



**Résultats préliminaires
des tests
expérimentaux sur les
Équipements de
Protection Individuelle
(EPI) répulsifs à
impulsions électriques**



**Tests de fiabilité des EPI sur le
requin bouledogue et d'un banc
d'essai en mer pour les EPI**

Rapport Technique

Phase 3
Mars 2020

Avertissement

Ce document est à accès réservé.



Mots-clés : requin bouledogue, équipement de protection individuelle, électroréception, réduction du risque requin, EPI.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Centre Sécurité Requin (2020) – Projets innovants du Centre Sécurité Requin – Résultats des tests expérimentaux sur les équipements de Protection Individuelle de répulsion à impulsions électriques sur le requin bouledogue – Rapport technique de la phase 3.

© Centre Sécurité Requin, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du Centre Sécurité Requin de La Réunion.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	11
1.1.RAPPEL DES RESULTATS DES PHASES 1 ET 2	11
1.1.1.Phase 1	11
1.1.2.Phase 2	13
1.2.OBJECTIFS DE LA PHASE 3	14
2. TESTS D’EFFICACITE DES EPI SUR LES REQUINS BOULEDOGUE.....	16
2.1.METHODOLOGIE D’EXPERIMENTATION.....	16
2.1.1.Choix du site et partenariat international	16
2.1.2.Autorisations administratives	18
2.1.3.Principe expérimental	18
2.1.4.Appareils testés	19
2.1.5.Dispositif expérimental	26
2.1.6.Description du jeu de données expérimental.....	30
2.2.EVALUATION DE L’EFFICACITE DES EPI	30
2.2.1.Taux de réussite brut des tests de 15 minutes	31
2.2.2.Effet des EPI sur le comportement d’approche des requins.....	32
2.2.3.Conclusions préliminaires	36
2.3.EVALUATION DE L’EFFICACITE DU SURF+ MINI.....	36
2.3.1.Résultats des tests de 15 minutes	36
2.3.2.Effet du Surf Mini sur le comportement d’approche des requins	37
2.4.CONCLUSION ET SYNTHESE	39
3. MESURE DIRECTE DES CHAMPS ELECTRIQUES GENERES PAR LES EPI EN MER	43
3.1.DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	43

3.1.1. Principe de mesure.....	43
3.1.2. Site de mesure	45
3.2.RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	45
3.3.APPROCHE THEORIQUE.....	46
3.4.EVOLUTIONS DU DISPOSITIF.....	53
3.5.CONCLUSION ET SYNTHESE	53
4. REMERCIEMENTS	55
5. REFERENCES	56

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Site d'étude de l'expérimentation du Centre Sécurité Requin.	17
Figure 2.	E-Shark Force Swim unit utilisé pour les tests.	19
Figure 3.	NOSHARK Dive version utilisé pour les tests.	20
Figure 4.	FREEDOM+ Surf de Ocean Guardian. Boitier de puissance (gauche) ; électrode arrière (centre) ; électrode avant (droite).	22
Figure 5.	Shark Shield FREEDOM+ Surf SHORTBOARD de Océan Guardian - ; Boitier de puissance (gauche) ; emplacement des antennes sous la planche (droite).	23
Figure 6.	Système RPELA utilisé pour les tests.	24
Figure 7.	Boitier du Rpela version 2 - Haut : boitier de puissance avec électrode en aluminium sur sa partie droite de la photo - Bas : autocollant additionnel de l'électrode avant.	25
Figure 8.	Planche d'expérimentation avec l'emplacement des quatre dispositifs et de l'appât.	26
Figure 9.	Représentation schématique du dispositif expérimental déployé depuis le quai des pêcheurs à Nouméa (bait = appât).	28
Figure 10.	Nombre de succès et d'échecs en pourcentages pour l'ensemble des tests d'EPI et de la planche contrôle de 15min sur la période d'étude.	31
Figure 11.	Boîtes à moustaches présentant la distribution du nombre de passages de requins pendant les tests pour chaque EPI et la planche de contrôle. La barre centrale correspond à la médiane des données, et la boîte délimite le deuxième et le troisième quartiles. Les moustaches délimitent le premier et le quatrième quartiles.	33
Figure 12.	Boîtes à moustaches représentant la distribution du nombre de réactions de gênes visibles sur les requins bouledogue lors d'un passage proche de la planche de contrôle en fonction de l'activation d'un EPI ou pas. La barre centrale correspond à la médiane des données, et la boîte délimite le deuxième et le troisième quartiles. Les moustaches délimitent le premier et le quatrième quartiles.	34
Figure 13.	Nombre de réactions visibles en pourcentage par passage, par EPI	35

Figure 14. Nombre de succès et d'échecs en pourcentages pour le Surf Mini et de la planche contrôle de 15min sur la période d'étude.	37
Figure 15. Boîtes à moustaches présentant la distribution du nombre de passages de requins pendant les tests avec le Surf Mini et la planche contrôle. La barre centrale correspond à la médiane des données, et la boîte délimite le deuxième et le troisième quartiles. Les moustaches délimitent le premier et le quatrième quartiles.....	38
Figure 16. Boîtes à moustaches présentation de la distribution des réactions de gêne par les requins bouledogue lors d'un passage proche de la planche de test en présence du Surf Mini activité ou pas. La barre centrale correspond à la médiane des données, et la boîte délimite le deuxième et le troisième quartiles. Les moustaches délimitent le premier et le quatrième quartiles.....	39
Figure 17. Instrumentation du banc d'essai en mer.	44
Figure 18. Mesures du maximum du champ électrique produit par les EPI (E[V/m]) en fonction de la distance au centre des électrodes en mètre (SS : Shark Shield ; ESF : E-Shark Force).	45
Figure 19. Champ électrique théorique du Shark Shield dans le plan horizontal – courbe rouge = 1V/m ; courbe jaune = 10V.m ⁻¹	48
Figure 20. Calcul théorique du champ électrique pour chaque EPI avec (trait plein) ou sans (pointillés) prise en compte de la surface – Shark Shield : courbe bleue, Rpela : courbe verte, No Shark : courbe rouge, E-Shark Force : courbe violette – Points «+» : mesures réalisées avec le banc d'essai en mer.	49
Figure 21. Shark Shield – Champ électrique à la verticale du centre des électrodes et à la verticale d'une électrode – Courbe rouge : champ théorique à la verticale du centre, Courbe bleue : champ théorique à la verticale d'une électrode – Point «+» : mesures réalisées en mer – Point «o» : mesures réalisées en bassin.	50
Figure 22. Rpela – Champ électrique à la verticale du centre des électrodes et à la verticale d'une électrode – Courbe rouge : champ théorique à la verticale du centre, Courbe bleue : champ théorique à la verticale d'une électrode – Point «+» : mesures réalisées en mer – Point «o» : mesures réalisées en bassin.	50
Figure 23. No Shark – Champ électrique à la verticale du centre des électrodes et à la verticale d'une électrode – Courbe rouge : champ théorique à la verticale du centre, Courbe bleue : champ théorique à la verticale d'une électrode – Point «+» : mesures réalisées en mer – Point «o» : mesures réalisées en bassin.	51
Figure 24. E-Shark Force – Champ électrique à la verticale du centre des électrodes et à la verticale d'une électrode – Courbe rouge : champ théorique à la verticale du centre, Courbe bleue : champ théorique à la verticale d'une électrode – Point «+» : mesures réalisées en mer – Point «o» : mesures réalisées en bassin.	51

