages voire dans une moindre mesure les herbivores) sont très fortement contributifs.

En termes de biomasse, les récifs situés en sortie de Petite Rade présentent des niveaux sensiblement plus élevés (179,5 g/m², d'un ordre de grandeur équivalent au niveau moyen observé en Grande Rade), notamment vis-à-vis des stations de la Petite Rade et de la zone de référence où la biomasse apparaît faible (respectivement 24,4 et 11,7 g/m²). La déclinaison de la biomasse montre que celle-ci est dominée par les espèces commerciales dans les zones de plus forte biomasse (Grande Rade, sortie de Grande Rade, et sortie de Petite Rade), et par les espèces non-commerciales dans les zones de faible biomasse (Petite Rade et zone de référence). La structure trophique en biomasse apparaît également variable selon les zones (celle-ci restant cependant moins informative que les structures en densité et en richesse spécifique dans le cadre du présent suivi).

Concernant la richesse spécifique, elle apparaît faible en zone de référence et en Petite Rade (respectivement 12,5 et 16 espèces en moyenne par transect, avec moins de deux espèces commerciales observées en moyenne) et plus importante en sortie de Petite Rade et en Grande Rade (respectivement 26 et 24,5 espèces en moyenne). Ce paramètre est systématiquement dominé par les espèces non-commerciales, et par les carnivores dans l'ensemble des zones. On notera ici que, parmi les trois grands paramètres caractérisant l'ichtyofaune, la richesse spécifique est l'indicateur le plus informatif et le plus robuste en matière de détection de changements dans l'ichtyofaune étant donné le type de pressions considéré dans cette étude (suivi par la densité puis, de manière plus secondaire dans les diagnostics, par la biomasse).

De manière générale, on observe donc un contraste notable entre les différentes zones suivies, l'ensemble de ces niveaux généraux apparaît toutefois cohérent avec les grands types de biotopes rencontrés dans chaque zone.

Tableau 14 : Niveaux moyens de densité, de biomasse et de richesse spécifique observés en 2022 sur chacune des zones. Les écart-types pour les moyennes sont fournis entre parenthèses.

	Grande Rade	Petite Rade	Sortie de Grande Rade	Sortie de Petite Rade	Zone de référence
Densité (ind.m ⁻²)	Toutes espèces 5,1 (± 2,5)	3,6 (± 2,9)	2,9 (± 1,5)	2 (± 1)	3,9 (± 1,9)
	Commerciaux 0,4 (± 0,5)	0,1 (± 0,1)	0,4 (± 0,5)	0,4 (± 0,4)	0 (± 0)
	Non-commerciaux 4,7 (± 2,3)	3,6 (± 2,8)	2,5 (± 1,2)	1,5 (± 0,8)	3,9 (± 1,9)
	Herbivores 0,9 (± 0,6)	0,3 (± 0,2)	0,7 (± 0,5)	0,8 (± 0,5)	0,2 (± 0,1)
	Carnivores 0,6 (± 0,3)	0,4 (± 0,3)	0,6 (± 0,5)	0,7 (± 0,5)	0,2 (± 0,1)
	Planctonophages 3,4 (± 2,3)	2,7 (± 2,3)	1,6 (± 1)	0,5 (± 0,3)	3,3 (± 1,8)
	Piscivores 0,2 (± 0,3)	0,2 (± 0,3)	0 (± 0)	0 (± 0)	0,2 (± 0,2)
	Chaetodontidae 0,1 (± 0,1)	0,1 (± 0,1)	0,1 (± 0,1)	0,1 (± 0,1)	0 (± 0)
	Pomacentridae 3,2 (± 1,7)	2,5 (± 2,4)	2 (± 0,9)	1 (± 0,6)	3,2 (± 1,9)
	Toutes espèces 147 (± 216,4)	24,4 (± 23,3)	73,3 (± 69,3)	179,5 (± 207)	11,7 (± 4,6)
Biomasse (g/m ²)	Commerciaux 119,2 (± 213,7)	9,8 (± 10,6)	49,1 (± 55,5)	146,1 (± 192,5)	1,8 (± 2)
	Non-commerciaux 27,7 (± 19,6)	14,6 (± 13,1)	24,2 (± 18,5)	33,4 (± 30,1)	9,9 (± 4,3)
	Herbivores 95,9 (± 183,3)	8,1 (± 9,2)	38,7 (± 39,4)	129,5 (± 187,6)	2 (± 1,6)
	Carnivores 34,1 (± 73,9)	10,7 (± 10,6)	20,8 (± 22,6)	35,5 (± 41,9)	3,5 (± 2,5)
	Planctonophages 9,1 (± 12,6)	4,5 (± 4,2)	5,6 (± 8,1)	1,6 (± 1)	5,7 (± 3,4)
	Piscivores 7,9 (± 17,8)	1,1 (± 1,9)	8,2 (± 12,5)	12,8 (± 20)	0,4 (± 0,4)
	Chaetodontidae 1,7 (± 2,3)	1,1 (± 1,2)	1,6 (± 1,5)	3,2 (± 2,9)	0,3 (± 0,5)
	Pomacentridae 19,6 (± 14,1)	8,6 (± 7)	9,8 (± 7,8)	11,3 (± 20,6)	6,1 (± 4,2)
	Toutes espèces 24,5 (± 8)	16 (± 9,5)	18,8 (± 10,8)	26 (± 6,7)	12,5 (± 2,2)
	Commerciaux 4,1 (± 4)	2 (± 2,3)	3,5 (± 4)	5,5 (± 1,9)	0,8 (± 0,8)
Richesse spécifique	Non-commerciaux 20,5 (± 4,8)	14 (± 7,7)	15,3 (± 6,9)	20,5 (± 6,1)	11,7 (± 2)
	Herbivores 6,5 (± 3,2)	3,7 (± 2,4)	3,3 (± 2,5)	6 (± 1,8)	2,3 (± 1,2)
	Carnivores 10,7 (± 3,9)	8,3 (± 5)	9,8 (± 6,6)	14,3 (± 4,6)	5,2 (± 1)
	Planctonophages 6,2 (± 2,6)	3,3 (± 2,9)	4,7 (± 1)	4,8 (± 1,5)	4,3 (± 1)
	Piscivores 1,2 (± 0,8)	0,7 (± 0,8)	1 (± 1,3)	0,8 (± 0,8)	0,7 (± 0,5)
	Chaetodontidae 3,8 (± 1,9)	3,2 (± 2,6)	3,2 (± 1,8)	5,3 (± 2,2)	1 (± 0,9)
	Pomacentridae 8,5 (± 1,7)	5,3 (± 3,1)	7 (± 2,1)	7 (± 2,8)	5,2 (± 0,8)
	Toutes espèces 24,5 (± 8)	16 (± 9,5)	18,8 (± 10,8)	26 (± 6,7)	12,5 (± 2,2)
	Commerciaux 4,1 (± 4)	2 (± 2,3)	3,5 (± 4)	5,5 (± 1,9)	0,8 (± 0,8)
	Non-commerciaux 20,5 (± 4,8)	14 (± 7,7)	15,3 (± 6,9)	20,5 (± 6,1)	11,7 (± 2)

V.2 Analyses Contrôle-Impact pour la recherche de changements dans les zones de rades

Le Tableau 15 et le Tableau 16 présentent les résultats des modèles statistiques réalisés sur les variables décrivant les peuplements ichtyologiques, respectivement en Grande Rade et en Petite Rade. La colonne « Effet zone » indique s'il existe une différence significative entre zone d'impact et zone de référence (toutes années confondues). La colonne « Effet campagne » indique s'il existe des variations temporelles significatives (toutes zones confondues). Enfin, la colonne « Interaction zone x campagne » indique s'il existe une évolution différentielle entre zone d'impact et zone de référence, pouvant alors indiquer un changement spécifique à l'une de ces zones. Les deux premières colonnes de résultats sont fournies à titre indicatif et pour visualisation des résultats de modélisation, mais c'est

sur la dernière colonne que se fonde la détection éventuelle de changement de l'ichtyofaune et donc celle qui est commentée ci-après.

Les Figure 18, Figure 19, et Figure 20 illustrent graphiquement l'évolution conjointe de l'ensemble des variables ichthyologiques en Petite Rade, Grande Rade, et zone de référence, à des fins d'interprétation des changements significatifs qui seraient le cas échéant identifiés à l'issue des analyses statistiques.

Tableau 15 : Résultats des modèles pour la détection de signaux de changements (représentés par le facteur d'interaction « zone x campagne ») sur l'ichtyofaune dans la zone de la grande rade ; NS : non-significatif ; * : significatif avec $P<0,05$; ** : $P<0,01$; * : $P<0,001$.**

Paramètre	Variable	Grande rade			Détail
		Effet zone	Effet campagne	Interaction zone x campagne	
		Significativité	Significativité	Significativité	
Densité	Toutes espèces	*** ($p<0,001$)	** ($p=0,002$)	ns	2021-2022 : augmentation en grande rade, diminution en référence
	Commerciaux	ns	ns	ns	
	Non-commerciaux	*** ($p<0,001$)	*** ($p<0,001$)	ns	
	Herbivores	** ($p=0,01$)	ns	* ($p=0,034$)	
	Carnivores	ns	ns	ns	
	Planctonophages	ns	*** ($p<0,001$)	*** ($p<0,001$)	
	Piscivores	ns	ns	ns	
	Chaetodontidae	ns	ns	ns	
	Pomacentridae	ns	ns	ns	
Biomasse	Toutes espèces	ns	ns	ns	2021-2022 : stabilité en grande rade, diminution en référence
	Commerciaux	ns	ns	ns	
	Non-commerciaux	* ($p=0,017$)	ns	ns	
	Herbivores	ns	ns	ns	
	Carnivores	ns	ns	ns	
	Planctonophages	ns	ns	ns	
	Piscivores	ns	ns	ns	
	Chaetodontidae	ns	ns	ns	
	Pomacentridae	* ($p=0,014$)	ns	ns	
Richesse spécifique	Toutes espèces	ns	ns	ns	
	Commerciaux	ns	ns	ns	
	Non-commerciaux	ns	ns	ns	
	Herbivores	ns	ns	ns	
	Carnivores	ns	ns	ns	
	Planctonophages	ns	ns	ns	
	Piscivores	ns	ns	ns	
	Chaetodontidae	ns	ns	ns	
	Pomacentridae	* ($p=0,018$)	ns	ns	

En **Grande Rade**, deux paramètres présentent un effet significatif de l'interaction « zone x campagne » sur la période 2020-2022 : la densité des herbivores et des planctonophages, correspondant dans les deux cas à une diminution en zone de référence (tandis que les niveaux augmentent ou restent stables en Grande Rade), notamment entre 2020 et 2021 et poursuivie plus modérément de 2021 à 2022.

Ces deux variations découlent essentiellement d'une diminution de la densité des Pomacentridae (qui étaient particulièrement élevée en 2020), qui se répercute sur les groupes trophiques auxquels cette famille est très fortement contributive, à savoir les planctonophages et dans une moindre mesure les herbivores. On notera que ce profil d'évolution entre 2020 et 2022 se retrouve sur la densité totale

et celle des espèces non-commerciales (bien que non significatif statistiquement), étant donné la forte contribution de la famille des Pomacentridae à la densité de l'ichtyofaune dans ces zones.

Pour ces deux variations, s'agissant d'une diminution en zone de référence et étant donné la tendance observée en Grande Rade, ces variations ne sauraient par définition correspondre à un signal de changement de l'ichtyofaune dans la zone de la Grande Rade.

Tableau 16 : Résultats des modèles pour la détection de signaux de changements (représentés par le facteur d'interaction « zone x campagne ») sur l'ichtyofaune dans la zone de la petite rade ; NS : non-significatif ; * : significatif avec $P<0,05$; ** : $P<0,01$; * : $P<0,001$.**

Paramètre	Variable	Petite Rade			Détail
		Effet zone	Effet campagne	Interaction zone x campagne	
		Significativité	Significativité	Significativité	
Densité	Toutes espèces	ns	ns	ns	
	Commerciaux	ns	ns	ns	
	Non-commerciaux	ns	ns	ns	
	Herbivores	ns	ns	ns	
	Carnivores	ns	ns	ns	
	Planctonophages	ns	ns	ns	
	Piscivores	ns	ns	ns	
	Chaetodontidae	ns	ns	ns	
	Pomacentridae	ns	ns	ns	
	Toutes espèces	ns	ns	ns	
Biomasse	Commerciaux	ns	ns	ns	
	Non-commerciaux	ns	ns	ns	
	Herbivores	ns	ns	ns	
	Carnivores	ns	ns	ns	
	Planctonophages	ns	ns	ns	
	Piscivores	ns	ns	ns	
	Chaetodontidae	ns	ns	ns	
	Pomacentridae	ns	ns	ns	
	Toutes espèces	ns	ns	ns	
	Commerciaux	ns	ns	ns	
Richesse spécifique	Non-commerciaux	ns	ns	ns	
	Herbivores	ns	ns	ns	
	Carnivores	ns	ns	ns	
	Planctonophages	ns	ns	* (p=0,017) 2021-2022 : stabilité en petite rade, diminution en référence	
	Piscivores	* (p=0,028)	ns		
	Chaetodontidae	ns	ns	ns	
	Pomacentridae	ns	* (p=0,04)	ns	

En **Petite Rade**, la richesse spécifique des planctonophages est le seul paramètre présentant un effet significatif de l'interaction « zone x campagne » entre 2021 et 2022, correspondant à une diminution en zone de référence tandis que ce paramètre reste stable en Petite Rade. De même que précédemment, s'agissant d'une évolution en zone de référence et étant donné la stabilité de l'ensemble des paramètres en Petite Rade, cette variation ne saurait correspondre à un signal de changement de l'ichtyofaune dans la zone de la Petite Rade.

Plus généralement, l'examen graphique de l'évolution des paramètres de richesse spécifique pointe vers une bonne stabilité de la diversité ichtyofaunistique et de sa structuration entre 2021 et 2022 en Petite Rade.

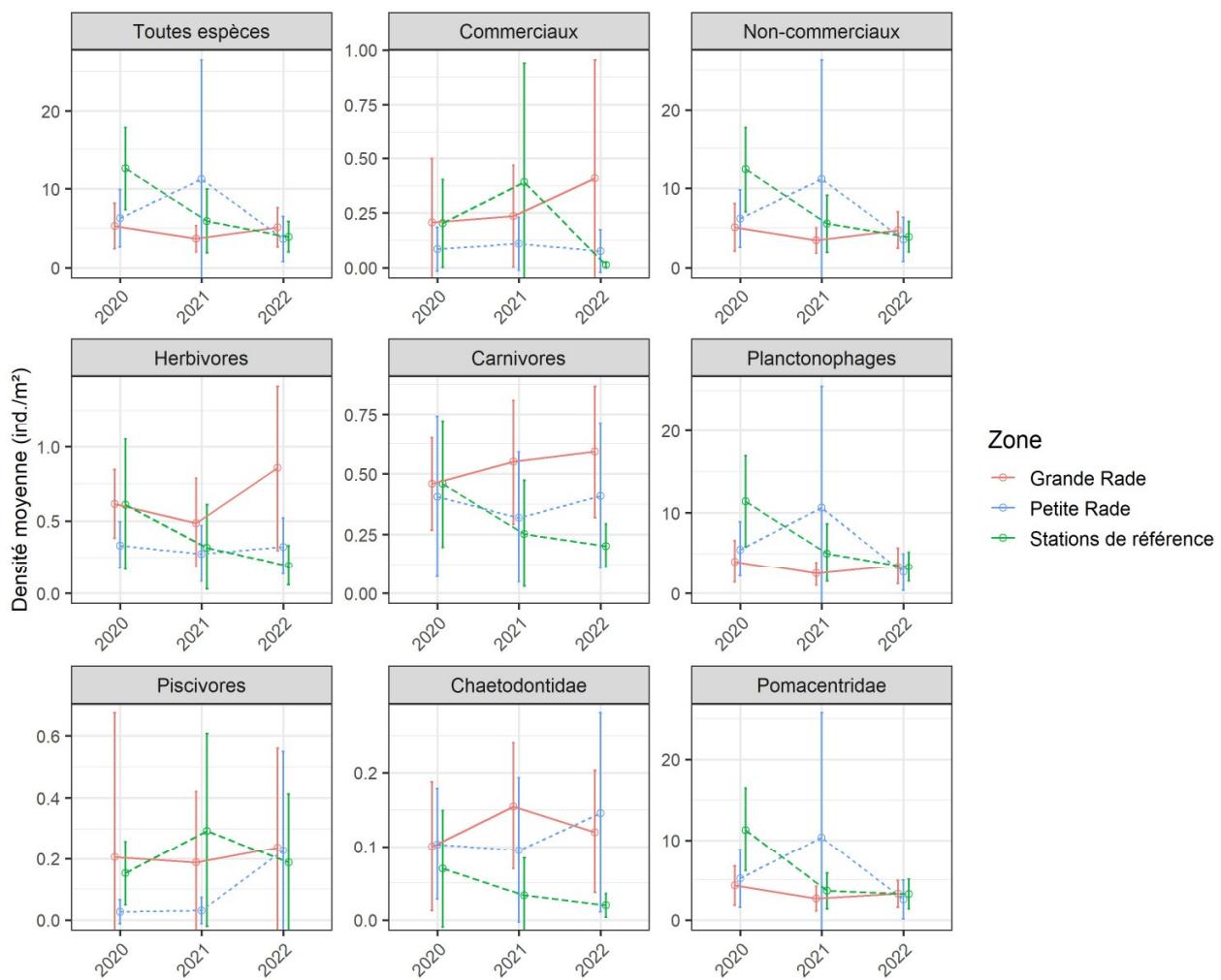


Figure 20 : Représentation graphique des variations de la densité de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, pour les deux rades et le site de référence. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.

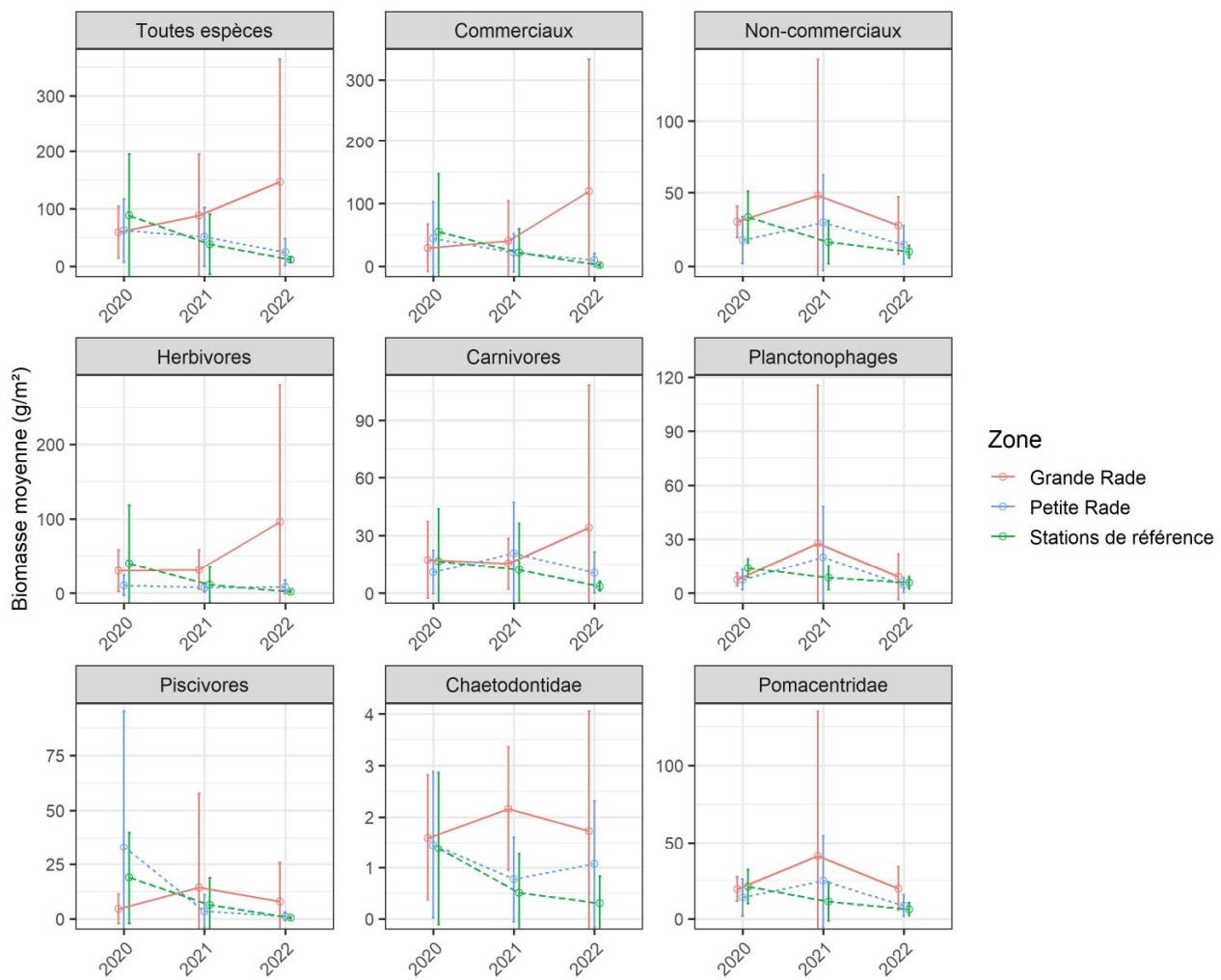


Figure 21 : Représentation graphique des variations de la biomasse de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, pour les deux rades et le site de référence. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.