Figure 25. Champ électrique théorique des EPI à la verticale du centre des électrodes (courbes pleines) et à la verticale d'une électrode (courbes pointillées) – Points «+» : mesures réalisées en mer à la verticale du centre des électrodes – Shark Shield : bleu, Rpela : vert : No Shark : rouge, E-Shark Force : violet..... 52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Synthèse des résultats d'études indépendantes menées sur l'efficacité de répulsion de différents EPI sur le grand requin blanc (<i>Carcharodon carcharias</i>)	13
Tableau 2. Nombre total de réussites d'EPI - Période globale	31
Tableau 3. Nombre total de réussites et d'échecs du Surf Mini et de la planche contrôle	37



■ 1. INTRODUCTION

Dans l'inventaire des solutions existantes pour réduire le risque requin, la solution des Équipements de Protection Individuelle (EPI) connaît actuellement un essor avec plusieurs opérateurs industriels qui investissent le sujet à l'international.

La société Ocean Guardian a été la première à développer une solution technique pour les plongeurs et chasseurs sous-marins sous le nom de Shark Pod. Désormais, plusieurs opérateurs proposent des appareils de protection dont les stratégies de design, de protection, et de cible de marché peuvent être différentes.

Les EPI qui ont fait l'objet de cette étude regroupent les équipements qui émettent un champ électrique dans l'eau, sous forme d'impulsions. Cinq appareils ont été testés dans le cadre de cette étude qui s'est déroulée en plusieurs phases.

1.1. RAPPEL DES RÉSULTATS DES PHASES 1 ET 2

1.1.1. Phase 1

La première phase du projet a consisté à réaliser un état de l'art des connaissances existantes à l'échelle internationale sur les EPI et les études indépendantes réalisées pour tester l'efficacité des différents dispositifs. Cet état de l'art a été réalisé en 2017 et restitué auprès des usagers de la mer lors de 3 réunions publiques tenues à Saint-Gilles, Saint-Leu et Saint-Pierre en novembre et décembre 2017. En résumé, les éléments bibliographiques indiquent que le Shark Shield FREEDOM7 a démontré une réelle efficacité sur le grand requin blanc (*Carcharodon carcharias*), avec un taux d'interactions

avec des appâts qui diminue de 81% à 11% lorsque l'appareil est activé. Les études indiquent par ailleurs que même si l'effet répulsif est démontré, la distance de répulsion reste faible : entre 80 cm et 1 m (Kempster *et al.*, 2016). Des travaux antérieurs toujours centrés sur le Shark Shield FREEDOM7 ont montré que le champ électrique avait un effet limité lorsque l'appât était plus éloigné des électrodes (2 m de distance). Cependant, le dispositif était toujours capable d'empêcher les requins blancs d'attaquer un leurre tracté lorsque ces derniers utilisent leur technique de chasse verticale qui résulte d'un saut hors de l'eau aussi appelé « breach » (aucune percée de la surface de l'eau par un requin blanc lorsque le dispositif est actif en comparaison des 16 sauts hors de l'eau sans champ électrique (Huveneers *et al.*, 2013).

En 2018, pour la première fois, une étude (Huveneers *et al.*, 2018) a permis de comparer et tester plusieurs appareils (notamment FREEDOM+ SURF et RPELA-V1) dans des conditions identiques et contrôlées, toujours sur le grand requin blanc. Cette étude a permis de confirmer l'effet répulsif du Shark Shield dans sa version FREEDOM+ SURF adaptée aux surfeurs. En revanche, cette étude indique qu'aucun effet significatif n'a pu être mesuré sur le nombre d'interactions et de morsures de l'appât en présence du RPELA-V1. Cette information est importante à intégrer pour les détenteurs de cet appareil qui a été commercialisé à La Réunion jusqu'à la fin de l'année 2018.

En fin d'année 2018, la société RPELA a lancé une deuxième version de son appareil, et a mandaté un cabinet privé pour évaluer son nouvel EPI, le RPELA-V2 (Cardno., 2018). Cette étude, sortie en décembre 2018, semble démontrer cette fois la présence d'un effet mesurable et quantifiable de la diminution du nombre d'interactions en présence de l'appareil activé (la probabilité de morsure de l'appât diminuant de 75% à 25% lorsque l'appareil est activé).

En mars 2019, une nouvelle étude (Egeberg *et al.*, 2019) présente les résultats des tests réalisés du dispositif ESDS (Electronic Shark Defense System) sur le grand requin blanc. Ces résultats ont montré une efficacité limitée de l'appareil sur le comportement du grand requin blanc, sans réduction significative du nombre de requins interagissant avec l'appât en présence de l'appareil actif. Aujourd'hui, cet appareil ne semble plus commercialisé. Il a été remplacé par l'appareil No Shark, dont les caractéristiques techniques ont visiblement évolué.

Enfin, il convient de rappeler qu'à ce jour, aucune attaque de requin dans le monde n'a été recensée sur une personne équipée d'un dispositif EPI à champ électrique pulsé allumé, même si cette remarque doit être pondérée compte tenu de la faible

représentation statistique des personnes équipées d'EPI au regard du nombre d'attaques de requins dans le monde.

Tableau 1. Synthèse des résultats d'études indépendantes menées sur l'efficacité de répulsion de différents EPI sur le grand requin blanc (*Carcharodon carcharias*).

EPI	Résultats des tests	Références
Shark POD	Significatif*	Smit and Peddemors (2003)
Shark Shield FREEDOM7 (Leurre tracté)	Significatif*	Huveneers <i>et al.</i> (2013)
Shark Shield FREEDOM7	Significatif*	Kempster <i>et al.</i> (2016)
FREEDOM+ surf	Significatif*	Huveneers <i>et al.</i> (2018)
Rpela-V1, Sharkbanz bracelet, SharkBanz surf leash, Chillax Wax	Non significatif	Huveneers <i>et al.</i> (2018)
ESDS (Electronic Shark Defense System)	Non significatif	Egeberg <i>et al.</i> (2019)

* : Une diminution statistiquement significative du nombre de morsures de l'appât est observée quand l'EPI concerné est activé par rapport à la situation contrôle, sans EPI. **Le risque de morsure n'est cependant pas nul.**

1.1.2. Phase 2

La phase 2 du projet avait pour objectif la réalisation de tests *in-situ* pour analyser et comparer la structure des champs électriques générés par les appareils.

Les résultats de ces tests ont permis de montrer l'existence de stratégies très différentes entre les appareils pour repousser les requins (champs à polarité inversée, temps entre 2 impulsions, délai de recharge entre cycles...). Les principales conclusions permettent de confirmer la supériorité de l'appareil Shark Shield en termes de puissance des impulsions électriques : à 1 m du centre des électrodes, les impulsions des autres EPI correspondent à 36% (Rpela) et 18 % (No Shark) de l'amplitude des impulsions du Shark

Shield (Chateauminos *et al.* 2019). En d'autres termes, pour retrouver la tension du champ électrique produit par le Shark Shield à 1 m de distance ($\theta=90^\circ$), il faut s'approcher à environ 0,4 m du centre des électrodes pour les autres appareils (Rpela, No Shark, E-Shark Force). Ces considérations viennent confirmer les constats réalisés par Huveneers *et al.* (2018) concernant une différence notable d'efficacité entre les appareils Shark Shield et Rpela-V1 sur la répulsion du grand requin blanc. Les deux autres appareils (No Shark et E-Shark Force) n'ont jamais fait l'objet de tests *in situ* sur les requins.

Les tests réalisés en bassin sur les différentes versions des appareils RPELA montrent une évolution notable de cet appareil avec une augmentation de la tension et de la fréquence des impulsions entre les versions V1 et V2. Cette observation est par ailleurs corroborée par les essais positifs réalisés par le cabinet Cardno sur le RPELA-V2 en fin d'année 2018, semblant démontrer une certaine efficacité de cet appareil sur le grand requin blanc.

Enfin, les tests réalisés au Centre Sécurité Requin ont permis de constater un certain nombre de problèmes de fiabilité de certains appareils au fonctionnement erratique. Pour bien fonctionner et pouvoir être utilisés dans la durée, ces appareils nécessitent un entretien régulier (rinçage, nettoyage systématique des électrodes, etc.). Malgré cela, des pannes ou dysfonctionnements peuvent survenir.

Le rapport de cette phase est disponible sur le site internet du centre : http://www.info-requin.re/IMG/pdf/rapport_epi_-_cra_-_2019.pdf.

1.2. OBJECTIFS DE LA PHASE 3

La phase 3 du projet, objet du présent rapport, ambitionne de tester directement sur le requin bouledogue (*Carcharhinus leucas*) l'efficacité de cinq EPI en milieu naturel. Plusieurs auteurs ont déjà entrepris des expérimentations indépendantes d'efficacité des EPI, mais uniquement sur le grand requin blanc, principal responsable des attaques de requin dans le monde d'après le muséum de Floride qui gère le recensement mondial des attaques de requins (<https://www.floridamuseum.ufl.edu/shark-attacks/>).

Afin d'aboutir à un résultat rapide et garantissant des résultats robustes, les principes retenus pour la réalisation de la phase 3 s'appuient sur :

- Une collaboration internationale auprès des experts (Pr. Charlie Huveneers et Dr. Sasha Whitmarsh de l'Université de Flinders en Australie) reconnus dans le domaine afin d'adapter le protocole aux conditions de tests et à l'espèce de requin ciblée.
- Un choix de site propice avec une présence avérée et régulière de requins bouledogue, ainsi qu'un accès pratique du site pour le déploiement logistique. Dans un premier temps, les tests ont été réalisés à La Réunion, puis délocalisés devant la difficulté à obtenir des résultats localement après 9 mois de tests utilisant des systèmes de caméra sous-marine avec appâts (ou communément appelés BRUVs : Baited Remote Underwater Video system) : après plus de 500 heures d'observation sous-marine, seulement 3 requins bouledogue ont été observés.

Ces premières expériences réalisées à La Réunion ont toutefois permis de développer des méthodes et des outils méthodologiques permettant de préparer une mission à l'international. Les sites potentiels d'expérimentation identifiés ont été l'Afrique du Sud, le Mozambique, et la Nouvelle-Calédonie.

C'est finalement le site de Nouméa en Nouvelle-Calédonie qui proposait les meilleures conditions de réussite pour la mission, avec un délai plus court de réalisation en raison d'une présence qui semble être régulière toute l'année sans certitude toutefois des requins bouledogue sur site, contrairement au Mozambique ou l'Afrique du Sud qui présentaient une forte saisonnalité de la présence des animaux sur les sites pouvant accueillir l'expérimentation.

C'est dans ce contexte que s'est organisée et réalisée la mission de la phase 3 du projet, du 2 au 28 septembre 2019 à Nouméa, sur le site du quai des pêcheurs de Nouville.

Cette mission a permis la réalisation (i) des tests de fiabilisation des EPI sur les requins bouledogue, ainsi que (ii) les essais du banc d'essai des EPI en mer.