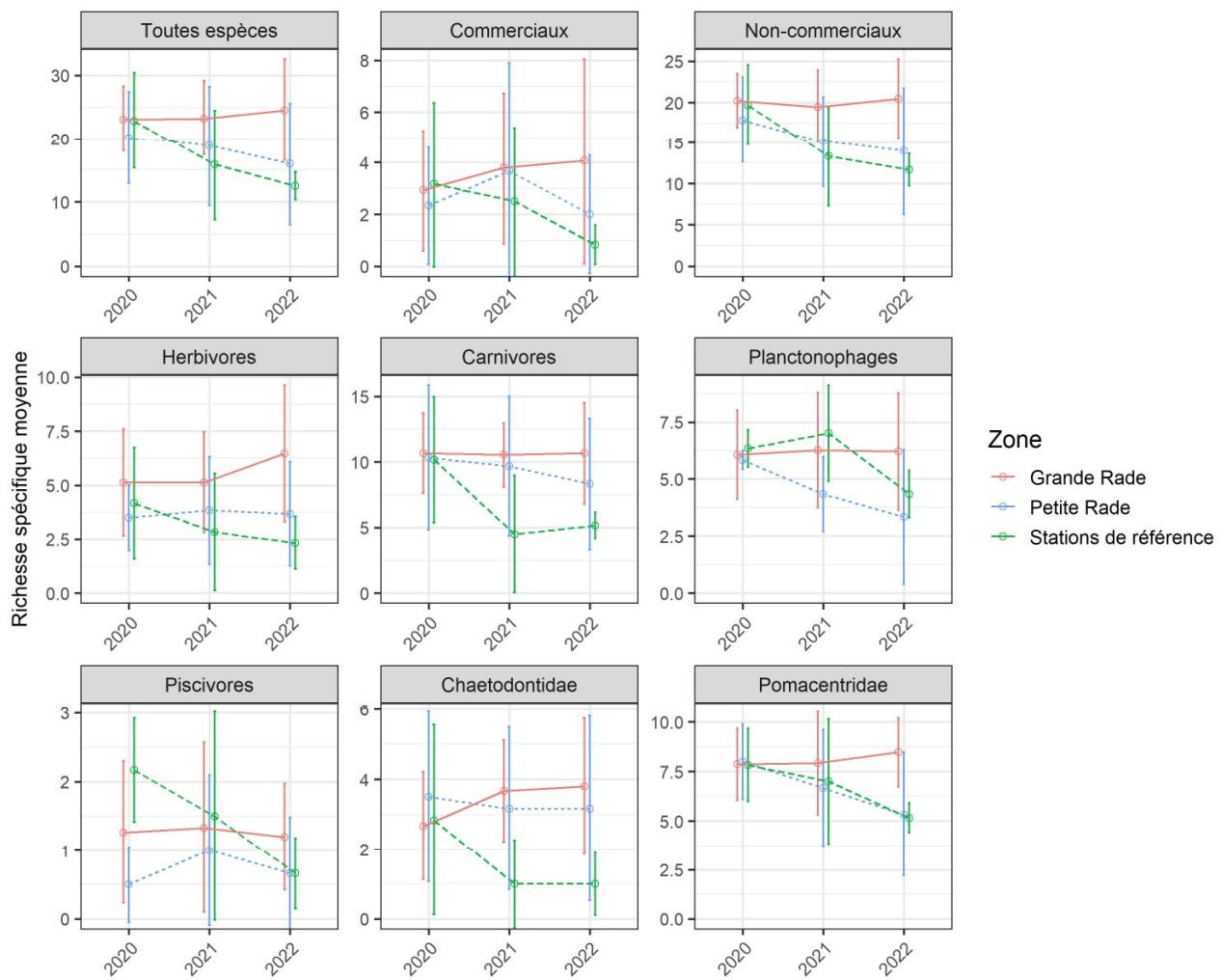


Figure 22 : Représentation graphique des variations de la richesse spécifique de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, pour les deux rades et le site de référence. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.

V.3 Analyse des évolutions temporelles dans les zones de sorties de grande rade et de petite rade

Le Tableau 17 présente les résultats de l'ensemble des analyses statistiques réalisées sur les variables décrivant l'ichtyofaune pour les deux zones suivies. L'examen détaillé de ces résultats est mené ci-après séparément par zone.

Au total, 54 analyses ont été effectuées, correspondant à 27 variables d'ichtyofaune testées pour chacune des zones considérées. Lorsqu'une variable a présenté une variation significative sur la période considérée, l'examen simultané du résultat statistique et de la représentation graphique de la variation permettra d'en déterminer l'importance et de l'interpréter.

La Figure 23, Figure 24, et la Figure 25 illustrent graphiquement l'évolution de l'ensemble des variables ichthyologiques en sorties de Grande Rade et en sortie de Petite Rade, à des fins d'interprétation des changements significatifs qui seraient le cas échéant identifiés à l'issue des analyses statistiques.

Tableau 17 : Résultats des analyses statistiques testant la significativité des variations temporelles des paramètres décrivant l'ichtyofaune dans les deux zones de sorties de rades entre 2020 et 2022. NS : non-significatif ; * : significatif avec $P<0,05$; ** : $P<0,01$; * : $P<0,001$.**

Descripteurs de l'ichtyofaune	Sortie de Grande Rade		Sortie de Petite Rade	
	Significativité des variations 2020-2022	Détail des variations impliquant 2022	Significativité des variations 2020-2022	Détail des variations impliquant 2022
Densité (ind./m ²)	Toutes espèces	ns	* (p = 0,014)	2022 < 2020
	Commerciaux	ns		ns
	Non-commerciaux	ns	* (p = 0,015)	2022 < 2020
	Herbivores	ns		ns
	Carnivores	ns		ns
	Planctonophages	ns	** (p = 0,009)	2022 < 2020
	Piscivores	ns	* (p = 0,032)	2022 < 2020
	Chaetodontidae	ns		ns
	Pomacentridae	ns	* (p = 0,007)	2022 < 2020
	Toutes espèces	ns		ns
Biomasse (g/m ²)	Commerciaux	ns		ns
	Non-commerciaux	ns		ns
	Herbivores	ns		ns
	Carnivores	ns		ns
	Planctonophages	ns	* (p = 0,03)	2022 < 2020
	Piscivores	ns		ns
	Chaetodontidae	ns		ns
	Pomacentridae	ns		ns
	Toutes espèces	ns	** (p = 0,005)	2022 < 2020
	Commerciaux	ns	* (p = 0,01)	2022 < 2020, 2021
Richesse spécifique	Non-commerciaux	* (p = 0,031)	2022 < 2020	* (p = 0,005) 2022 < 2020
	Herbivores	* (p = 0,018)	2022 < 2020	* (p = 0,012) 2022 < 2020, 2021
	Carnivores	ns		ns
	Planctonophages	ns		** (p = 0,007) 2022 < 2020
	Piscivores	ns		ns
	Chaetodontidae	ns		ns
	Pomacentridae	ns		* (p = 0,01) -

En **sortie de Grande Rade**, seules deux variables présentent une évolution temporelle statistiquement significative de 2020 à 2022 : la richesse spécifique des espèces non-commerciales et des herbivores.

Ces diminutions apparaissent modérées de 2021 à 2022 et la significativité statistique sur la période analysée est majoritairement la résultante des diminutions précédemment observées entre 2020 et 2021. Celles-ci se prolongent en 2022, toutefois dans une bien moindre mesure, aboutissant à un écart significatif entre 2020 et 2022. Ce résultat ne pointe donc pas vers un changement récent dans l'ichtyofaune mais plutôt vers une inertie de l'évolution observée dès 2021, notamment en lien avec la dégradation des habitats et de l'ichtyofaune au niveau de la station FREYCINET, dont les effets semblent donc persistants et confirment la perturbation subie localement par l'écosystèmes récifal.

Abstraction faite des niveaux très élevés de densité observés en sortie de Grande Rade en 2021⁴, les 25 autres paramètres (dont l'ensemble des paramètres de densité et de biomasse) pointent vers une stabilité de l'ichtyofaune entre 2021 et 2022.

En **sortie de Petite Rade**, onze variables présentent une évolution temporelle statistiquement significative de 2020 à 2022 :

- En densités : totale, espèces non-commerciales, planctonophages, piscivores, Pomacentridae ;
- En biomasse : planctonophages ;
- En richesse spécifique : totale, espèces commerciales, espèces non-commerciales, herbivores, planctonophages.

L'ensemble de ces variations correspondent à une diminution significative entre les niveaux observés en 2020 et ceux observés en 2022, à l'exception de la richesse spécifique des herbivores et des espèces commerciales qui indique également une significativité de la différence entre 2021 et 2022.

Concernant les cinq paramètres de densité et le paramètre de biomasse, le profil des variations significatives correspond à une prolongation atténuée des diminutions amorcées entre 2020 et 2021, atteignant le seuil de significativité en 2022 sans pour autant que la variations 2021-2022 en soit le principal déterminant (à l'exception des planctonophages pour lesquelles la diminution 2021-2022 est d'une amplitude comparable à la diminution 2020-2021). C'est donc l'ensemble de la diminution progressive depuis 2020 (et notamment de 2020 à 2021) qui est mise en évidence statistiquement. Ces diminutions découlent principalement de la diminution observée au niveau des Pomacentridae, se répercutant sur les planctonophages et les espèces non-commerciales auxquelles cette famille est très contributive, et ultimement sur l'ensemble du peuplement.

Concernant les cinq paramètres de richesse spécifique, on distingue deux profils distincts :

- Pour les herbivores et consécutivement les espèces commerciales : une diminution importante entre 2021 et 2022 faisant suite à une stabilité du paramètre entre 2020 et 2021 ;
- Pour les planctonophages (en lien avec les Pomacentridae bien que non significatif statistiquement à l'échelle de cette famille) et consécutivement les espèces non-commerciales : une stabilité entre 2021 et 2022 faisant suite à une diminution importante entre 2020 et 2021 ;

La résultante de ces deux profils de variations affectant deux fractions distinctes de l'ichtyofaune est une diminution progressive de la richesse spécifique totale sur l'ensemble de la période, aboutissant à une réduction d'un tiers de la diversité ichtyofaunistique dans cette zone.

Ces variations pointent vers des changements structurant dans l'ichtyofaune, touchant deux groupes trophiques d'intérêt, avec répercussion sur la richesse spécifique totale, et indiquent donc une dégradation de l'état de santé moyen de l'ichtyofaune sur les deux stations de cette zone. S'agissant de la diminution plus récente observée entre 2021 et 2022, celle-ci peut vraisemblablement être rapprochée de la perturbation importante des habitats qui a été constatée sur la station BRUN_EXT (indiquant une ou des perturbations mécaniques significatives depuis la précédente campagne, en lien probable avec les phénomènes météorologiques cités précédemment et ayant eu lieu entre fin 2021 et début 2022).

⁴ Essentiellement due à l'observation d'un très grand groupe de *Pomacentrus adelus* de plusieurs milliers d'individus sur le transect T03 de la station FREYCINET, traduisant davantage un épisode de recrutement récent qu'un niveau permanent de la densité sur cette station et donc sur la zone correspondante

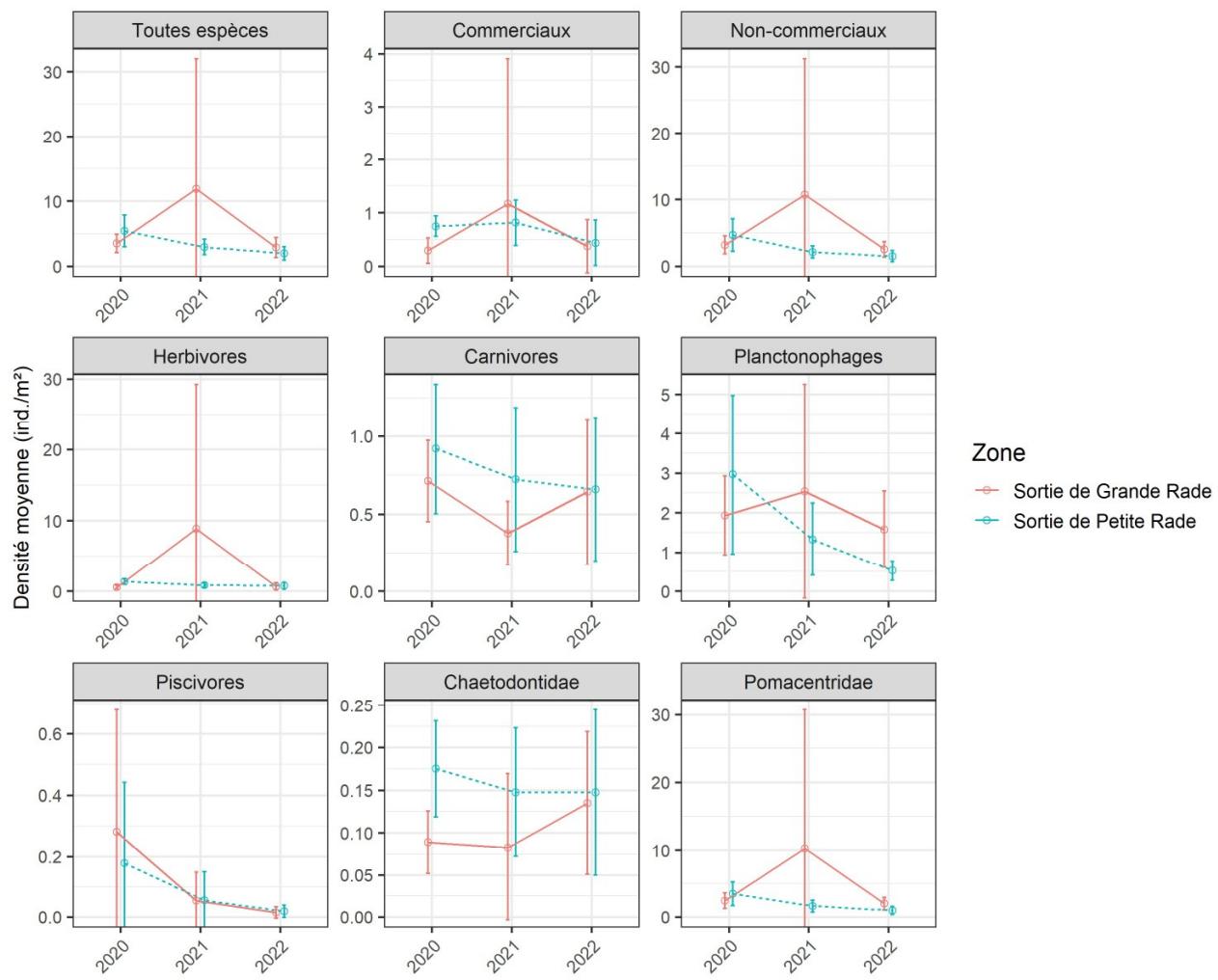


Figure 23 : Représentation graphique des variations de densité de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, pour les sorties des deux rades. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.

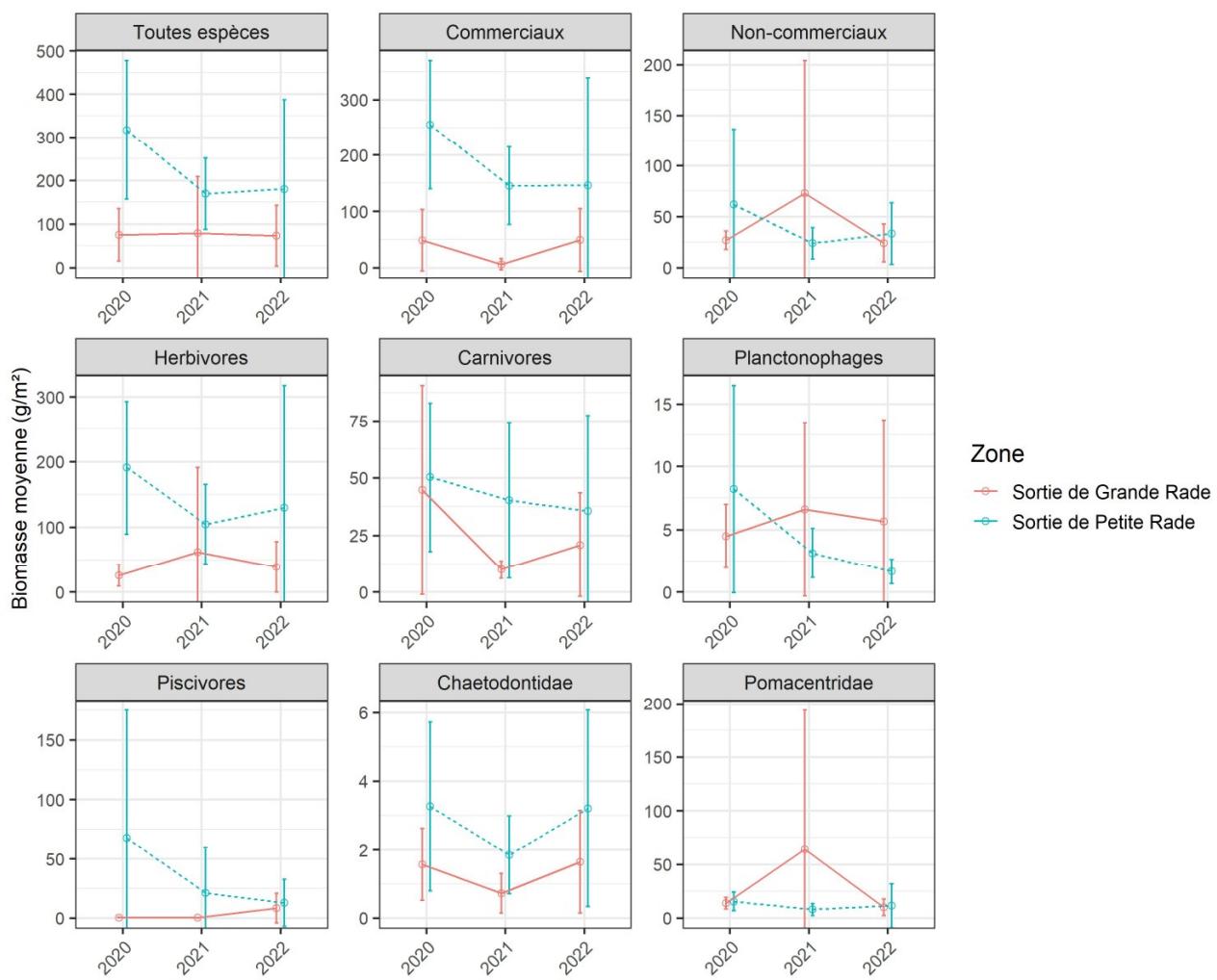


Figure 24 : Représentation graphique des variations de biomasse de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, pour les sorties des deux rades. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.