2. TESTS D'EFFICACITÉ DES EPI SUR LES REQUINS BOULEDOGUE

2.1. MÉTHODOLOGIE D'EXPÉRIMENTATION

2.1.1. Choix du site et partenariat international

Le site d'expérimentation finalement choisi par le Centre Sécurité Requin est le quai des pêcheurs sur le port de Nouville à Nouméa, en Nouvelle-Calédonie.

Ce site a été identifié comme rassemblant tous les paramètres permettant la réussite de la mission :

- La présence avérée des requins bouledogue.
- L'existence d'un programme d'amélioration des connaissances sur l'écologie du requin porté par les institutions locales et mis en œuvre par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) qui atteste également de la présence des requins sur site, et permet d'accéder à des informations sur leurs comportements.
- La présence d'un quai sur pieux permettant de déployer facilement l'expérimentation, et sans moyen nautique.

Le site se trouve sur le port de Nouville au niveau du quai des pêcheurs (**Figure 1**).

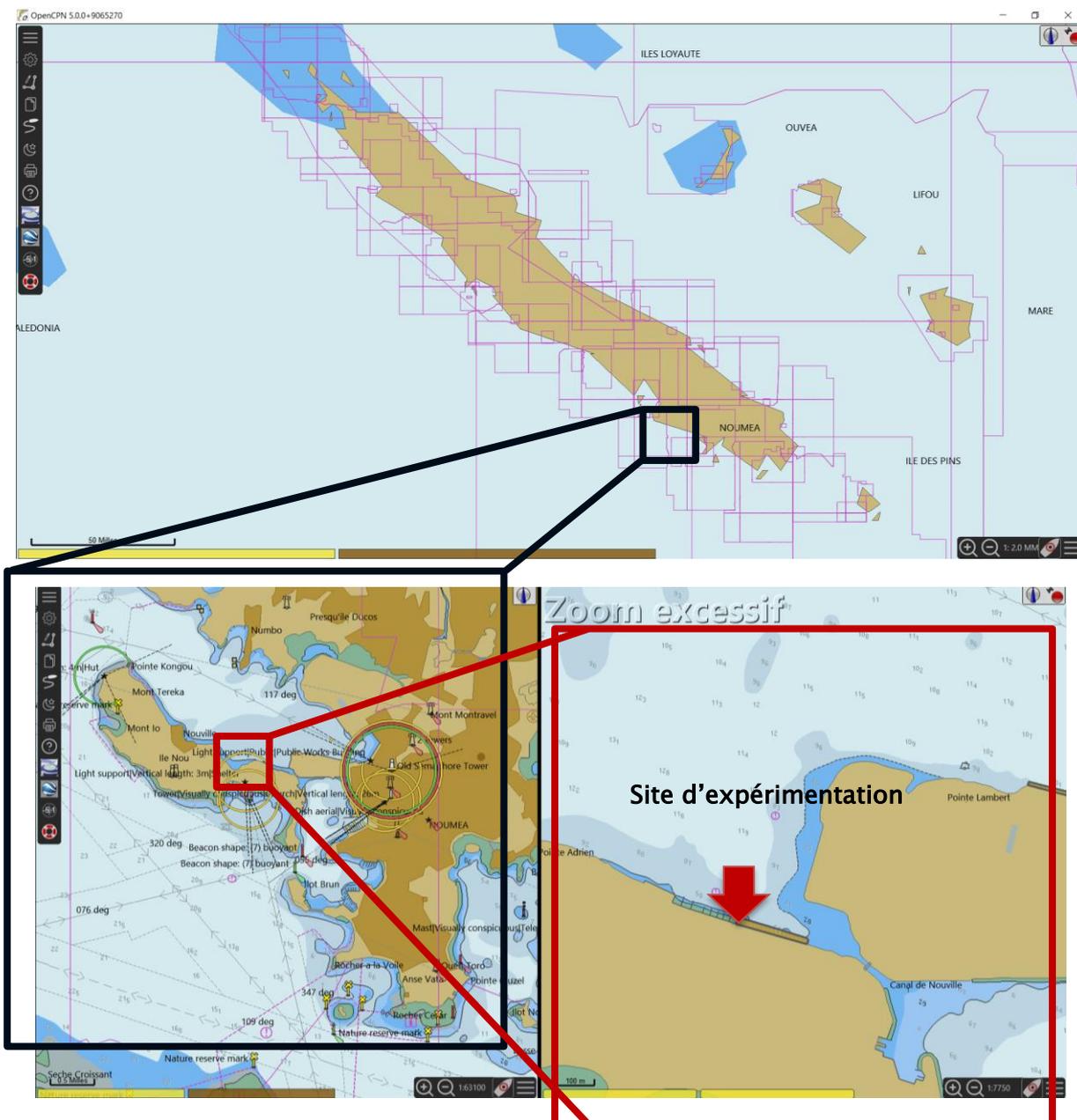


Figure 1. Site d'étude de l'expérimentation du Centre Sécurité Requin.

C'est un site réputé pour la présence à priori régulière de requins bouledogue. Les bateaux palangriers de pêche thonière y débarquent régulièrement leurs cargaisons. Ce site fait l'objet d'une réglementation spécifique : il y est interdit de nourrir les requins ou de jeter des déchets organiques dans la mer.

Ce site a par ailleurs été équipé d'un récepteur acoustique par l'IRD en 2018. Ce récepteur fait partie d'un réseau de récepteurs répartis sur l'ensemble de la commune de Nouméa et ces environs. Depuis décembre 2018, 5 requins bouledogue ont été marqués devant le quai des pêcheurs, équipés d'une balise acoustique par l'IRD, puis

relâchés au large. L'analyse préliminaire des 6 premiers mois de données réalisée par l'IRD confirme la fréquence très régulière des requins bouledogue sur le site de Nouville. La station acoustique de Nouville y enregistre le plus grand nombre de détections du réseau d'écoute.