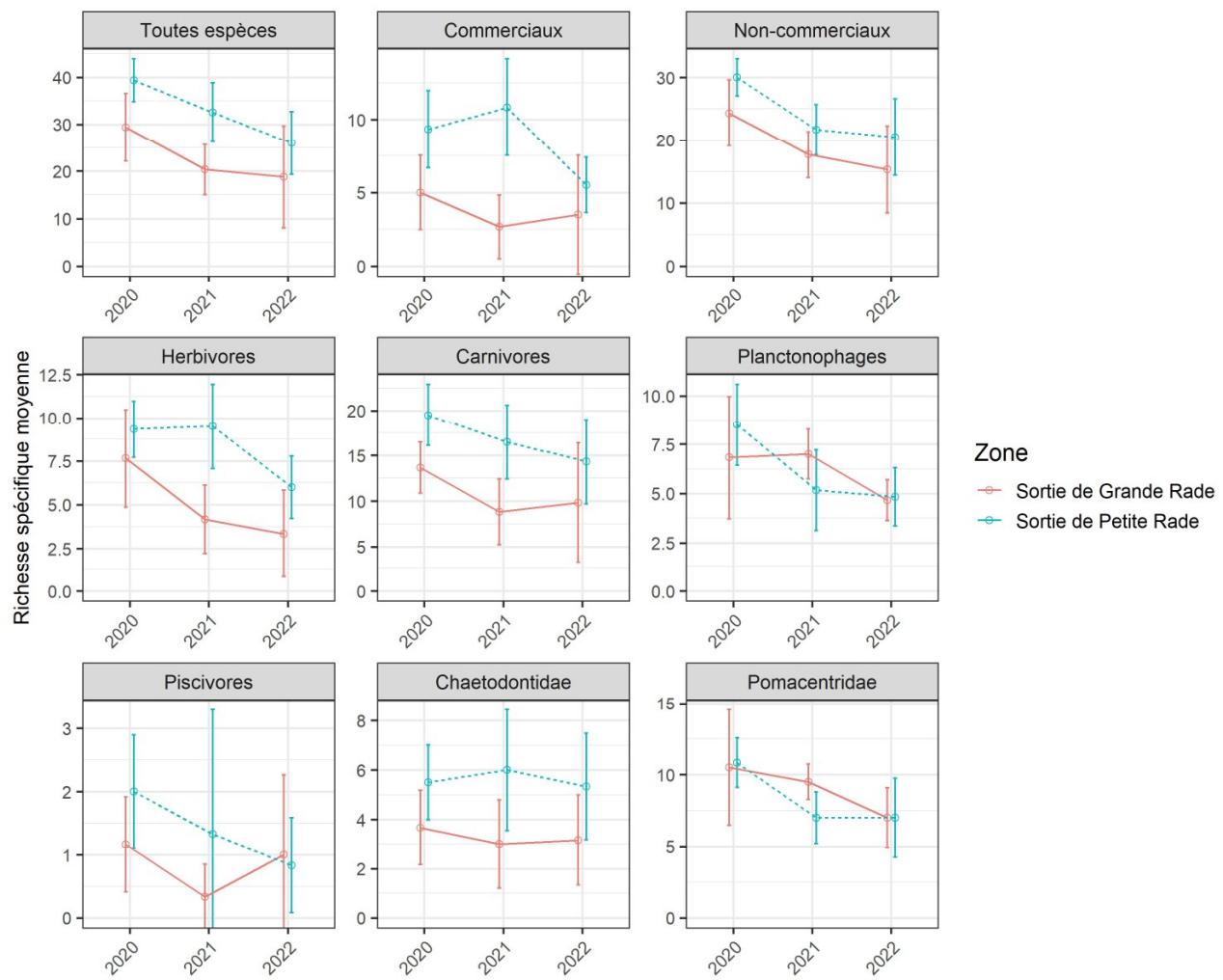


Figure 25 : Représentation graphique des variations de richesse spécifique de l'ichtyofaune entre 2020 et 2022, pour les sorties des deux rades. Les barres d'erreur indiquent les écart-types pour les moyennes.

VI EVALUATION QUALITATIVE DE LA ZONE DU BANC DES JAPONAIS

La station du Banc des Japonais n'est pas propice à un échantillonnage selon une approche par station tel que déployé dans les autres zones suivies, et fait l'objet d'une approche spécifique en raison de la pauvreté et de l'homogénéité des fonds, mises en évidence lors de l'état de référence de 2018 (fort envasement associé à un très faible recouvrement corallien, en lien avec une pression sédimentaire intense et difficilement maitrisable dans le contexte des usages de la baie).

En 2018, le substrat au niveau de l'ancien transect T01 du Banc des Japonais était composé d'environ 70% de débris recouverts de turf algal et d'environ 30% de vase, avec présence de petites colonies corallieennes éparses ou de petits amas de colonies. Par ailleurs, 12 genres coralliens avaient été recensés sur les 4 transects échantillonnés.

En 2020, un parcours circulaire a été réalisé sur le point de départ du transect T01 qui avait présenté le plus d'intérêt écologique en 2018. Globalement, les mêmes caractéristiques écologiques avaient été observées sur ce secteur du Banc des Japonais en 2020. Il était constitué d'un monticule de débris entourée de vase, et colonisée par de petites colonies corallieennes, de quelques holothuries, oursins et autres éponges.

Parmi les colonies corallieennes, l'espèce endémique *Cantharellus noumeae* dominait la densité avec la présence de plusieurs amas de colonies répartis sur toute la zone. Quelques colonies éparses de petites tailles d'autres genres avaient également été observées par endroits (*Pachyseris*, *Acropora* notamment). Parmi les échinodermes, quelques individus d'holothuries (genre *Stichopus chloronotus* notamment), de bivalves (*Isognomon isognomon*, *Hyotissa hyotis*) et d'oursins (*Paraselenia gratiosa*) avaient été observés ponctuellement.

Enfin, des blocs de corail mort de belle taille étaient présents par endroit, propices au développement d'éponges encroûtantes.

En 2021, cette zone n'avait pas pu être visitée en raison du mouillage systématique de la barge *Cali* (navire intervenant sur le démantèlement du *Kea Trader*) exactement sur le point d'inventaire pendant toute la durée de la campagne, puis lors des autres passages réalisés ultérieurement afin de tenter un échantillonnage sur ce point.

En 2022, le transect T1 visité en 2020 n'a à nouveau pas pu être visité car un navire était mouillé précisément dans la zone au moment de la campagne de terrain. Un point situé à proximité a été visité (voir coordonnées en début de rapport) en suivant un cap vers le Nord pendant une dizaine de minutes. La zone est constituée majoritairement de vase avec des monticules de débris éparses témoignant de passages anciens d'ancres de navires (Figure 26 d). Des monticules de rochers/coraux morts sont présents ponctuellement (Figure 26 a, b, c) et peuvent être colonisés par des coraux (Figure 26 c, individu de *Cantharellus noumeae*), des holothuries (Figure 26 c, individu de *Stichopus hermanni*), ou des bivalves. La densité de coraux reste toutefois très faible et se limite à la présence de rares individus de petite taille sur les blocs rocheux.

En cohérence avec la zone adjacente visitée en 2020, cette zone présente un faible intérêt écologique, lié probablement aux mouillages répétitifs de navires de grande taille et également aux conditions turbides du milieu.

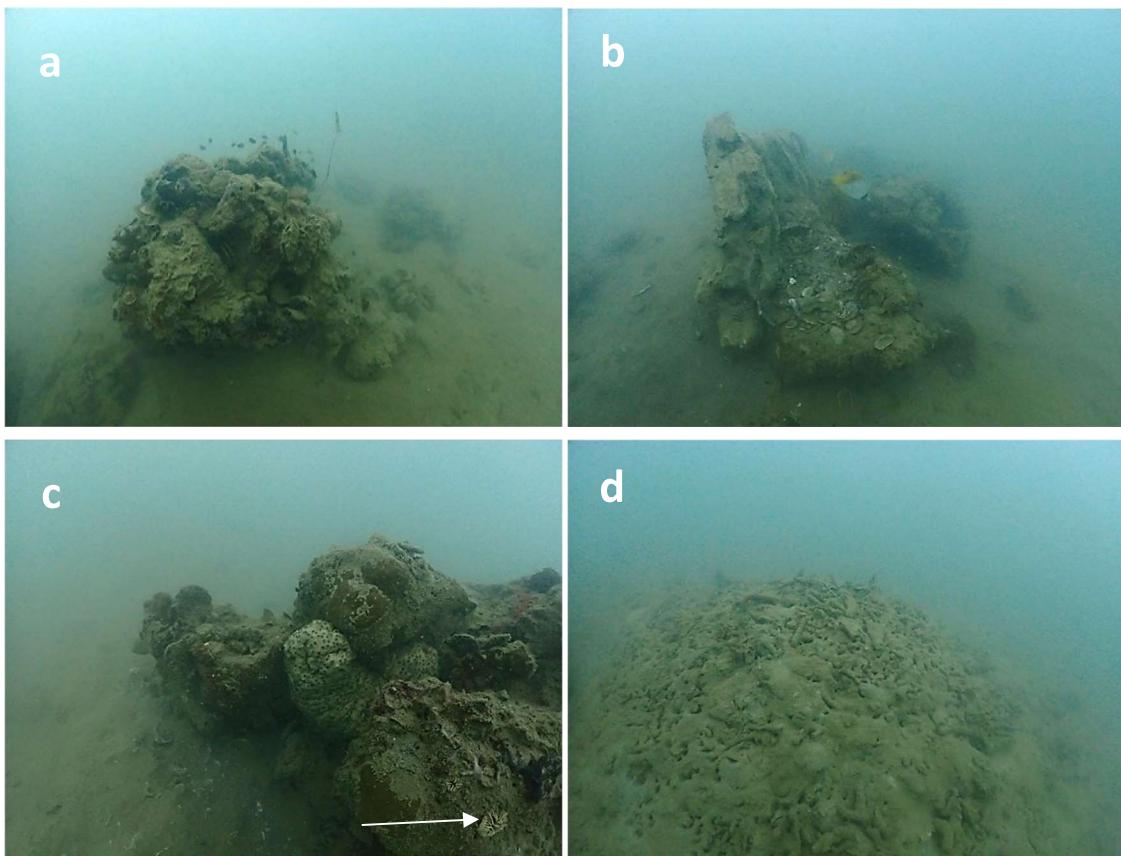


Figure 26 : Photographies : a. Monticules de coraux morts, b : Présence de poissons papillons sur ce type de monticules, c : Holothuries (*Stichopus hermanni*), coraux (*Cantharellus noumeae*) et éponges encroûtantes sur monticules de coraux morts, d : Vase et monticules de débris coralliens, brassés par les mouillages répétitifs de navires dans la zone.

VII CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

VI.1 Habitats coralliens

De manière générale, les habitats retrouvés dans les différentes zones ont présenté des profils cohérents avec ceux mis en évidence lors des précédentes campagne (2020 et 2021). Ces habitats présentent une structure essentiellement constituée d'alternances entre coraux scléractiniaires et turf algal en proportions variables. Le recouvrement en coraux durs est apparu significatif sur l'ensemble des zones, allant d'environ 10 % en moyenne en sortie de Petite Rade à plus de 40 % en moyenne en Grande Rade. Le recouvrement des autres catégories de peuplement vivants est resté globalement anecdotique et, hormis certaines zones sablo-vaseuses, peu de substrat abiotique non-colonisé a été observé.

Le profil d'habitat dominant identifié précédemment sur une large part de récifs frangeants de la **Grande Rade** (notamment du milieu de la rade vers sa sortie au niveau des stations Kongou, Koumourou, anse Paddon, et anse Nbi) s'est confirmé avec ce début de suivi. Il est caractérisé par un recouvrement corallien relativement important et fortement dominé par les coraux massifs du genre *Porites*. Ce type d'habitat se répartit sur une large portion du linéaire frangeant de part et d'autre de la Grande Rade. On le retrouve également plus en profondeur dans la baie (cf. station de l'anse Uaré) où il est toutefois altéré et plus caractéristique des écosystèmes de fond de baie (dominance accrue des substrats sablo-vaseux et des peuplements algaux de type turf). Dans cette zone, les analyses statistiques et graphiques réalisées selon une approche *Control-Impact* sur la période 2020-2022 n'ont détecté aucun signal d'impact significatif et mettent en évidence une bonne stabilité des habitats coralliens locaux.

En **Petite Rade**, les habitats sont contrastés entre les deux stations de suivi : la zone interne de l'ilot Brun présente des substrats durs et des peuplements coralliens majoritairement branchus (bien qu'ayant visiblement subi des épisodes récents de mortalité) tandis que la station Chaux correspond à une zone de substrat détritique sablo-vaseux essentiellement peuplée de coraux mous. Bien qu'une extrapolation soit difficile sur la base de deux stations ponctuelles, le système plus fermé, moins étendu, et potentiellement plus anthropisé de la Petite Rade suggère des habitats plus pauvres et caractéristiques de fonds de baie, mais également plus variables à petite échelle qu'en Grande Rade (car reliés à la configuration environnementale et aux activités propres à chaque zone frangeante de cette baie très encaissée). Dans cette zone et de même qu'en Grande Rade, les analyses statistiques et graphiques réalisées selon une approche *Control-Impact* n'ont détecté aucun signal d'impact sur la période 2020-2022 et mettent en évidence une bonne stabilité des habitats coralliens.

En **sortie de Grande Rade**, les peuplements coralliens étaient apparus relativement riches et diversifiés en 2020, puis une dégradation importante avait été observée en 2021 sur l'une des deux stations (FREYCINET : épisode de mortalité corallienne récent affectant notamment les Acroporidae branchus) suite au cyclone Lucas survenu une semaine avant la campagne. En 2022, les effets de cette perturbation ponctuelle persistent sur cette station (augmentation du turf algare en 2022 faisant suite à la mortalité corallienne de 2021, sans toutefois que d'autres signaux de changements soient apparus depuis), tandis que la station KUENDU est restée à nouveau stable.

En **sortie de Petite Rade**, les peuplements coralliens apparaissent relativement diversifiés mais modérément développés (et dominés par des coraux non-Acroporidae), avec toutefois un contraste marqué entre les deux stations qui constituent cette zone (la station SERPENT apparaissant plus riche que la station BRUN_EXT). Dans cette zone, les analyses statistiques et graphiques réalisées sur les données 2020 et 2021 n'avaient pas détecté de signal de changement notable sur cette période d'amorce du suivi. En revanche, les données 2022 indiquent une dégradation des habitats dans cette zone (diminution des coraux durs et augmentation du turf algare), corroborée avec des perturbations

mécaniques observées lors de l'échantillonnage (probablement suite aux épisodes météorologiques violents survenus fin 2021 et début 2022, cf. III.1.).

À ce titre, l'analyse de l'évolution des principales caractéristiques des habitats coralliens (fractions biotiques et abiotiques) a démontré leur bonne stabilité en Grande Rade et en Petite Rade, et a mis en évidence des signaux de dégradation notables en sortie de Grande Rade (notamment en lien avec une perturbation des habitats observée entre 2020 et 2021 sur la station FREYCINET) et en sortie de Petite Rade (notamment en lien avec une dégradation récente et d'origine *a priori* naturelle des habitats sur la station BRUN_EXT).

VI.2 Invertébrés macrobenthiques

L'analyse des données sur le macrobenthos des différentes stations du réseau de suivi à l'échelle des communautés *via* une analyse PCO, confirme une structuration contrastée des communautés macrobenthiques selon les zones, qui reste toutefois stable chaque année (bien que certaines évolutions localisées puissent être observées).

L'analyse de type CI sur la richesse spécifique et les densités par groupe en grande rade et en petite rade (comparaison à la zone de référence) montre une absence de signal de dégradation dans ces deux zones entre 2020 et 2022. En grande rade, les densités par groupes ont peu évolué à l'exception des échinodermes dont la densité a légèrement augmenté en 2022, suite à une forte augmentation de la densité d'oursins diadèmes (*Diadema setosum*) sur la station Nbi. En petite rade, une évolution en dents de scie est identifiée pour les mollusques et échinodermes. Concernant les mollusques, ces évolutions sont principalement liées à la station Brun_int et à trois espèces (*Isognomon isognomon*, *Saccostrea cucullata* et *Pteria sp.*) dont la densité est élevée et variable au sein même de la station chaque année. Concernant les échinodermes, les deux stations de la zone sont concernées et l'augmentation observée est principalement attribuée à une espèce d'oursin (*Parasalenia gratiosa*). Un biais lié à l'absence de nombreux piquets sur la station Chaux doit cependant inviter à une certaine précaution concernant cette évolution précise.

L'analyse de l'évolution temporelle de la densité par groupe et de la richesse spécifique pour les deux zones adjacentes (sortie de petite et grande rade) montre l'absence d'évolution significative de des indicateurs entre 2020 et 2022, à l'exception de la densité des Vers en sortie de petite rade. Ce signal, correspondant à une diminution de densité pour ce groupe, ne peut cependant pas être interprété comme un signal de dégradation en tant que tel, la densité de ces organismes étant particulièrement faible sur les stations (< 1 000 ind./ha soit 4 individus par transect). Bien que non significatives, on retiendra une baisse notable de la richesse spécifique et de la densité de bivalves en sortie de grande rade, principalement sur la station Freycinet en 2021, suivie d'une récupération pour ces deux variables en 2022. Si l'impact de la dépression Lucas, constaté par ailleurs sur les habitats coralliens, semblait ainsi avoir perturbé la richesse spécifique et la densité de bivalves sur cette station, des signaux de récupération ont été observés en 2022, avec la réapparition d'échinodermes (2 espèces d'holothuries et une espèce d'oursin) et une augmentation du nombre d'espèces de bivalves. La densité de bivalves suit également cette tendance à la récupération en 2022, notamment pour 3 genres qui contribuent le plus à la densité dans cette zone : *Pteria*, *Pedum* et *Isognomon*.

Enfin, l'étude des densités des genres remarquables ne montre pas d'évolution particulière dans chaque zone entre 2020 et 2022, avec notamment une absence d'invasion d'*Acanthaster* dans toute la zone de suivi.

VI.3 Ichtyofaune

L'analyse des données collectées lors de la présente campagne a permis de caractériser de manière rigoureuse et satisfaisante l'ichtyofaune récifale dans les cinq zones de suivi échantillonnées en 2022.

En cohérence avec les observations réalisées en 2020 et 2021 lors des deux premières campagnes de suivi, l'ichtyofaune retrouvée en 2022 dans les différentes zones correspond à des peuplements modérément diversifiés et de structure écologique relativement simple, en lien avec des biotopes de récifs frangeants sous influence terrigène marquée et fortement anthropisés en raison de leur proximité directe à un pôle urbain/industriel majeur. Ces grandes caractéristiques de récifs frangeants avec influence terrigène marquée (écosystèmes de baies encaissées) sont notamment les suivants : dominance des planctonophages, forte contribution des Pomacentridae aux paramètres quantitatifs (densité notamment) et qualitatifs (richesse spécifique), densité et richesse spécifique dominées par un petit nombre de familles taxonomiques (le plus souvent les Pomacentridae, Apogonidae, Chaetodontidae, Labridae et Acanthuridae). Cette structuration évolue légèrement sur les stations de sorties de rade (diminution de l'importance des planctonophages au profit des carnivores et herbivores) qui sont davantage exposées et constituent des écosystèmes de transition entre les rades et le lagon plus ouvert. Globalement, la plupart des stations ont donc présenté des caractéristiques en accord avec la structuration écologique de l'ichtyofaune récifale habituellement observée sur leurs biotopes respectifs (Kulbicki 2006, Wantiez 2006).

En **Grande Rade**, les analyses statistiques et graphiques réalisées selon une approche *Control-Impact* sur les données 2020-2022 n'ont détecté aucun signal de changement sur cette période de suivi, et mettent en évidence une bonne stabilité de l'ichtyofaune récifale dans cette zone (les seuls signaux statistiques significatifs correspondant à des évolutions ponctuelles et ne concernant que la zone de référence).

En **Petite Rade**, cette même approche analytique n'a détecté aucun signal de changement entre 2020 et 2022, soulignant donc la stabilité des différentes composantes de l'ichtyofaune récifale à l'échelle de cette zone également.

En **sortie de Grande Rade**, quelques variations significatives avaient été observées entre 2020 et 2021, principalement sur la station FREYCINET et en lien probable avec la perturbation des habitats constatée sur cette station suite à la dépression Lucas. En 2022, peu de nouvelles variations apparaissent, et les signaux d'évolution issus des analyses ne pointent pas vers un changement récent dans l'ichtyofaune mais plutôt vers une inertie des évolutions observées depuis 2021, notamment en lien avec la dégradation des habitats et de l'ichtyofaune au niveau de la station FREYCINET.

En **sortie de Petite Rade**, de nombreuses évolutions statistiquement significatives sont observées, pointant vers des changements structurant dans l'ichtyofaune et indiquant donc une dégradation de l'état de santé moyen de l'ichtyofaune sur les deux stations de cette zone. Cette dégradation résulte des amorces de perturbation observées en 2021, et de nouvelles perturbations constatées en 2022 (notamment sur la station BRUN_EXT en lien probable avec les phénomènes météorologiques cités précédemment et ayant eu lieu entre fin 2021 et début 2022).

VI.4 Perspectives pour la poursuite du suivi

L'analyse des données 2022 a permis d'examiner de manière détaillée les caractéristiques des écosystèmes récifaux sur 13 stations d'observations échantillonnées selon une méthodologie d'inventaire standardisée et complète.

Plus généralement, le plan d'échantillonnage réalisé a permis, outre une caractérisation des zones suivies, d'en mesurer avec succès la variabilité intrinsèque dans une optique d'analyses statistiques, et de mettre en œuvre les démarches analytiques nécessaires à un diagnostic complet des évolutions interannuelles des écosystèmes locaux. À des fins de comparaison temporelle rigoureuse et de recherche de signaux de changement dans les zones de rade notamment, la possibilité de disposer d'une zone de référence apparaît comme un atout indispensable, qui a permis de mener une approche Control-Impact robuste et devra impérativement être poursuivie sur le long terme selon un schéma analytique identique.

À ce titre, la structure du plan d'échantillonnage actuel est considérée comme adaptée et fiable. Après les trois premières années de suivi, deux recommandations peuvent cependant être émises afin de garantir la robustesse et la qualité du plan de suivi mise en œuvre sur le long terme :

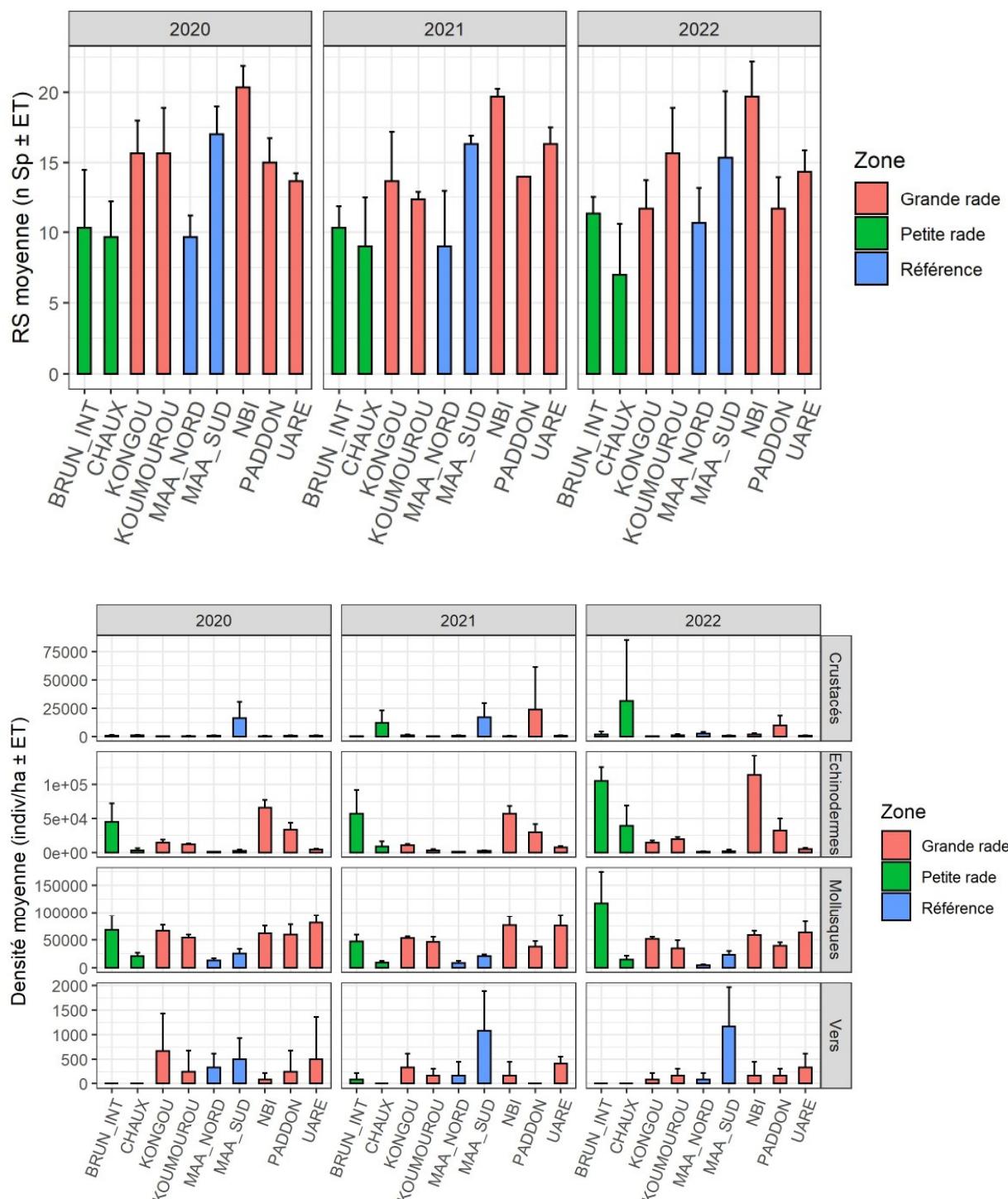
- Le contexte exposé de certaines stations de suivi engendre une détérioration progressive des structures implantées (notamment les piquets délimitant les transects) qui sont garantes de la bonne stabilité et la qualité de l'échantillonnage. Il est donc recommandé qu'une restauration/reconstruction des stations soit menée lors de la prochaine campagne de suivi. L'expérience acquise au cours de ce début de suivi suggère plus généralement qu'il soit à prévoir une opération de maintenance similaire à fréquence triennale.
- La station CHAUX est située en faible profondeur au milieu d'une zone de mouillage forain à forte activité, ce qui engendre une détérioration de la structure de la station, des difficultés d'échantillonnage (forte turbidité, faible visibilité, grand nombre de macrodéchets), tout en ne présentant pas une valeur écologique élevée. Il est donc recommandé de déplacer légèrement cette station afin de faciliter les interventions en mer et d'améliorer sa pertinence dans le cadre du suivi de la Petite Rade (sans pour autant remettre en cause le plan d'échantillonnage global dans cette zone). Ce repositionnement pourra avantageusement se faire à la faveur de la reconstruction des stations de suivi mentionnée précédemment.

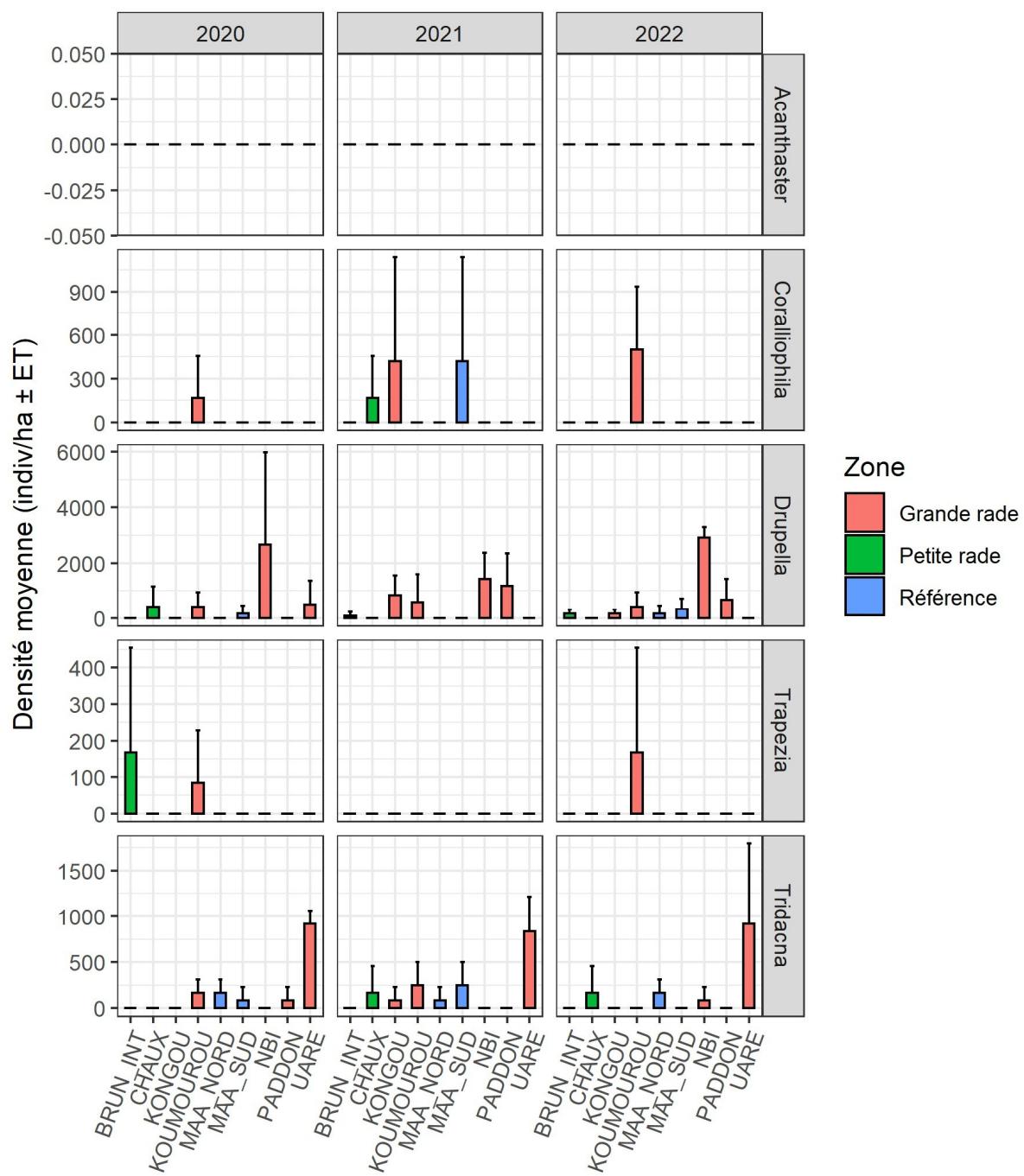
Enfin, s'agissant de la composante ichtyologique du plan de suivi, on pourra recommander que les paramètres de densité et de richesse spécifique, ainsi que leur déclinaison selon les catégories considérées, constituent le point focal de l'étude des variations spatio-temporelles et de la recherche de signaux d'impact suite à des travaux d'aménagement. Ils fournissent en effet de meilleurs indicateurs de changements que la biomasse qui est un paramètre généralement plus variable et plus difficile à relier aux pressions associées à des projets d'aménagements côtiers (Guillemot 2009, Chabanet et al. 2010).

VIII ANNEXES

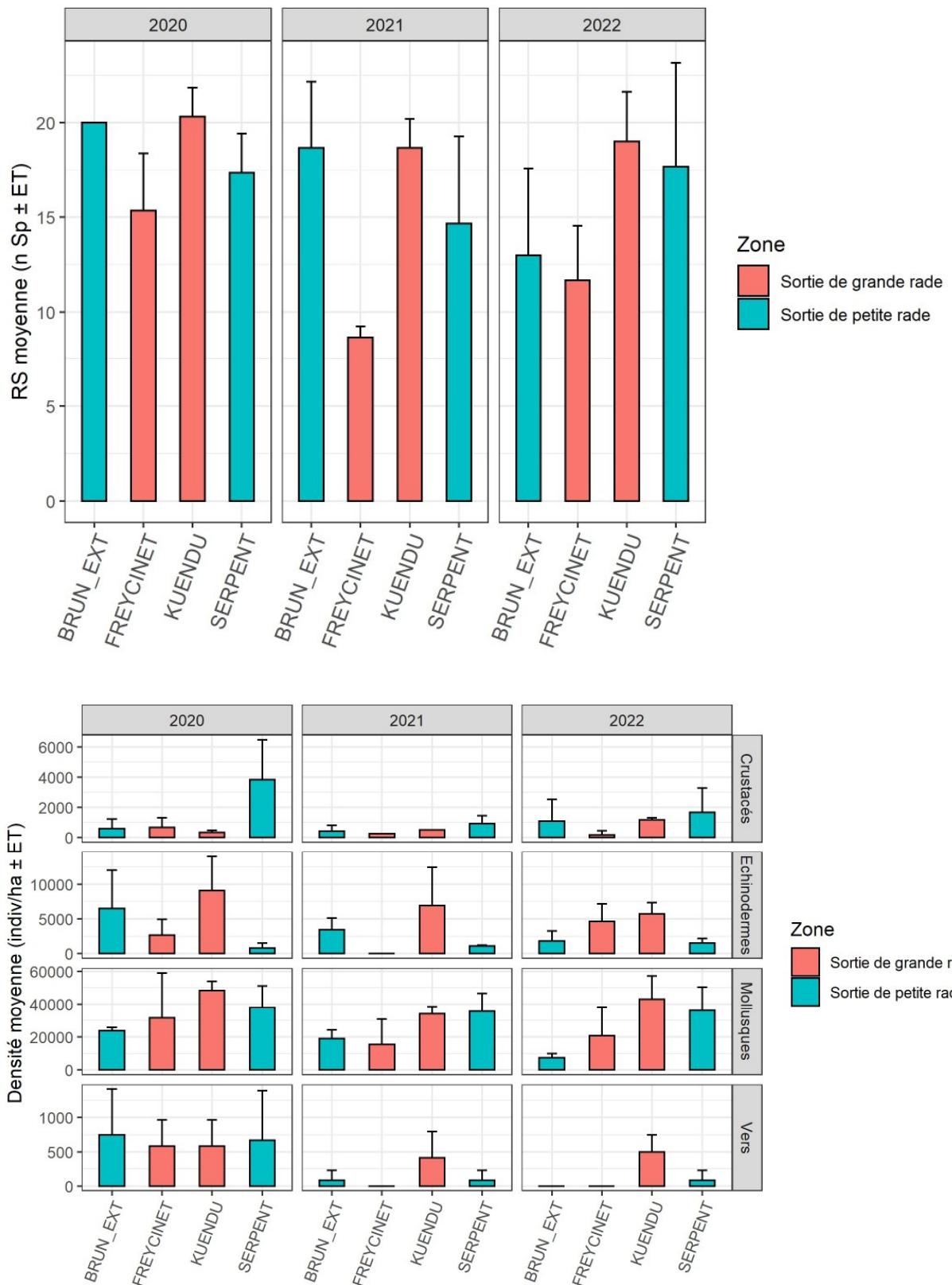
VII.1 Annexe 1 : Évolution des densités et richesses spécifiques d'invertébrés par station

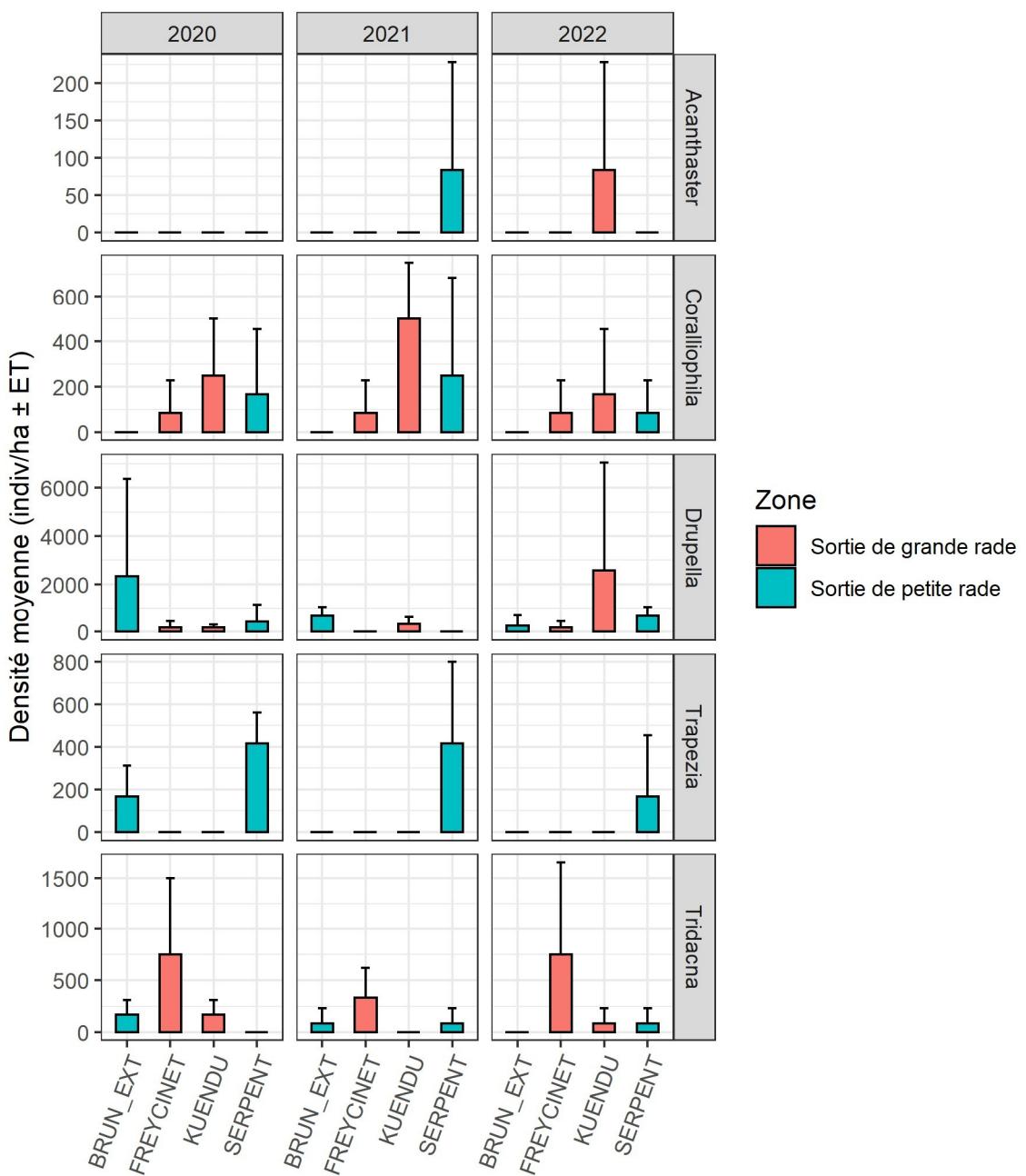
VII.1.1 Analyses CI - Grande rade et petite rade