2.1.2. Autorisations administratives

Pour l'organisation de cette mission, le Centre Sécurité Requin s'est rapproché des autorités locales afin d'obtenir les autorisations d'intervention nécessaires. La Province Sud et la ville de Nouméa ont été les principaux interlocuteurs et ont accueilli avec intérêt la démarche du Centre, permettant ainsi d'initier une collaboration plus large sur la gestion du risque requin. Dans ce partenariat la Direction de la Sécurité Civile et de la Gestion du Risque (DSCGR), la Direction des Affaires maritimes (DAM) et le Port Autonome de Nouvelle-Calédonie (PANC) ont également été sollicités et donné leur accord pour la réalisation de ces tests.

Un arrêté portant autorisation de perturbation intentionnelle de requins a été délivré le 23 août 2019 par la Province Sud (Arrêté numéro 2844-2019/ARR/DENV), autorisant les équipes du Centre à mener des expérimentations sur plusieurs appareils répulsifs anti-requins émettant un champ électrique dans l'eau.

2.1.3. Principe expérimental

Le principe expérimental du test consiste à mesurer les modifications du comportement du ou des requins présents sur le site d'étude en présence ou non d'un champ électrique pulsé généré par l'un des appareils faisant partie du test, et en présence d'un appât.

Afin de tester le comportement des animaux, ils sont mis en présence d'un stimulus les incitant à s'approcher au maximum de l'appareil testé, la présence du champ électrique étant censée avoir un effet répulsif.

Afin de renforcer le crédit de l'expérimentation, le stimulus retenu pour cette expérience est une sardine (*Sardina pilchardus*) standardisée de 20 cm de long pour un poids d'environ 50 g. Le stimulus utilisé propose donc une récompense alimentaire pour les requins présents ayant réussi à l'attraper. Cette récompense permet de conserver une motivation constante pour les requins, gage de continuité comportementale pendant la durée des tests (trois à quatre semaines en tout). Par ailleurs, la petite taille des appâts utilisés permet de garantir une modification négligeable de l'état de satiété des requins au cours d'une même journée de test. Pour pouvoir travailler de façon détaillée sur l'ensemble des tests réalisés, ceux-ci sont tous filmés, utilisant des caméras sous-marines et de surface.

2.1.4. Appareils testés

Dans le cadre de cette expérimentation, cinq dispositifs répulsifs ont fait l'objet de tests :

- Le E-Shark Force.
- Le No Shark.
- Le Rpela, dans sa nouvelle version de 2019 (V2).
- Le Ocean Guardian Shark Shield FREEDOM+ SURF (qui sera appelé « Shark Shield » par commodité dans la suite).
- Le Ocean Guardian Shark Shield FREEDOM+ Surf SHORTBOARD (qui sera appelé « Shark Shield Surf Mini » par commodité dans la suite).
- La planche contrôle (qui sera référencé « control » dans les graphiques et les tableaux d'analyses par commodité dans la suite).

Tous ces appareils sont des équipements de Protection Individuelle (EPI). Les chapitres suivants présentent brièvement chacun des appareils.

Les prix sont mis à titre indicatif et peuvent évoluer au cours du temps ou du revendeur.

2.1.4.1 *E-Shark Force*

Le E-Shark Force est le dernier modèle du dispositif électronique de répulsion que Monsieur Wilson Vinano a inventé à Hawaii en 2005. E-Shark Force est destiné aux plongeurs, surfeurs, nageurs et Stand Up paddlers.

Site internet : <http://www.e-sharkforce.com/>

Le Centre Sécurité Requin a échangé avec Monsieur Wilson Vinano (CEO et Président) et Madame Amanda Toy (Directrice des opérations). La société a envoyé 2 E-Shark Force Swim Units à La Réunion pour les tests de répulsion.



Figure 2. E-Shark Force Swim unit utilisé pour les tests.

Le boîtier E-Shark Force est fermé par une plaque étanche boulonnée. Le chargement de la batterie s'effectue par induction à l'aide d'une plateforme circulaire sur laquelle est posé l'appareil, ce qui permet d'éviter les problèmes d'étanchéité.

Le E-Shark Force « Swim unit » présente deux électrodes de forme carrée espacées l'une de l'autre de 13 cm. La surface de chacune des électrodes est de 6,8 cm². Les électrodes sont réalisées en fil conducteur entortillé sur lui-même, aplati et compacté en forme de parallélépipède. Il s'agit peut-être d'un moyen permettant d'augmenter la surface d'échange du conducteur avec le milieu.

Cet appareil s'accrochant à la cheville, il s'adapte à un public large d'utilisateurs de la mer : baigneurs, surfeurs, plongeurs, bodyboarders...

Dans le cadre de la présente étude, c'est le E-Shark Force modèle « Swim unit » qui a fait l'objet des tests. À notre connaissance, ces appareils sont peu connus et peu utilisés sur l'île de La Réunion.

Le produit est vendu 365 US\$ (environ 335€) sur le site internet, hors frais de port.

2.1.4.2 *NO SHARK*

Le No Shark est un dispositif de bracelet qui présente deux électrodes insérées dans l'anneau de serrage.

Le produit est vendu en ligne sur le site internet : <http://www.noshark.com/>

Il existe deux versions du No Shark : la première en simple bracelet le « Dive » version, la seconde avec un leash permettant de s'attacher à la planche de surf.



Figure 3. NOSHARK Dive version utilisé pour les tests.

Le No Shark présente deux électrodes de forme carrée, espacées l'une de l'autre de 12 cm. La surface de chacune des électrodes est de 7,3 cm².

Le boîtier est en plastique et scellé. Un fil électrique sort du boîtier et permet d'assurer la connexion du dispositif avec la batterie interne (via un autre fil pénétrant dans le boîtier) ou le chargeur externe.

Le produit est vendu 399 US\$ (environ 369 €) sur le site internet, hors frais de port, dans sa version « plongée » (dive version), et 449 US\$ (environ 415 €) dans sa version « surf » (avec leash intégré). Les deux modèles se différencient par leur profondeur limite d'immersion.