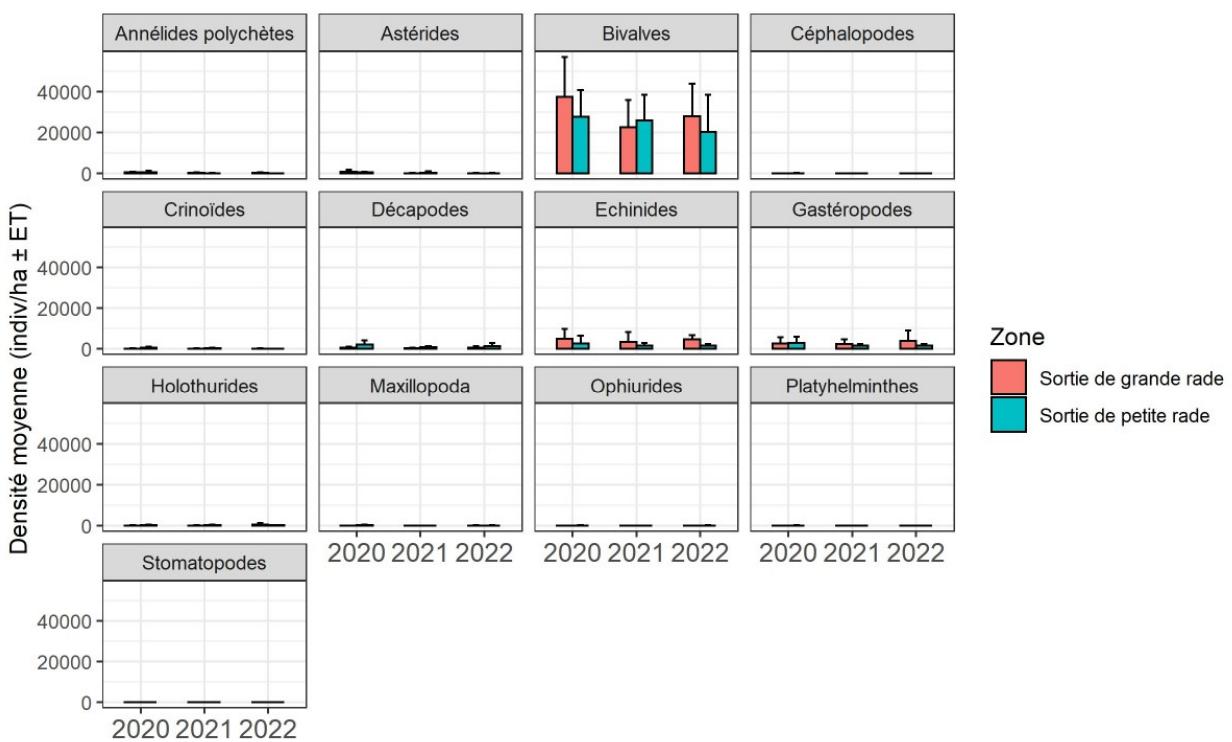
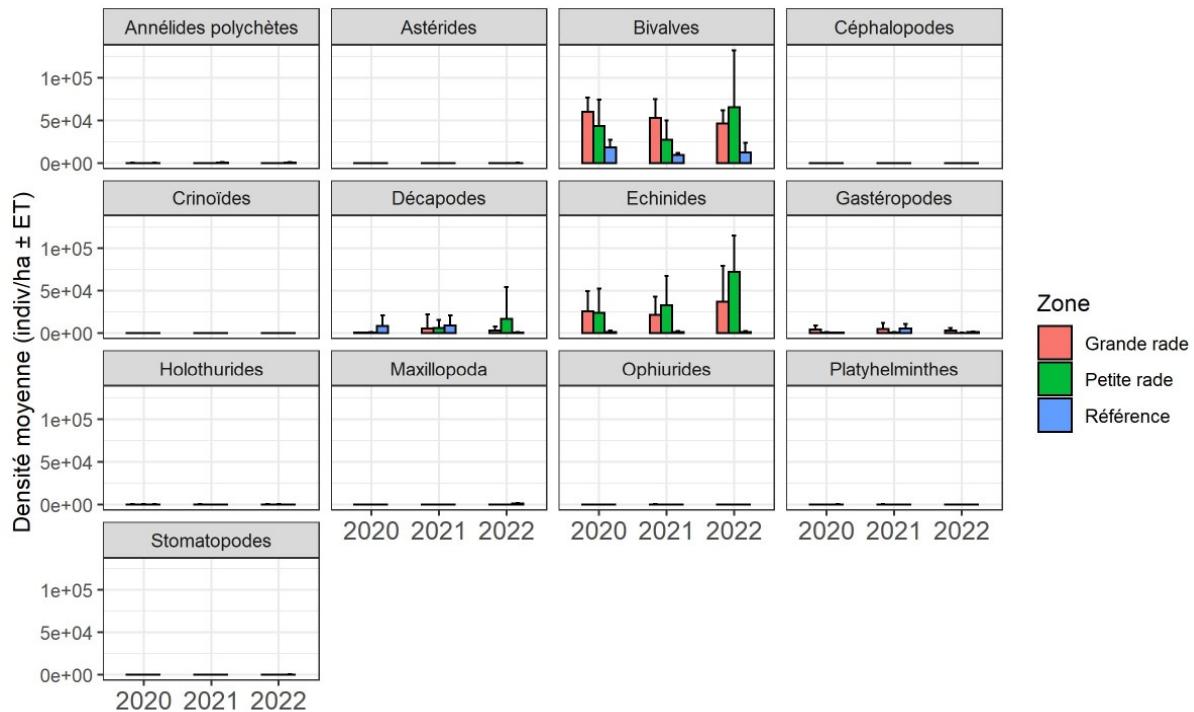
VII.1.2 Evolutions temporelles - sorties de rades



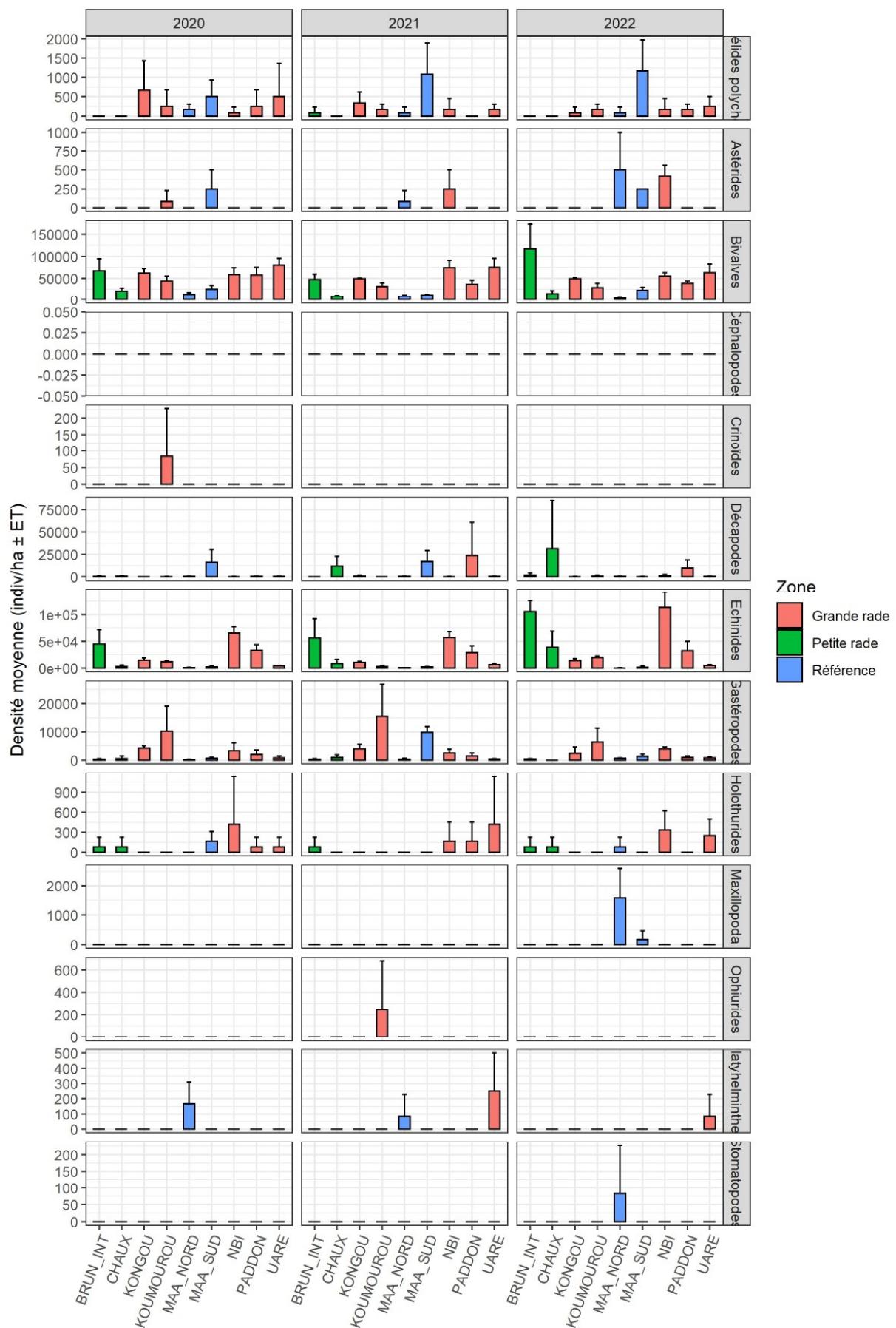


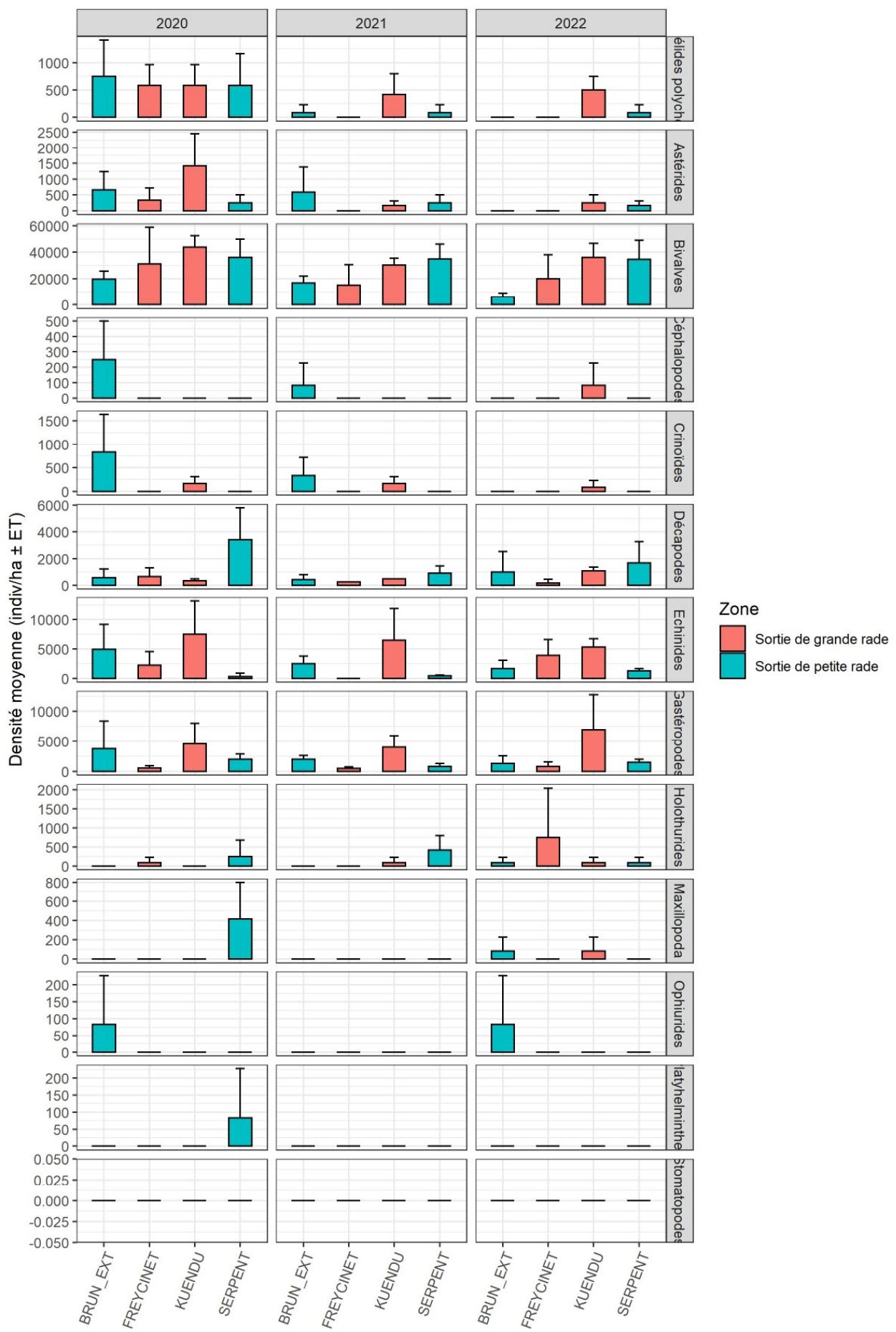
VII.1 Annexe 2 : Évolution des densités d'invertébrés par sous-groupe

VII.1.1 Par zone



VII.1.2 Par station





VII.2 Annexe 3 : Liste des espèces de poissons récifaux observées lors de la campagne 2022 et caractéristiques biologiques

Annotations - C : carnivore / H : herbivore / P : piscivore / Z : planctonophage / nc : non-commercial / c : commercial

Famille	Genre	Espèce	Groupe trophique	Potentiel commercial	Coefficients morphométriques a	b
ACANTHURIDAE	Acanthurus	blochii	H	c	0,025055962	3,031929247
ACANTHURIDAE	Acanthurus	dussumieri	H	c	0,042561181	2,868263525
ACANTHURIDAE	Acanthurus	grammoptilus	H	c	0,028032882	2,98288421
ACANTHURIDAE	Acanthurus	nigricauda	H	c	0,016784756	3,167724687
ACANTHURIDAE	Acanthurus	nigrofucus	H	c	0,026370479	3,028366711
ACANTHURIDAE	Acanthurus	sp	H	c	0,028032882	2,98288421
ACANTHURIDAE	Ctenochaetus	striatus	H	c	0,02313218	3,063472078
ACANTHURIDAE	Zebrasoma	scopas	H	nc	0,029053025	2,992739614
ACANTHURIDAE	Zebrasoma	veliferum	H	nc	0,03425216	2,865805779
APOGONIDAE	Archamia	fucata	Z	nc	0,008914977	3,322777975
APOGONIDAE	Cheilodipterus	quinquelineatus	P	nc	0,016071637	2,999229198
APOGONIDAE	Ostorrhinchus	compressus	Z	nc	0,018548308	2,984148205
APOGONIDAE	Ostorrhinchus	cyanosoma	Z	nc	0,018548308	2,984148205
APOGONIDAE	Ostorrhinchus	norfolkensis	Z	nc	0,018548308	2,984148205
APOGONIDAE	Zoramia	leptacantha	Z	nc	0,01544933	3,121264237
AULOSTOMIDAE	Aulostomus	chinensis	P	nc	0,00021408	3,514432015
BLENNIIDAE	Atrosalarias	holomelas	H	nc	0,002176338	3,900642826
BLENNIIDAE	Cirripectes	sp	H	nc	0,013041119	3,1496559
BLENNIIDAE	Ecsenius	bicolor	H	nc	0,023914532	2,583071582
BLENNIIDAE	Meiacanthus	atrodorsalis	C	nc	0,000865315	4,470212737
BLENNIIDAE	Salarias	alboguttatus	H	nc	0,013813027	2,979675633
CAESIONIDAE	Caesio	caeruleaurea	Z	c	0,019962387	2,991405691
CAESIONIDAE	Caesio	cuning	Z	c	0,014872569	3,121332434
CAESIONIDAE	Caesio	sp	Z	c	0,00928912	3,252730667
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	auriga	C	nc	0,040397085	2,829430605
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	bennetti	C	nc	0,038394963	2,885078662
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	citrinellus	C	nc	0,035298745	2,834137756
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	ephippium	C	nc	0,022485473	3,060921521
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	flavirostris	C	nc	0,02509663	3,113247491
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	lineolatus	C	nc	0,069264822	2,621506842
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	lunulatus	C	nc	0,031101049	2,975659108
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	melannotus	C	nc	0,026693396	3,0486
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	plebeius	C	nc	0,060610606	2,62781702
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	speculum	C	nc	0,066371091	2,693022379
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	trifascialis	C	nc	0,025776994	2,969077062
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	ulietensis	C	nc	0,031141577	2,874116568
CHAETODONTIDAE	Chaetodon	vagabundus	C	nc	0,027755325	2,9734648
CHAETODONTIDAE	Coradion	altivelis	C	nc	0,042050947	2,847331765
CHAETODONTIDAE	Heniochus	acuminatus	C	nc	0,02469887	3,10580226
CHAETODONTIDAE	Heniochus	chrysostomus	C	nc	0,016134039	3,262174435
CHAETODONTIDAE	Heniochus	monoceros	C	nc	0,016997049	3,210582079
DIODONTIDAE	Diodon	hystrix	C	nc	0,193426479	2,471790689
GOBIESOCIDAE	Diademichthys	lineatus	C	nc	0,0009	3,895
GOBIIDAE	Amblygobius	nocturnus	C	nc	0,018375962	2,833567575
GOBIIDAE	Amblygobius	phalaena	C	nc	0,018375962	2,833567575
GOBIIDAE	Asterropteryx	semipunctatus	H	nc	0,026387532	2,622565603
GOBIIDAE	Cryptocentrus	strigilliceps	C	nc	0,026387532	2,622565603
GOBIIDAE	Ctenogobiops	pomastictus	C	nc	0,026387532	2,622565603
GOBIIDAE	Exyrias	bellissimus	C	nc	0,012956458	2,88207694
GOBIIDAE	Gobiodon	okinawae	C	nc	0,057695691	2,43917312
GRAMMISTIDAE	Diploprion	bifasciatum	C	nc	0,008862367	3,277495731

HAEMULIDAE	Plectorhinchus	chaetodonoides	C	c	0,017327719	3,040326896
HOLOCENTRIDAE	Neoniphon	sammara	C	c	0,027615397	2,888353581
LABRIDAE	Cheilinus	chlorourus	C	c	0,019724558	2,993151669
LABRIDAE	Cheilinus	trilobatus	C	c	0,016232685	3,059469977
LABRIDAE	Choerodon	graphicus	C	c	0,01512008	3,121975586
LABRIDAE	Coris	batuensis	C	nc	0,006500842	3,254413799
LABRIDAE	Gomphosus	varius	C	nc	0,024366779	2,702688094
LABRIDAE	Halichoeres	melanurus	C	nc	0,009309689	3,26150414
LABRIDAE	Hemigymnus	melapterus	C	nc	0,024234431	2,922617847
LABRIDAE	Labroides	dimidiatus	C	nc	0,005854909	3,230934257
LABRIDAE	Oxycheilinus	digramma	C	nc	0,010669345	3,177649683
LABRIDAE	Stethojulis	strigiventer	C	nc	0,019083913	2,876257644
LABRIDAE	Thalassoma	hardwicke	C	nc	0,017830241	2,977652716
LABRIDAE	Thalassoma	lunare	C	nc	0,021100959	2,831738121
LABRIDAE	Thalassoma	lutescens	C	nc	0,012995696	3,041862106
LABRIDAE	Thalassoma	nigrofasciatum	C	nc	0,012305946	3,097020357
LETHRINIDAE	Lethrinus	obsoletus	C	c	0,017329694	3,025828472
LUTJANIDAE	Lutjanus	bohar	C	nc	0,015628466	3,058646488
LUTJANIDAE	Lutjanus	fulviflamma	C	c	0,020478805	2,95984964
LUTJANIDAE	Lutjanus	fulvus	C	c	0,021061453	2,974331519
LUTJANIDAE	Lutjanus	monostigma	P	nc	0,022184666	2,91252239
LUTJANIDAE	Lutjanus	quinquelineatus	C	nc	0,014600946	3,099583416
MICRODESIMIDAE	Ptereleotris	microlepis	Z	nc	0,026387532	2,622565603
MONACANTHIDAE	Oxymonacanthus	longirostris	C	nc	0,012224814	3,032756806
MUGILIDAE	Crenimugil	crenilabis	H	c	0,012718591	3,046374966
MUGILOIDIDAE	Parapercis	australis	C	nc	0,013311784	2,942682432
MUGILOIDIDAE	Parapercis	clathrata	C	nc	0,013311784	2,942682432
MUGILOIDIDAE	Parapercis	hexophtalma	C	nc	0,006820633	3,157263284
MUGILOIDIDAE	Parapercis	xanthozona	C	nc	0,013286507	2,889822623
MULLIDAE	Mulloidichthys	flavolineatus	C	c	0,011973899	3,101092515
MULLIDAE	Parupeneus	ciliatus	C	c	0,011633172	3,219917119
MULLIDAE	Parupeneus	indicus	C	c	0,014149783	3,114207325
MULLIDAE	Parupeneus	multifasciatus	C	nc	0,01135854	3,210819176
MULLIDAE	Upeneus	tragula	C	nc	0,013653583	3,06800227
NEMIPTERIDAE	Scolopsis	bilineata	C	nc	0,013827538	3,173776985
NEMIPTERIDAE	Scolopsis	ciliata	C	nc	0,015738012	3,054293114
OSTRACIIDAE	Ostracion	cubicus	C	nc	0,128822163	2,519494589
POMACANTHIDAE	Centropyge	bicolor	H	nc	0,074481017	2,576934376
POMACANTHIDAE	Centropyge	tibicen	H	nc	0,049230696	2,79451381
POMACENTRIDAE	Abudefduf	sexfasciatus	Z	nc	0,021276044	3,151969035
POMACENTRIDAE	Abudefduf	vaigiensis	H	nc	0,022562179	3,132017677
POMACENTRIDAE	Abudefduf	whitleyi	Z	nc	0,025435258	3,092681479
POMACENTRIDAE	Amblyglyphidodon	curacao	Z	nc	0,012595182	3,435080415
POMACENTRIDAE	Amblyglyphidodon	orbicularis	Z	nc	0,014347695	3,330369305
POMACENTRIDAE	Amphiprion	akindynos	Z	nc	0,031616572	2,929801945
POMACENTRIDAE	Amphiprion	melanopus	Z	nc	0,015454066	3,297978998
POMACENTRIDAE	Cheilopion	labiatus	C	nc	0,020908767	3,190800285
POMACENTRIDAE	Chromis	atripectoralis	Z	nc	0,017909534	3,290729357
POMACENTRIDAE	Chromis	atripes	Z	nc	0,022859092	3,17522814
POMACENTRIDAE	Chrysiptera	rollandi	Z	nc	0,025946838	2,926389596
POMACENTRIDAE	Chrysiptera	taupou	Z	nc	0,021988607	3,001146438
POMACENTRIDAE	Dascyllus	aruanus	Z	nc	0,04150671	2,988875406
POMACENTRIDAE	Hemiglyphidodon	plagiometopon	H	nc	0,017526417	3,212386964
POMACENTRIDAE	Neoglyphidodon	melas	C	nc	0,017526417	3,212386964
POMACENTRIDAE	Neoglyphidodon	nigroris	H	nc	0,017822007	3,182200046
POMACENTRIDAE	Neopomacentrus	nemurus	Z	nc	0,025903786	2,913150252
POMACENTRIDAE	Plectroglyphidodon	lacrymatus	H	nc	0,020908767	3,190800285
POMACENTRIDAE	Pomacentrus	adelus	H	nc	0,017611574	3,291498389
POMACENTRIDAE	Pomacentrus	amboinensis	H	nc	0,043944844	2,82375797
POMACENTRIDAE	Pomacentrus	aurifrons	Z	nc	0,02800791	3,023852146
POMACENTRIDAE	Pomacentrus	brachialis	Z	nc	0,02800791	3,023852146
POMACENTRIDAE	Pomacentrus	moluccensis	Z	nc	0,030454215	3,012111701

POMACENTRIDAE	Pomacentrus	nagasakiensis	Z	nc	0,02800791	3,023852146
POMACENTRIDAE	Stegastes	fasciolatus	H	nc	0,002813065	4,062943115
POMACENTRIDAE	Stegastes	nigricans	H	nc	0,038408298	3,009999217
POMACENTRIDAE	Stegastes	punctatus	H	nc	0,039542536	2,989098757
SCARIDAE	Chlorurus	microrhinos	H	c	0,024694091	2,955475758
SCARIDAE	Chlorurus	sordidus	H	c	0,024311416	2,969306281
SCARIDAE	Scarus	ghobban	H	c	0,016504504	3,041159047
SCARIDAE	Scarus	rivulatus	H	c	0,017447575	3,074047766
SCARIDAE	Scarus	sp	H	c	0,023373877	2,956463124
SERRANIDAE	Cephalopholis	boenak	P	c	0,014620408	3,019150471
SERRANIDAE	Epinephelus	fasciatus	C	c	0,013826472	3,040659702
SERRANIDAE	Epinephelus	merra	C	c	0,015835139	2,966364394
SERRANIDAE	Epinephelus	ongus	C	c	0,018994656	2,927803298
SERRANIDAE	Epinephelus	polyphekadion	C	c	0,008332817	3,165759149
SERRANIDAE	Plectropomus	leopardus	P	c	0,011753401	3,059544862
SIGANIDAE	Siganus	argenteus	H	c	0,010902526	3,154186078
SIGANIDAE	Siganus	doliatus	H	c	0,010359871	3,272079996
SIGANIDAE	Siganus	puellus	H	c	0,017612346	3,028394224
SIGANIDAE	Siganus	vulpinus	H	c	0,01447752	3,121692957
SPHYRAENIDAE	Sphyraena	flavicauda	P	c	0,004393552	3,083003709
SYNGNATHIDAE	Corythoichthys	intestinalis	C	nc	0,0004	4,12
SYNODONTIDAE	Saurida	gracilis	P	nc	0,0065743	3,164927539
TETRAODONTIDAE	Canthigaster	bennetti	C	nc	0,042376622	2,822020793
ZANCLIDAE	Zanclus	cornutus	C	nc	0,014703742	3,369908069

VII.3 Annexe 4 : Références bibliographiques

- Anderson MJ, Gorley RN, Clarke KR (2008) PERMANOVA for PRIMER: Guide to Software and Statistical Methods. PRIMER-E, Plymouth.
- Bouchon-Navaro Y, Bouchon C, Harmelin-Vivien M (1985) Impact of coral degradation on chaetodontid fish assemblage (Moorea, French Polynesia). Proceedings of the 5th International Coral Reef Symposium 5: 427-32.
- Buckland ST (1993) Distance sampling - Estimating abundance of biological populations. London: Chapman and Hall Editions.
- Chabanet P, Ralambondrainy H, Amanieu M, Faure G, Galzin R (1997) Relationships between coral reef substrata and fish. *Coral Reefs* 16:93-102.
- Chabanet P, Guillemot N, Kulbicki M, Sarramégna S, Vigliola L (2010) Baseline study of the spatio-temporal patterns of reef fish communities prior to a major mining project in New Caledonia (South Pacific). *Marine Pollution Bulletin* 61: 598-611.
- Connell SD, Kingsford MJ (1998) Spatial, temporal and habitat-related variation in the abundance of large predatory fish at One Tree Reef, Australia. *Coral Reefs* 17: 49-57
- Froese R, Pauly D (1997) FishBase 97: concepts, design and data sources. ICLARM (éd.), Manila.
- Galzin R (1987) Structure of fish communities of French Polynesian coral reefs. I: Spatial scales. *Mar Ecol Prog Ser* 41: 129-136.
- Ginger-Soproner (2011) Suivi environnemental du milieu marin de la zone Voh-Koné-Pouembout - Surveillance biologique et physico-chimique, Rapport semestriel 2011, 180p.
- Ginger-Soproner (2013) Suivi environnemental du milieu marin de la zone Voh-Koné-Pouembout - Surveillance biologique et physico-chimique, Rapport annuel 2013.
- Graham NAJ, Wilson SK, Jennings S, Polunin NVC, Bijoux JP, Robinson J (2006) Dynamic fragility of oceanic coral reef ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 103(22): 8425-8429.
- Guillemot N (2005) Analyse des peuplements de poissons récifaux dans la zone de Koné (Nouvelle-Calédonie) et optimisation du plan d'échantillonnage pour le suivi d'un impact anthropique sur les ressources halieutiques. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, 71p.
- Guillemot N (2009) Les peuplements de poissons récifaux et leur exploitation dans la zone de Voh-Koné-Pouembout (Nouvelle-Calédonie) : caractérisation, indicateurs et enjeux de suivi. Mémoire de doctorat, 350p.
- Guillemot N, Chabanet P, Le Pape O (2010) Cyclone effects on coral reef habitats in New Caledonia (South Pacific). *Coral Reefs* 29(2): 445-453.
- Guillemot N, Kulbicki M, Chabanet P, Vigliola L (2011) Functional redundancy patterns reveal non-random assembly rules in a species-rich marine assemblage. *PLoS ONE* 6(10): e26735.
- Guillemot N, Gilbert A, Heintz T (2018) Etat de référence environnemental du milieu marin dans le domaine maritime du Port Autonome de Nouvelle-Calédonie – Volet 3 – Composante Biologique (Inventaires in situ), 106p.
- Harmelin-Vivien ML, Harmelin JG, Chauvet C, Duval C, Galzin R, Lejeune P, Barnabé G, Blanc F, Chevalier R, Duclerc J, Lasserre G (1985). Evaluation visuelle des peuplements et populations de poissons : méthodes et problèmes. *Revue Ecologie Terre Vie* 40: 467-539.
- Hooper DU, Solan M, Symstad A, Diaz S, Gessner MO, Buchmann N, Degrange V, Grime P, Hulot F, Mermilliod-Blondin F, Roy J, Spehn E, van Peer L (2002) Species diversity, functional diversity

- and ecosystem functioning. In: *Biodiversity and ecosystem functioning. Synthesis and perspectives*. Oxford University Press.
- Hourigan T, Tricas T, Reese E (1988) Coral reef fishes as indicators of environmental stress in coral reefs. In: Soule D, Kleppel G (eds) *Marine organisms as indicators* 6:107-35.
- Hill J, Wilkinson C (2004) *Methods for Ecological Monitoring of Coral Reefs*. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Version 1, 1-116.
- Jones GP (1991) Post-recruitment processes in the ecology of coral reef fish populations: a multi-factorial perspective. In: Sale PF (éd.) *The ecology of fishes on coral reefs*. Academic Press, San Diego.
- Jones GP, McCormick MI, Srinivasan M, Eagle JV (2004) Coral decline threatens fish biodiversity in marine reserves. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 101: 8251-8253.
- Kulbicki M, Sarraméga S (1999) Comparison of density estimates derived from strip transect and distance sampling for underwater visual census: a case study of Chaetodontidae and Pomacanthidae. *Aquatic Living Resources* 12: 315-325.
- Kulbicki M, Chabanet P, Guillemot N, Sarraméga S, Vigliola L, Labrosse P (2004) *Les poissons de récifs dans la région de Koné. Premiers résultats comparatifs des évaluations en plongée menées par l'IRD, la CPS et Falconbridge entre 1996 et 2002*. Rapport technique IRD. 106p.
- Kulbicki M, Guillemot N, Amand M (2005a) A general approach to length-weight relationships for New Caledonian lagoon fishes. *Cybium* 29(3): 235-252.
- Kulbicki M, Bozec Y-M, Labrosse P, Letourneur Y, Mou Tham G, Wantiez L (2005b) Diet composition of carnivorous fishes from coral reef lagoons of New Caledonia. *Aquatic Living Ressources* 18(3): 231-250.
- Kulbicki M, Sarraméga S, Letourneur Y, Wantiez L, Galzin R, Mou-Tham G, Chauvet C, Tholot P (2007) Short-term temporal changes in the structure of a coral reef fish assemblage in a New Caledonian protected area: relative influence of opening to fishing. *Journal of Experimental Ecology and Biology* 353: 145-163.
- Labrosse P, Letourneur Y, Kulbicki M, Magron F (1999) Fisheye: A new database on the biology and ecology of lagoon and reef fishes of the South Pacific. Example of its use on the ecology of commercial herbivorous fishes. *Proceedings of the 5th Indo-Pacific Fish Conference* 1: 657-672.
- Labrosse P, Kulbicki M, Ferraris J (2001) Comptage visuel de poissons en plongée : conditions d'utilisation et de mise en oeuvre. *Manuel CPS/IRD*.
- Lambshead PJD, Platt HM, Shaw KM (1983) The detection of differences among assemblages of marine benthic species based on an assessment of dominance and diversity. *Journal of Natural History*, 17(6), 859-874.
- Letourneur Y, Galzin R, Harmelin-Vivien M (1996) Temporal variations in the diet of the damselfish *Stegastes nigricans* (Lacepède) on a Réunion fringing reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 217: 1-18.
- McGill BJ, Enquist BJ, Weiher E, Westoby M (2006) Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology and Evolution* 21: 178-185.
- Öhman MC, Rajasuriya A, Svensson S (1998) The Use of Butterflyfishes (Chaetodontidae) as Bio-Indicators of Habitat Structure and Human Disturbance. *Ambio* 27(8): 708-716.
- Osenberg CW, Schmitt RJ, Holbrook SJ, Abu-Saba KE, Flegal AR (1994) Detection of Environmental Impacts: Natural Variability, Effect Size, and Power Analysis. *Ecological Applications* 4(1): 16-30.

- Petchey OL, Gaston KJ (2002a) Functional diversity (FD), species richness and community composition. *Ecology Letters* 5:402-411.
- Petchey OL, Gaston KJ (2002b) Extinction and the loss of functional diversity. *Proceedings of the Royal Society of London, Biological Sciences* 269:1721–1727.
- Petchey OL, Gaston KJ (2006) Functional diversity: back to basics and looking forward. *Ecology Letters* 9: 741-758.
- Pitcher JT, Hart PJB, Pauly D (1998) Reinventing fisheries management. *Fish Fish. Ser.* 23.
- Reese ES (1981) Predation on corals by fishes of the family Chaetodontidae: implications for conservation and management of coral reef ecosystems. *Bulletin of Marine Science* 31: 594-604.
- Roberts CM, Ormond RF (1987) Habitat complexity and coral reef diversity and abundance on Red Sea fringing reefs. *Marine Ecology Progress Series* 41: 1-8.
- Roberts CM, Dawson Shepherd AR, Ormond RF (1992) Large-scale variation in assemblage structure of Red Sea butterfly fishes and angel fishes. *Journal of Biogeography* 19: 239-50.
- Roset N, Grenouillet G, Goffaux D, Pont D, Kestemont P (2007) A review of existing fish assemblage indicators and methodologies. *Fisheries Management and Ecology* 14: 393–405.
- Sale PF, Doherty PJ, Eckert GJ, Douglas WA, Ferrell DJ (1984) Large scale spatial and temporal variation in recruitment to fish populations on coral reefs. *Oecologia* 64(2): 191-198.
- Scherrer B (1984) Biostatistique. Gaetan Morin Editions.
- Schwartz MW, Brigham CA, Hoeksema JD, Lyons KG, Mills MH, van Mantgem PJ (2000) Linking biodiversity to ecosystem function: implications for conservation ecology. *Oecologia* 122(3):297-305.
- Steele JH (1991) Marine functional diversity. *Bioscience* 41:470-474.
- Syms C, Jones GP (2000) Disturbance, habitat structure, and the dynamics of a coral-reef fish community. *Ecology* 81: 2714-2729.
- Tittensor DP, Micheli F, Nyström M, Worm B (2007). Human impacts on the species-area relationship in reef fish assemblages. *Ecology Letters* 10 (9): 760-772.
- Underwood AJ (1992) Beyond BACI: The Detection of Environmental Impacts on Populations in the Real, but Variable, World. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 161(2): 145-178.
- Underwood AJ (1994) On beyond BACI: Sampling designs that might reliably detect environmental disturbances. *Ecological Applications* 4(1): 3-15.
- Wilson SK, Burgess SC, Cheal AJ, Emslie M, Fisher R (2008) Habitat utilization by coral reef fish: implications for specialists vs. generalists in a changing environment. *Journal of Animal Ecology* 77: 220–228.
- Zar JH (1999). *Biostatistical Analysis*, 4th Edition. Prentice Hall International, London.

5 ANNEXE 5 : EXPERTISE MARINE CORTEX

1 Introduction

1.1 Objectif de la prestation

L'objectif de la prestation confiée par Bio Eko Consultants à CORTEX est de caractériser la nature des fonds marins dans la zone proche du pont de Nouville, dans le cadre de son remplacement par un nouvel ouvrage.

1.2 Équipe mobilisée pour le projet

Afin de mener à bien cette mission, CORTEX, société d'expertise-conseil sur les récifs coralliens, s'est attachée les services de la société EGLE qui a fourni un navire, un opérateur de ROV (véhicule sous-marin téléopéré) et un ROV.

1.3 Planning d'intervention

La mission de terrain s'est déroulée le 23 novembre 2023.

2 Méthode d'inventaire

2.1 Généralités

Compte tenu du risque avéré d'attaques de requins gris et bouledogues sur l'ensemble du littoral de Nouméa, la baignade et les activités nautiques ont été interdites du 20/03 au 31/12/2023 (Arrêté n°2023/911).



Dans ce contexte, il a été convenu de mener les inventaires sous-marins en utilisant un ROV. Le modèle utilisé, fourni par la société EGLE, est le Deep Trekker DTG3.

2.2 Nature des inventaires

Alors que des techniques d'inventaires classiques menées par des plongeurs biologistes munis de décamètres permettent d'évaluer de manière qualitative et quantitative la nature des fonds marins et les peuplements d'invertébrés et de poissons, l'utilisation d'un ROV ne permet qu'une approche qualitative de la nature des communautés benthiques fixées. L'expertise s'est donc uniquement focalisée sur ce compartiment de l'environnement marin.

2.3 Protocole d'inventaire

Afin de caractériser la nature des fonds marins sur la zone d'étude, plusieurs types d'observations ont été réalisés (cf. carte « Protocole méthodologique ») :

- Cheminent en continu sur la zone la plus proche du pont et correspondante à la zone la plus susceptible d'être impactée par les travaux du pont : prise de photos et d'une vidéo en continu.
- Des points d'observation fixes : descente du drone sur un point prédefini par photo-interprétation (correspondant à une texture d'image particulière) puis prise de photos et d'une vidéo en continu sur chaque point.
- Transect vidéo continu le long des enrochements :
 - Sur 150 mètres de distance pour la berge Sud
 - Sur 220 mètres de distance pour la berge Nord
- Au besoin, ces vidéos pourront être réitérées pour suivre les impacts de la construction du nouveau pont. Les points de départ et d'arrivée de chacun des transects sont fournis ci dessous.

Tableau 1 : Coordonnées GPS des transects-vidéo (WGS 84).