■ SPÉCIFICATIONS CONSTRUCTEUR

- Dimensions de l'unité (boîtier uniquement) : 25 mm L x 50 mm W x 50 mm H
- Profondeur maximale d'utilisation : 60m
- Poids de l'unité : 200 g (boîtier)
- Durée de fonctionnement des batteries : 5 à 6,5 heures (selon température)
- Durée de chargement de la batterie : 7 heures pour une batterie neuve qui varie selon le nombre d'utilisations

2.1.4.3 *OCEAN GUARDIAN SHARK SHIELD®TECHNOLOGIE*

L'entreprise OCEAN GUARDIAN commercialise une gamme de produits de répulsion électrique avec des modèles conçus pour la plongée, la natation et le surf.

Le premier dispositif a été créé sous le nom de Shark Pod en 1990 par le Centre d'excellence maritime du Kwazulu Natal Sharks Board (KZNSB) en Afrique du Sud, puis a été développé par une compagnie australienne SeaChange Technology et commercialisé par la société Shark Shield en octobre 2006, devenue la société Ocean Guardian aujourd'hui.

Les appareils commercialisés s'appuient sur la technologie Shark Shield. La société commercialise ses produits sur le site internet suivant : <https://ocean-guardian.com/>

• 2.1.4.3.1 FREEDOM+ Surf

Le FREEDOM+ Surf est une version « surf » du dispositif. Le boîtier de puissance est fixé sur le dessus de la planche, sous la talonnette sous le pad arrière du surf (à l'arrière du grip sous le kick). Les électrodes se présentent sous la forme d'autocollants intégrant

des couches conductrices qui permettent d'acheminer le courant jusqu'aux deux électrodes positionnées sous la planche de surf, à l'avant et à l'arrière.

Le dispositif peut s'installer sur n'importe quelle planche de surf de taille suffisante 6'6 et plus, en modifiant légèrement le pad arrière (redécoupe) et en collant les éléments (boîtiers + électrodes). Un kit (chargeur + antenne) permettant d'équiper une deuxième planche est également commercialisé. Les antennes sont également disponibles de façon à ce que l'utilisateur puisse équiper l'ensemble de son quiver (plusieurs planches). Le boîtier de puissance peut ainsi être utilisé sur une ou l'autre des planches équipées.



Figure 4. FREEDOM+ Surf de Ocean Guardian. Boîtier de puissance (gauche) ; électrode arrière (centre) ; électrode avant (droite).

■ SPÉCIFICATIONS CONSTRUCTEUR

- Nombre de cycle nominal de charge de batterie : 1 000 charges
- Température de stockage : 0°C – 60°C
- Température d'utilisation entre 12°C – 40°C. Une température plus basse réduit la durée d'utilisation des batteries
- Dimensions de l'unité (sans l'antenne) : 208mm L x 28mm W x 63mm H
- Profondeur maximale d'utilisation : 50m
- Poids de l'unité : 250 g (boîtier) + 225g (antenne et support)
- Durée de fonctionnement batteries : 5 à 6 heures (selon température)
- Champ électrique annoncé : supérieur à 1V/m à 1m du centre des électrodes

■ PRIX DE VENTE

L'appareil est vendu 499 US\$ (environ 460 €) hors frais de port sur le site internet du fabricant. Une subvention de 200 AUS\$ (environ 122 €) est accordée par l'Etat du Western Australia pour ses citoyens résidents. Le kit d'équipement d'une seconde planche est vendu 149 US\$ (environ 135 €).

• 2.1.4.3.2 FREEDOM+ Surf SHORTBOARD

Le Shark Shield FREEDOM+ Surf SHORTBOARD est une déclinaison du FREEDOM+ Surf proposant une antenne plus courte, avec des électrodes plus petites. Seul le boîtier de puissance reste identique avec le Shark Shield FREEDOM+ Surf.

En raison de son antenne plus courte, ce produit se destine à des planches plus petites généralement inférieures à 6'.

La surface des électrodes est de 20 cm². La distance entre les électrodes est de 40 cm.



Figure 5. Shark Shield FREEDOM+ Surf SHORTBOARD de Océan Guardian ; Boîtier de puissance (gauche) ; emplacement des antennes sous la planche (droite).

■ PRIX DE VENTE

L'appareil est vendu 479 US\$ (environ 440 €) hors frais de port sur le site internet du fabricant.

2.1.4.4 *RPELA*

Le Rpela, anciennement appelé Surf Safe, est un système positionné sous la planche de surf. Le boîtier de puissance se positionne dans un insert incrusté dans la carène du surf, à l'arrière. Il fait également office d'électrode. La deuxième électrode est positionnée elle aussi sous la carène, mais à l'avant du surf. Un fil conducteur relie l'électrode avant et le boîtier arrière.

Le produit est commercialisé sur le site internet : <https://www.rpela.com/>

Pour être installé, ce système requiert l'intervention d'un shaper, ou d'un minimum de savoir-faire afin de modifier la planche pour :

- Installer l'insert du boîtier de puissance.
- Installer l'électrode sous la carène à l'avant du surf.
- Installer le fil conducteur entre le boîtier et l'électrode avant.

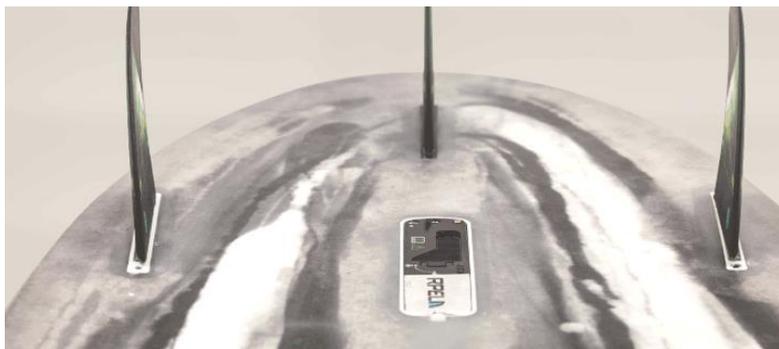


Figure 6. Système RPELA utilisé pour les tests.

Une fois ces éléments installés sur la planche, le boîtier de puissance RPELA peut être installé et enlevé facilement et manuellement, grâce à un système de goupille. Il peut ainsi être enlevé en fin d'utilisation pour l'entretien du dispositif et pour recharger la batterie. À noter qu'un kit permet d'équiper une deuxième planche de surf, les deux planches pouvant alors être utilisées avec le même appareil, au choix de l'utilisateur.