Transect	Début du transect	Fin du transect
Berge Nord	22°16'06.13"S 166°25'43.22"E	22°16'04.91"S 166°25'35.75"E
Berge Sud	22°16'09.39"S 166°25'37.53"E	22°16'05.38"S 166°25'35.22"E

3 Résultats

Grâce aux observations de terrain, une carte de la nature des fonds a été réalisée, dont les principaux éléments sont détaillés ci-dessous :

Les enrochements présents sur les berges Nord et Sud sont colonisés par des coraux épars au Sud et moyennement denses au Nord, qui se concentrent majoritairement dans le premier mètre d'eau. La plupart des coraux sont des massifs de Porites (*Porites cf. lobata*) et des coraux de feu (*Millepora stenella*). Certains coraux massifs atteignent un diamètre de 50-60 cm, particulièrement sur la berge Nord. Les massifs de Porites possédant un taux de croissance d'environ 1 cm par an, ces colonies ont dû se fixer et débuter leur croissance il y a une cinquantaine d'années. Des coraux de quelques centimètres sont aussi présents, indiquant que le peuplement corallien continue de croître et de s'étoffer en nouveaux individus au fil du temps. D'après nos observations par drone (qualité de l'expertise bien moindre qu'en plongée sous-marine), les coraux semblent globalement en bonne santé. Compte tenu de leur caractère opportuniste (fixation sur des structures artificielles) et du fait qu'ils ne constituent pas à proprement parlé un « récif corallien », la question de leur qualification en tant qu' « écosystème patrimonial » au titre du code de l'environnement de la Province Sud se pose. Toutefois, il est à noter que la vie marine foisonne autour de ces coraux qui représentent donc un lieu de vie (zone de refuge pour les petits poissons en particulier) et une source de nourriture indéniables pour la zone. Les principaux animaux recensés ont été : des oursins diadèmes (*Diadema setosum*) s'agrégant entre les enrochements, quelques bénitiers (*Tridacna maxima*) insérés dans les massifs de Porites, des bivalves du genre *Pteria* (dont *Pteria penguin*) et des ascidies (*Ascidia glabra*) poussant dans les coraux de feu, et des poissons abondants : bancs de poissons-demoiselles (*Abudefduf sexfasciatus*, *Chromis viridis*, *Pomacentrus aurifrons*), bancs de poissons blancs (*Gerres oyena*), bancs de poissons-perroquets juvéniles, des poissons-papillons (*Chaetodon citrinellus*, *C. lunulatus*), poissons-lapins (*Signatus dolliatus*), chirurgiens (*Acanthurus nigrofasciatus*, *A. blochii*) etc. D'un point de vue écologique, cette zone est sensible et devrait faire l'objet de mesures de préservation.

Aux enrochements succèdent, sur la rive Nord comme Sud, deux zones très peu profondes constituées de coraux morts, localement colonisés par des algues brunes (principalement du genre *Padina*). Ici aussi des bancs de poissons-demoiselles sont notés (principalement de l'espèce *Abudefduf sexfasciatus*). De très rares coraux de feu vivants sont présents au sein de cette unité, très peu sensible d'un point de vue écologique.

La partie centrale de la zone d'étude est constituée d'une zone de sable, blocs et débris coralliens dans l'axe du pont de Nouville. L'absence de vie marine peut certainement s'expliquer par le fort courant qui y règne fréquemment (goulet d'étranglement au niveau du pont, qui a pour effet une accélération des courants). Dénuee de vie marine, cette zone n'est pas sensible d'un point de vue écologique.

S'en suit un large secteur composé d'amas de débris coralliens et coquilliers (principalement des coquilles de bivalves *Isognomon*), localement recouverts d'algues brunes du genre *Padina*, et où de très rares coraux vivants sont observés : essentiellement des coraux libres de la famille des Fungiidae, observation d'un *Pavona decussata*, d'un *Pavona cactus* et d'un corail de feu. Quelques éponges sont recensées. Des oursins *Parasalenia gratiosa* s'agrègent par dizaines dans les débris, en certains points ils sont très abondants. Peu complexe, cette zone n'abrite que peu ou pas de poissons (aucun observé sur les vidéos). Cette zone est très peu sensible d'un point de vue écologique.

La zone expertisée la plus éloignée du pont de Nouville (située à environ 200 mètres du pont) est composée de sable colonisé par une espèce de phanérogame marine du genre *Halophila*. Présente sous forme de tâches denses, l'espèce est toutefois de vitalité moyenne : des épiphytes et des dépôts de sédiments fins recouvrent les feuilles d'herbier. Offrant un habitat structurellement peu complexe, cette zone n'abrite que peu ou pas de poissons (aucun observé sur les vidéos). Comme pour les coraux fixés aux enrochements, la qualification d'une telle zone en « écosystème patrimonial » au titre du code de l'environnement de la province Sud se pose : les espèces du genre *Halophila* ne forment pas des prairies sous-marines comme le font classiquement d'autres types de phanérogames comme les Cymodocées, *Halodule*, *Thalassia* ou *Enhalus*. Ces dernières espèces, plus larges et plus hautes, créent des habitats complexes qui jouent des fonctions essentielles dans la stabilisation des fonds par leur réseau racinaire profond, dans la protection des jeunes poissons au sein de leurs longues tiges, dans la reproduction des nudibranches ou sont des supports de fixation d'autres organismes marins tels que les ascidies coloniales ou les foraminifères. Les espèces du genre *Halophila* ne jouent pas ces fonctions mais sont néanmoins une source de nourriture essentielle aux tortues marines et dugongs, deux espèces protégées par le code de l'environnement de la province Sud. D'un point de vue écologique, compte tenu de leur caractère opportuniste et de leur vitalité moyenne, cette zone peut être considérée comme moyennement sensible.

6 ANNEXE 6 : ESPACE PLANTÉ N°E146



Plan d'Urbanisme Directeur

Version soumise à approbation - décembre 2019

Pour connaître les contraintes affectant l'occupation ou l'utilisation du sol, consulter le règlement graphique et le règlement écrit (article 20), ainsi que les autres plans et documents composant le PUD.

Nom commun

Divers

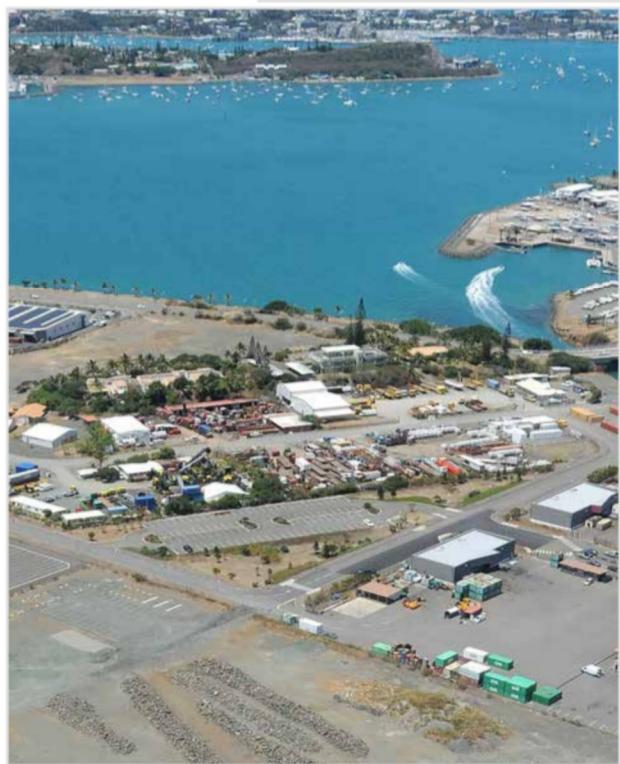
Nom scientifique**Surface**3 065,5 m²**NIC**

Pour identifier les parcelles concernées, consulter les tableaux détaillés en annexe du règlement écrit du PUD.

Echelle A4 : 1:5 000
0 50 100 200 Mètres

**LIBELLÉ****Espace Vert PANC****CARACTÉRISTIQUES**

Rare espace vert situé dans la zone portuaire très minérale, au niveau du pont de Nouville, derrière les locaux du Port Autonome.

**CRITÈRES****environnemental**

oui

paysager

oui

écologique

oui



8 ANNEXE 8 : MESURES DE BRUIT

CAMPAGNE DE MESURES DE BRUIT

Méthode dite de contrôle (selon la norme NFS 31-010)

CAMPAGNE : Janvier 2024

Nom de l'affaire : Pont Nouille

N° Affaire : 3715

MESURE N°

DATE : 19/01/2024

MESURE DE BRUIT REALISEE PAR : LV

PERIODE : JOUR NUIT SEMAINE W-E FERIÉ
 HEURES OUVRABLES EN DEHORS DES HEURES OUVRABLES

DEMARRAGE: 10^h09

ARRET: 10^h39

DUREE: 30 min

TYPOLOGIE HABITATION BUREAU INDUSTRIE
 ERP TERRAIN NU AUTRE :

CONDITIONS DE MESURE : Vent < 10 kt, soleil

10^h36 : Ambulances

CONDITIONS DE MESURAGE

- CONVENTIONNEL
- A l'intérieur des immeubles (source extérieure ou intérieure) :
Centre de la pièce – 1 m des parois – 1,5 m des fenêtres – 1,2 à 1,5 m du sol
Fenêtres ouvertes ou fermées suivant conditions d'occurrence – portes fermées
- A l'extérieur (source extérieure) :
À l'intérieur des limites de la propriété exposée aux bruits – Si nécessaire mesurages complémentaires peuvent être effectués en lim. de prop. des installations comportant les sources de bruit incriminées
- En limite de propriété (1,2 à 1,5 m au dessus du sol – 1 m de toute surface réfléchissante)
- En façade d'immeuble (2 m en avant des façades ou toiture – 1,2 à 1,5 m au-dessus du niveau)
- SPÉCIFIQUE : _____
1,2 à 1,5 m au dessus du sol – 1 m de toute surface réfléchissante

CAMPAGNE DE MESURES DE BRUIT

Méthode dite de contrôle (selon la norme NFS 31-010)

CALIBRAGE AVANT MESURE : dBA CALIBRAGE APRES MESURE : dBA

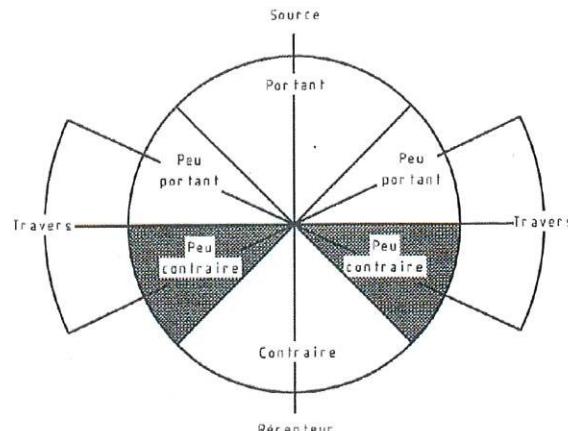
LEQ MOYEN OBSERVE AVANT MESURE SUR 1 MN :

DISTANCE SOURCE/RECEPTEUR : INF A 40 m SUP A 40 m

CONDITIONS DE MESURE (SURTOUT POUR D>40M)

VENT : *Ø vent*

- PORTANT
- PEU PORTANT
- TRAVERS
- PEU CONTRAIRE
- CONTRAIRE



VITESSE :

- FAIBLE (aucun mouvement, vit. Habituellement inf. à 1 m/s)
- MOYEN (feuilles d'arbres agitées, vit. habituellement comp entre 1 et 3 m/s)
- FORT (bruits aérodynamiques, siflements, vit. habituellement sup à 3 m/s)

SOL : SEC (pas de pluie dans les 10 derniers jours)

HUMIDE (4 à 5 MM DE PLUIE DANS LES DERNIÈRES 24H)

AUTRE (À PRÉCISER) :

	U1	U2	U3	U4	U5
T1		--	-	-	
T2	--	-	-	Z	+
T3	-	-	Z	+	+
T4	-	Z	+	+	++
T5		+	+	++	

U1 : vent fort contraire au sens source-récepteur (3 m/s à 5 m/s)
U2 : vent moyen à faible (1 m/s à 3 m/s) contraire ou vent fort, peu contraire
U3 : vent nul ou vent quelconque de travers
U4 : vent moyen à faible portant ou vent fort peu portant (env. 45°)
U5 : vent fort portant

T1 : jour **et** fort ensoleillement **et** surface sèche **et** peu de vent
T2 : même conditions que T1 mais au moins 1 est non vérifiée
T3 : lever du soleil ou coucher du soleil ou (temps couvert et venteux et surface pas trop humide)
T4 : nuit et (nuageux ou vent)
T5 : nuit et ciel dégagé et vent faible

- -- : atténuation très forte

- : atténuation forte

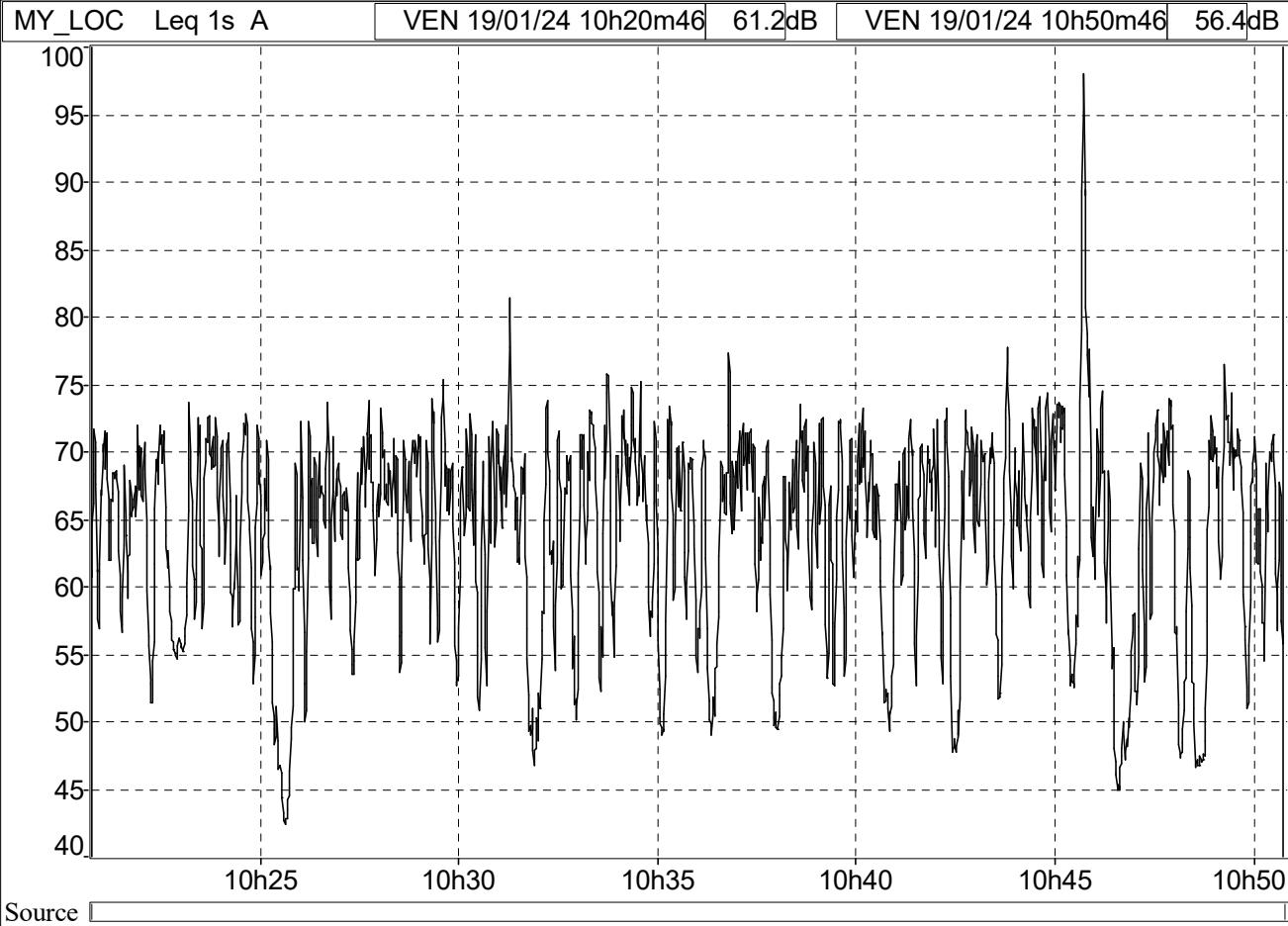
Z : effets météorologiques nuls

+ : renforcement faible du niveau sonore

++ : renforcement moyen du niveau sonore.

Fichier	pont nouvelle
Début	19/01/24 10:20:46
Fin	19/01/24 10:50:47
Lieu	MY_LOC
Pondération	A
Type de données	Leq
Unité	dB
Ecart type Leq(30m)	0,0 dBA
Période la plus silencieuse (30m)	
Début	19/01/24 10:20:46
Fin	19/01/24 10:50:46
Niveau	71,1 dBA
Période la plus bruyante (30m)	
Début	19/01/24 10:21:46
Fin	19/01/24 10:51:46
Niveau	71,2 dBA

Fichier	pont nouvelle						
Début	19/01/24 10:20:46						
Fin	19/01/24 10:50:47						
Voie	Type	Pond.	Unité	Leq	Lmin	Lmax	Ec.Type
MY_LOC	Leq	A	dB	71,1	42,4	98,0	7,4



9 ANNEXE 9 : RECOMMANDATIONS ÉCLAIRAGE

Économisons notre énergie & Protégeons la biodiversité calédonienne : Réduisons les pollutions lumineuses

Qu'est-ce que les pollutions lumineuses ?

L'éclairage urbain répond aux besoins de notre société actuelle, en termes de confort et de sécurité, routière notamment. Mais l'excès de lumière artificielle nocturne entraîne un gaspillage énergétique important, ainsi que des perturbations sur une large gamme d'espèces.



La **pollution lumineuse** désigne la présence anormale ou gênante de lumière, généralement d'origine artificielle, pendant la nuit et les perturbations qui en découlent sur l'environnement naturel (la faune, la flore, les écosystèmes) et parfois la santé humaine (effets suspectés ou avérés).

La lutte contre la pollution lumineuse, qu'il s'agisse d'un halo diffus (aux abords des villes) ou de points d'éclairages puissants (phares, grands bâtiments, enseignes publicitaires lumineuses...), permet d'importantes économies d'énergie et la réduction d'émissions de gaz à effet de serre (diminution d'utilisation d'énergie fossile et/ou de composants toxiques* pour la production des ampoules...).

Pourquoi ce document ?

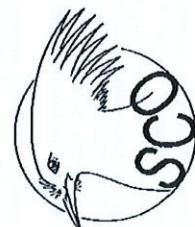
Ce document s'adresse à tous les aménageurs du territoire, et en particuliers aux collectivités, désireux de développer un éclairage respectueux de l'environnement.

Il propose une aide dans la planification et la gestion des éclairages publics avec comme objectif la maîtrise de l'éclairage extérieur, qui peut être résumé comme suit : « consommer beaucoup moins et éclairer autant », plutôt que « éclairer beaucoup plus et consommer autant ».

Les recommandations listées dans ce document sont le fruit d'un travail important qui s'inspire de ce qui se fait déjà à travers le monde. Ces recommandations visent donc à assurer un éclairage public moderne, efficace, économique autant qu'économie en énergie, et présentant un impact environnemental minimal.

Pour faire rapidement le point sur les étapes nécessaires à l'installation d'un éclairage non impactant pour l'environnement voici une check-list des 8 points essentiels qu'il faut retenir de ce document :

- ✓ Clarifier les besoins en termes d'éclairage des rues et des espaces publics
- ✓ Proscrire les lumières diffuses (lampadaires de type « boule » par exemple)
- ✓ Choisir des éclairages alternatifs (lampes à vapeur de sodium, LED)
- ✓ Diminuer le temps de fonctionnement des éclairages (réduction de l'intensité lumineuse ou extinction pendant certaines périodes de la nuit)
- ✓ Utiliser des ballasts d'allumages électroniques
- ✓ Ne pas dépasser les valeurs plafonds de la puissance lumineuse linéaire
- ✓ Ne pas dépasser des valeurs plafond de consommation d'énergie
- ✓ Couvrir avec une énergie renouvelable une partie à définir du besoin en électricité de l'éclairage des rues.



Source www.wikipedia.org

I. Impacts des pollutions lumineuses

1.1 Sur la faune

Les oiseaux : ce sont les espèces les plus visiblement touchées. La majorité des oiseaux migrateurs se déplacent de nuit et s'orientent grâce à la position des étoiles. Les lumières artificielles (villes, mines, centres commerciaux, phares...) occasionnent des mortalités très importantes d'oiseaux, soit par collision directe, soit par épuisement, prédatation...² En Nouvelle-Calédonie, de nombreux pétrains et puffins s'échouent chaque année à proximité de ces sources lumineuses intenses et ne peuvent redécoller. Ils meurent alors écrasés par des véhicules, mangés par des chiens ou des chats, d'épuisement et de faim...

→ Trois espèces d'oiseaux marins d'intérêt patrimonial sont fréquemment désorientées par les lumières artificielles en Nouvelle-Calédonie :



Le Pétré de Gould, espèce endémique classée « vulnérable » sur la liste rouge de l'IUCN

Le Pétré de Tahiti, sous-espèce endémique classée « quasi menacée d'extinction » sur la liste rouge de l'IUCN

Le Puffin Fouquet ou du Pacifique, espèce la plus fréquente, mais 25% de la population mondiale se trouve en Nouvelle-Calédonie

Les Hommes : Le terme de « pollution lumineuse » a été créé par les astronomes qui ont constaté une dégradation de la visibilité des étoiles et de la Lune.

L'exposition quotidienne à lumière électrique a considérablement augmenté durant ces dernières décennies (7 heures d'exposition par jour en moyenne) provoquant des déséquilibres nerveux et hormonaux. Sous l'effet de la lumière artificielle, l'épiphysse (petite glande située dans le cerveau) diminue nettement la production de métonine, dont les bienfaits seraient multiples : antivillussement, maintien de la libido, frein au développement des tumeurs, stabilisateur de la tension...⁴

1.2 Sur la Flore

Les plantes : Elles perçoivent la lumière grâce à des photorécepteurs et synchronisent leur développement avec les saisons et le rythme journalier. En présence d'éclairage nocturne, de nombreuses perturbations sont constatées : perturbation de la germination, de la croissance, de la floraison, du développement des fruits...causant parfois la mort de l'organisme⁵.

II. Réduction ou suppression des impacts des pollutions lumineuses

Dans une majorité de cas, il est possible de réduire les éclairages et leurs impacts sur l'environnement sans remettre en cause la sécurité des passants, par exemple en orientant la lumière pour les usagers des transports, des routes...

La lutte contre le sur-éclairage permet d'importantes économies d'énergie et la réduction d'émissions de gaz à effet de serre. L'éclairage public est le premier poste de consommation d'électricité des communes (plus de 45% des dépenses).

Les recommandations suivantes permettent non seulement de protéger la biodiversité et de lutter contre le réchauffement climatique, mais également de réduire les dépenses publiques.

2.1 Poser les bonnes questions en amont des projets

En amont de chaque projet, il est important de clarifier ses besoins en matière d'éclairage :

- Ce site a-t-il besoin d'éclairage ?
- Les éclairages décoratifs ou de zones non fréquentées peuvent-ils être réduits ou supprimés ?

2.2 Proscrire les lumières diffuses

- Évincer de tous projets d'aménagement les éclairages de type « boules ». Ces éclairages occasionnent une perte importante d'énergie et créent des halos lumineux impactant fortement l'environnement, notamment les oiseaux. Pour ceux déjà existants, il ne peut être que vivement conseillé de les remplacer par des lampadaires moins impactant ou d'utiliser des caches lumineux ou encore des réflecteurs.



Source MEFIDAD projet de loi grenelle de l'environnement « vers une reconnaissance de la pollution lumineuse » www.ilo.definedis.ora/declaration/1448770

² : Steven & David, 1996

³ : Briggs, 2002

Les roussettes et chauves-souris : Beaucoup d'espèces de mammifères terrestres nocturnes manifestent une répulsion vis-à-vis des zones éclairées ce qui fragmente leur habitat naturel et modifie leurs comportements de chasse et de reproduction⁶.

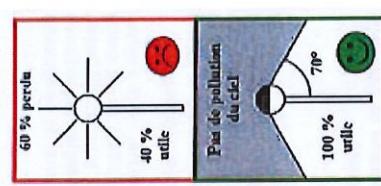
Les tortues : Les œufs des tortues marines éclosent de nuit et les jeunes tortues s'orientent grâce à la clarté naturelle de la mer ; en prenant pour repères les lumières artificielles, les jeunes tortues rampent dans de mauvaises directions et meurent, écrasées sur les routes, victimes des prédateurs ou de la chaleur après le lever du jour⁷.



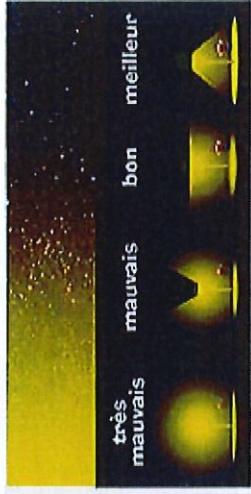
La pollution lumineuse est la deuxième cause de mortalité des insectes. En France, en période estivale, on estime que 150 insectes meurent par nuit et par lumière artificielle. Les insectes représentent 80% des espèces animales, ils constituent un maillon fondamental de la chaîne alimentaire et de la biodiversité (pollinisation)⁸ et la réduction de leurs effectifs peut donc avoir des conséquences sur la qualité de vie de nombreuses espèces dont la nôtre.

Source MEFIDAD projet de loi grenelle de l'environnement « vers une reconnaissance de la pollution lumineuse » www.ilo.definedis.ora/declaration/1448770

⁶ : Source MEFIDAD projet de loi grenelle de l'environnement « vers une reconnaissance de la pollution



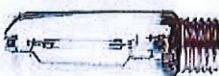
- Bien orienter ses éclairages : il est primordial d'orienter la lumière uniquement vers la cible que l'on cherche à éclairer. Toute orientation des éclairages vers le ciel est à proscrire. Également, le flux lumineux ne doit jamais dépasser le niveau horizontal. En général, des schémas du flux lumineux illustrent les catalogues d'éclairage ce qui permet de privilégier un type d'éclairage moins impactant.



- Utiliser des réflecteurs qui permettent de canaliser le flux lumineux et de le diriger vers le sol. L'emploi de réflecteurs sur d'anciennes installations peut constituer une solution de réduction des impacts en attendant leur remplacement par des installations plus modernes et moins consommatrices d'énergie.

2.3 Choisir des éclairages alternatifs

- Les lampes alternatives : Les lampes à vapeur de sodium ont un meilleur rendement. De plus la lumière jaune de ces lampes est moins attractive pour les animaux car elles ont un spectre lumineux restreint ; C'est également le cas des LED. Ces lampes constituent donc de très bonnes solutions et leur coût est rapidement amorti.



- La signalisation réfléchissante : elle doit être privilégiée autant que faire se peut et notamment sur les routes peu fréquentées.



2.4 Utiliser des ballasts d'allumage électroniques

Les lampes à décharge nécessitent un ballast d'allumage. Les ballasts conventionnels (ferromagnétiques) affichent des pentes élevées (entre 13 à 35 W en plus de la puissance de la lampe). Le remplacement de ce type de ballasts par des ballasts électroniques permet de diminuer ces pentes. De plus les ballasts électroniques permettent une durée de vie plus longue de la lampe et une efficacité énergétique supérieure. La technologie la plus récente permet en outre de varier la puissance des lampes à décharge, jusqu'à 30% de la puissance lumineuse nominale, pour une modulation du flux au cours de la nuit.

2.5 Ne pas dépasser des valeurs plafond de la puissance lumineuse linéaire

La fixation de valeurs plafond de puissance lumineuse émise au km (lumen/km), constitue la garantie de la maîtrise des émissions de lumière artificielle dans l'environnement nocturne, et du contrôle de la pollution lumineuse.

	<i>L</i> argeur de rue < 10m	<i>L</i> argeur de rue > 10m
Valeur cible	< 75 kilolumen/km	< 150 kilolumen/km
Valeur limite	< 150 kilolumen/km	< 300 kilolumen/km

Largeur : *largeur de la rue, trottoir compris*
kilolumen : *somme des puissances lumineuses*
kilomètre : *longueur de la portion de rue*

2.6 Ne pas dépasser des valeurs plafond de consommation énergétique

Une consommation énergétique plafonnée, à l'année, et au km de voie, constitue une garantie de la maîtrise des émissions de lumière artificielle dans l'environnement nocturne.

Valeur cible : < 3000 kWh/km/an
Valeur limite : < 6000 kWh/km/an

Naturellement ces valeurs s'entendent pour la technologie actuellement disponible (Na-HP essentiellement). L'émergence d'une nouvelle technologie (LED) exigerà la révision à la baisse des valeurs proposées.

2.7 Diminuer le temps de fonctionnement des éclairages

- Éteindre les éclairages : lorsque cela ne met pas en cause la sécurité des usagers, il est conseillé de pratiquer l'extinction pendant une partie de la nuit en fonction des besoins de la commune.
- Réduire l'intensité lumineuse : lorsque, pour des raisons de sécurité, une extinction totale n'est pas possible, il est conseillé de réduire l'intensité lumineuse. Différents mécanismes permettent la réduction de l'intensité lumineuse : dimming, baisse de la tension avec ballasts électroniques, extinction d'un luminaire sur deux, etc.
- Utiliser des détecteurs de mouvements : La mise en place de modules électroniques de régulation et de variation de puissance horaires de zones à faible ou inconstante fréquentation par le public s'avère être une excellente solution d'un point de vue économique et environnemental⁶.
- Programmer l'allumage en fonction de la luminosité effective : l'allumage peut être contrôlé par une horloge astronomique qui prend en compte les variations de la durée du jour, ou par un capteur de luminosité qui permettra de déclencher l'allumage que lorsque la luminosité sera descendue en dessous d'une valeur seuil (15 lux par exemple) pendant un certain laps de temps (10 min par exemple).

⁶ Ces solutions ne sont actuellement variables qu'avec des lampes halogènes non économiques

2.8 Favoriser des sources d'électricité renouvelables

En tant qu'installation publique visible, l'éclairage des rues est un support privilégié pour la promotion des énergies renouvelables. Il est possible d'équiper les lampadaires avec de petits panneaux solaires ou bien des éoliennes qui pourront permettre une auto-alimentation en électricité. Attention il n'est cependant pas question de saisir l'opportunité des énergies renouvelables pour éclairer ce qui ne l'était pas avant ou d'éclairer plus ce qui l'était déjà.



III. Quels luminaires choisir ?

• Exemples de mauvais luminaires :

- Les abat-jours ronds sont à proscrire car une partie du faisceau lumineux se dirige vers le ciel.



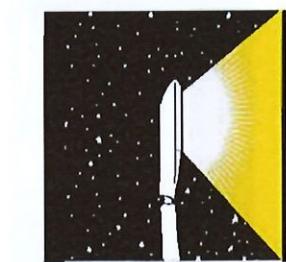
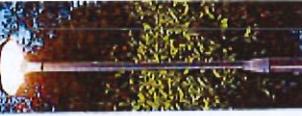
- Les encastrés de sol sont particulièrement perturbants pour la faune car le flux lumineux est directement dirigé vers le ciel. Ces encastrés sont à proscrire.



- L'orientation inadéquate des projecteurs est le principal problème constaté sur les zones industrielles. Leur impact sur l'environnement est très important



• Exemples de bons luminaires :



Éclairages routiers et de parkings :

Les lampadaires sont satisfaisant s'ils ont des vitres plates, transparentes et positionnées horizontalement. Il existe aussi de nouveaux éclairages routiers à faisceau plat, spécialement conçus pour réduire les nuisances lumineuses et diminuer les éblouissements sur route ; ils s'installent à moins d'un mètre du sol.

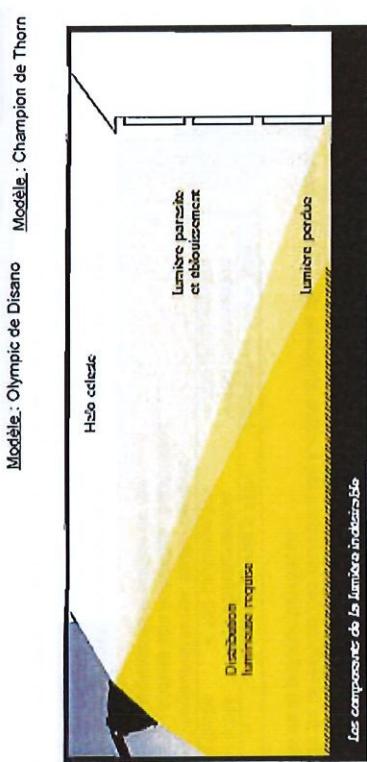
Des lampadaires avec des abat-jours plus adaptés sont disponibles en Nouvelle-Calédonie, en voici quelques exemples.



Modèle : Onus de Thom Caledone

Modèle : Futura de Disano

Modèle : Monza de Disano (produit à LED permettant un faisceau lumineux plus directionnel, donc un halo moins important)



Modèle : Champion de Thorn



Modèle : Champion de Thorn

Éclairages d'illuminations : jardins, espaces verts urbains, sentiers piétonniers ou cyclables :

Les encastrés de sol sont particulièrement perturbants pour la faune car le flux lumineux est directement dirigé vers le ciel. Pour ce type d'éclairage les installations de bornes ou d'éclairages orientés vers le sol, bas et peu diffus doivent être privilégiées.



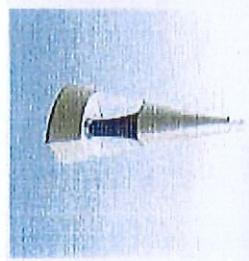
Modèles : Bormoval et 4655 de Thorn



Modèle : Faro et Musa de Disano



Modèle : Faro et Musa de Disano



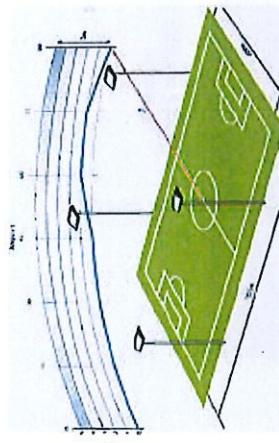
Modèle : Torgia de Disano



Modèle : Faro et Musa de Disano

Schéma d'installation sportive adaptée :

Une glace de protection horizontale avec point de visée de l'optique à 45° dans le luminaire offre de bons résultats : aucune pollution lumineuse horizontale et très peu de pollution au-delà des limites du terrain de sport à éclairer.



Éclairages résidentiels, de lotissements ou centres commerciaux :

Les bornes et les lampadaires munis de réflecteurs sont absolument à privilégier dans ce type d'aménagement.



Modèles : Musa de Disano (gauche)

et Pluno de Thorn (droite)



Plusieurs types d'éclairages sont nécessaires dans le cadre des aménagements des extérieurs de centres commerciaux. Ci-dessous quelques types d'éclairage permettant de réduire les pollutions lumineuses, disponibles en Nouvelle-Calédonie.



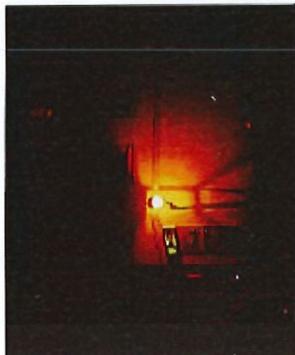
Modèles : Avenue Déco et Areaflood de Thorn



Modèle : Legend Modern de Thorn

Éclairages privés :

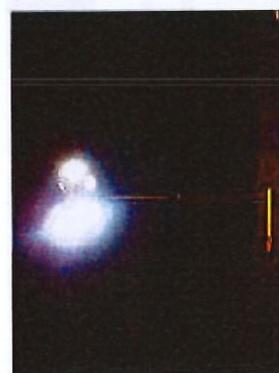
Les lanternes résidentielles sont d'usage courant. Malheureusement, leur flux lumineux dépasse généralement l'horizontale. Des éclairages plus adaptés peuvent être sélectionnés parmi ceux précédemment cités, comme le modèle Bilam et Plurio de Thom (partie « sentiers piétonniers » et « résidentiels, loisirsemens »).



Éclairages des sites industriels :

L'orientation inadéquate des projecteurs est le principal problème constaté sur les zones industrielles. Comme nous l'avons vu précédemment, des détecteurs de mouvements peuvent répondre à un impératif de sécurité. Ceux-ci permettent à la fois de réduire grandement la durée d'éclairage, tout en réalisant d'importantes économies d'énergie et financière. Les projecteurs amovibles ou les tours de lumière sont très puissants (jusqu'à 1500 Watts) : mal orientés, ils sont sources de pollutions et d'impacts très importants, notamment sur l'avifaune.

Il est fondamental d'orienter les faisceaux lumineux importants vers le sol. L'installation de détecteurs de mouvements peut réduire considérablement les impacts sur l'environnement et les consommations énergétiques, tout en répondant aux impératifs de sécurité sur site industriel ou sur mine.



Tour amovible sur une mine, photo de J. Mareschal

Résumé

La pollution lumineuse est un phénomène qui affecte de façon importante aussi bien la faune, la flore que l'Homme. Tout aménageur (public ou privé) est donc fortement encouragé à suivre ces recommandations dans le cadre de rénovations, réfections de l'existant et pour tout nouveau projet d'aménagement.

L'éclairage public est le premier poste de consommation d'électricité des communes, représentant près de la moitié de leurs consommations totales d'électricité. Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), nous pourrions économiser 30% de notre consommation actuelle, en ayant recours à des équipements moins énergivores. De plus le temps du retour sur investissement est généralement de moins de 2 ans ; puis les économies à long terme sont très intéressantes.

La réduction des dépenses énergétiques réalisée grâce à la mise en place de ce type d'éclairage permet donc de réaliser des économies financières non négligeables tout en conservant un éclairage de qualité nécessaire au bon fonctionnement des activités humaines.

L'installation d'éclairages respectueux de l'environnement représentent certes un investissement, mais s'avèrent plus rentables à long terme que ceux couramment utilisés d'un point de vue de la consommation électrique et d'un point de vue des impacts sur la biodiversité calédonienne ...

N'hésitez pas à vous renseigner auprès de votre fournisseur d'éclairages habituel pour connaître la liste de ses produits respectueux de l'environnement.

Et pour plus d'informations sur les pollutions lumineuses, leurs impacts et sur les moyens de lutte :

Société Calédonienne d'Ornithologie

Tel/Fax : +687 23-33-42

Mail : SCO@SCO.ASSO.NG

Site Web : www.sco-asso.ng

Blog : <http://SCO.Over-Blog.com>

Province Sud

Province Nord

Documentation :

- AFE (2006), Les nuisances dues à la lumière, guide 2006. 95 p (www.afe-ecolage.com.fr)
- MEEDAAD (2008), Projet de loi Grenelle de l'environnement : « Vers une reconnaissance de la pollution lumineuse ». 26 p : (www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Projet_loi_Grenelle_environnement.pdf & [article=27&f=14](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Projet_loi_Grenelle_environnement.pdf#page=27&f=14))
- Syndicat de l'éclairage, Isabelle Arnaud (2002), Eclairer Juste : éclairage public, routier, urbain, grands espaces, illuminations et cadre de vie, 4528. (www.syndicat-ecolage.com)

Sites internet spécialisés :

- Starry Nights Lights: www.starrynightslights.com
- Association Nationale pour le Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes (ANPCEN) www.anpcen.fr
- International Dark-Sky association : www.darksky.org