Depuis décembre 2018, une nouvelle version du RPELA est commercialisée : RPELA version 2. Celle-ci présente les améliorations suivantes par rapport à la version précédente :

- Électrode du boîtier élargie grâce à un film aluminium rectangulaire.

- Autocollant additionnel permettant d'étendre la surface de l'électrode avant.
- La fréquence et la durée des impulsions électriques ont également été modifiées d'après le constructeur.



Figure 7. Boîtier du Rpela version 2 – Haut : boîtier de puissance avec électrode en aluminium sur sa partie droite de la photo – Bas : autocollant additionnel de l'électrode avant.

■ SPÉCIFICATIONS CONSTRUCTEUR

- Dimensions de l'unité : 147 mm L x 36 mm W x 19 mm H
- Poids 155 g
- Capacité de la batterie : 1800 mA
- Temps de charge : 3,5 h
- Autonomie : 6,5 h
- Voltage : 200 V
- Fréquence : 9,5 Hz
- Poids de l'insert Rpela : 56 g

■ PRIX DE VENTE

L'appareil est vendu 495 AU\$ (environ 305 €) sur le site internet du fabricant, hors frais de port. Le kit d'équipement d'une deuxième planche est vendu 55 AU\$ (environ 35€). L'installation réalisée par un shaper coûte entre 100 et 150 €.

2.1.4.5 *Appareils de protection retenus et priorisation des tests*

Pour des raisons de priorisation des tests, la mission a consisté dans un premier temps à réaliser les tests des appareils suivants :

- E-Shark Force
- No Shark
- Shark Shield FREEDOM+ Surf
- Rpela V2

Ces appareils ont été testés du 07 au 26 septembre 2019 avec le dispositif décrit dans le chapitre suivant.

Le Shark Shield FREEDOM+ Surf SHORTBOARD a été testé du 18 au 26 septembre 2019 en même temps qu'un autre appareil, le Ocean Guardian BOAT01, qui n'a pas pu finalement être analysé en raison de problèmes de fiabilité. Le problème a été identifié depuis par le fabricant et semblait provenir d'un dysfonctionnement de l'émetteur de la bouée répulsive.

2.1.5. **Dispositif expérimental**

Les quatre appareils du test sont fixés sur une planche d'expérimentation dont l'aspect visuel restera identique pendant toute la durée des tests. Les quatre appareils sont montés sur une planche en polyméthacrylate de méthyle (PMMA), de couleur blanche et de dimension 130 cm x 33 cm.



Figure 8. Planche d'expérimentation avec l'emplacement des quatre dispositifs et de l'appât.

Sur les quatre appareils, un seul sera en fonctionnement pendant la réalisation d'un test. Les autres appareils seront bien présents, mais inactifs : soit remplacés par des appareils factices (E-Shark Force, No Shark et Rpela), soit éteints (pour le Shark Shield qui dispose d'un interrupteur).

La seule différence visuelle qu'il peut y avoir entre un appareil allumé et éteint, à l'exception de l'émission du champ électrique de ce dernier, est peut-être l'émission d'un clignotement lumineux indiquant le fonctionnement de l'appareil. Compte tenu de la luminosité ambiante lors des tests, et de la petite taille de ces diodes, l'effet de la présence ou non de la diode lumineuse est considéré comme non significatif sur le comportement des requins.

Lors des tests de contrôle, tous les appareils sont inactifs (factices ou éteints).

Les tests se réalisent depuis un quai sur pieux. La planche expérimentale est déployée à la surface de l'eau et est maintenue par un bout. Un appât (une sardine) a été préalablement fixé au centre de la planche expérimentale, à une distance de 30 cm de cette dernière (distance de la tête de la sardine à la planche).

Trois caméras sont positionnées pour filmer la scène.

- Cam1 et Cam2 : ces deux caméras sont fixées sur une perche télescopique permettant, via le traitement des images avec le logiciel SeaGIS EventMeasure, de reconstituer la scène en trois dimensions par principe stéréoscopique. Ce dispositif permet notamment d'accéder à des informations telles que l'identification des spécimens présents (sexe, marques externes, tailles) et la distance des requins par rapport à l'appât. Cette analyse plus approfondie de la mesure des distances est en cours de traitement et les résultats seront communiqués courant 2020.
- Cam3 : cette caméra filme la scène par le haut et permet d'avoir une vue aérienne.

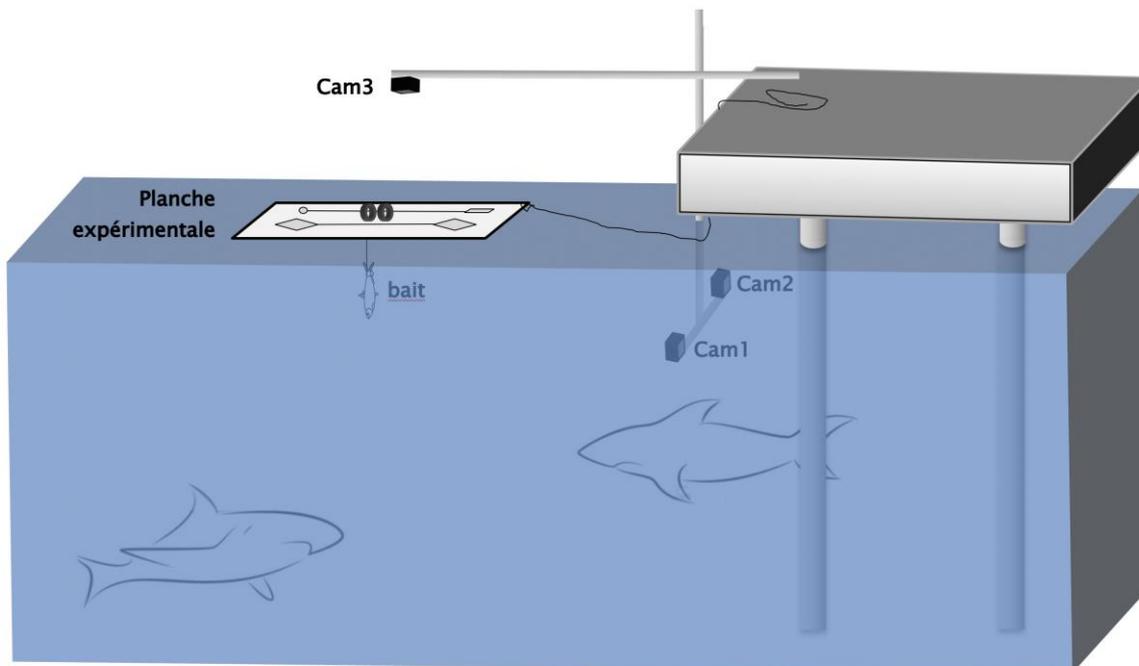


Figure 9. Représentation schématique du dispositif expérimental déployé depuis le quai des pêcheurs à Nouméa (bait = appât).

2.1.5.1 *Protocole de réalisation d'un test*

Un test permet d'analyser le fonctionnement d'un seul appareil à la fois (un seul appareil allumé, tous les autres inactifs) ou bien de tester la planche contrôle (tous les appareils inactifs). La planche est positionnée sur l'eau devant le quai, après avoir vérifié la présence de requins, et après y avoir fixé une sardine à 30 cm du milieu des électrodes.

Une fois la planche expérimentale positionnée et stabilisée, le test débute pour une durée maximale de 15 minutes, suivant le protocole de Huveneers *et al.* (2018) utilisé lors des tests EPI sur le grand requin blanc aux îles Neptune en Australie.

Pendant le test, tous les passages de requin sont notifiés dans un carnet de terrain. Chaque passage de requin fait l'objet d'une prise de notes. Un passage de requin consiste à voir un requin passer dans le champ expérimental, avec une trajectoire quelconque. Si un requin fait demi-tour, puis revient vers la planche expérimentale, deux passages seront enregistrés.

Les informations suivantes sont notées pour chaque passage :

- **Niveau d'intention :** noté « High », « Medium » ou « Low ». Ce critère permet d'évaluer le niveau d'intention du requin au moment de l'approche de l'appât.
 - « High » qualifie un requin allant manifestement vers l'appât pour le prendre.

- « Medium » qualifie un requin s'approchant de l'appât avec intérêt, comme pour l'observer.
- « Low » qualifie un requin passant dans la zone sans intérêt notable pour l'appât.
- **Distance** : distance minimale entre le requin et l'appât lors du passage estimé par l'opérateur lors de l'expérimentation.
- **Réaction** : présence d'une réaction visible du requin observé par l'opérateur en lien avec la présence du champ électrique (spasme, mouvement brusque de la tête, apparition de la membrane nictitante...).
- **Identité du requin** : le requin est identifié lorsque cela est possible (marque apparente ou signe distinctif visible).
- **Le timecode** : heure de l'observation.

Le test s'arrête si un échec se produit. L'**échec** est défini par le fait que la planche ou l'appât sont touchés ou mordus par un requin avant la fin des 15 minutes du test. À l'inverse, si ni la planche ni l'appât ne sont touchés ou mordus durant la période de 15 minutes alors le test est réussi (**succès**).

Pour rappel, les analyses de ce rapport sont fondées sur les distances estimées par les opérateurs depuis le quai. Une analyse approfondie des résultats est en cours afin de mesurer plus précisément ces distances grâce au logiciel SeaGIS EventMeasure.

L'analyse en cours des vidéos sous-marines permettra d'estimer plus précisément le nombre de réactions, l'identité des requins observés et préciser leur réaction en présence d'un champ électrique.

2.1.5.2 *Protocole de réalisation d'une série*

Une série consiste à réaliser cinq tests consécutifs permettant d'évaluer les quatre appareils EPI et la planche de contrôle. L'ordre de passage a été tiré aléatoirement pour l'ensemble des séries, au préalable de la mission.

Une procédure de stimulation complémentaire permet de maintenir les requins dans un état d'intérêt constant vis-à-vis de la zone d'expérimentation. Les stimuli utilisés sont de deux sortes :

- Utilisation d'un stimulus acoustique : en lançant énergiquement une boîte en PVC percée dans l'eau pour simuler la chute d'un objet en surface. Cette stimulation permet de faire remonter les requins vers la surface, attirés par le bruit et les vibrations. Ils n'ont pas de récompense.

- Utilisation de morceaux de sardines complémentaires jetés sur le site d'étude. Outre le bruit des morceaux de sardines tombant dans l'eau, ces derniers diffusent une forte odeur attirant les requins vers la planche d'expérimentation. Lorsque les requins montent vers la surface pour attraper les morceaux de sardine, ils sont récompensés.

Ces deux types de stimuli sont utilisés de façon régulière pour maintenir les requins dans la zone et en état d'intérêt pour l'expérimentation. En moyenne sur la période d'expérimentation, 1 à 1,5 sardines ont été distribuées en stimuli olfactifs avec récompense, et 5 à 6 stimuli acoustiques ont été utilisés pour chaque test de 15 minutes.

Il est donc important de noter que les tests ont été réalisés dans un contexte de fortes stimulations olfactives et acoustiques.

2.1.6. Description du jeu de données expérimental

2.1.6.1 *Volume du jeu de données*

Les tests ont été réalisés entre le 7 et le 26 septembre 2019, de façon ininterrompue, à l'exception de la journée du 15 septembre 2019 qui a été dévolue à la réalisation des tests du bassin d'essai mobile en mer.

Au total, 81 séries et 402 tests d'appareils ont été réalisés durant les 18 jours d'expérimentation. Le premier jour ayant été considéré comme une journée de calage méthodologique, les données qui en sont issues ont été écartées de la base de données finale (séries 1 à 6) destinée à l'analyse des résultats.

Au cours de ces 18 jours, 3 551 passages de requin ont été observés et analysés.

2.2. ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ DES EPI

L'efficacité des EPI peut être regardée au travers de plusieurs critères quantitatifs et objectifs.

2.2.1. Taux de réussite brut des tests de 15 minutes

La fin d'un test de 15 minutes ne peut s'interrompre que pour trois raisons différentes :

1. L'appât a été mordu ou touché : échec.
2. La planche a été mordu ou touchée : échec.
3. 15 minutes se sont déroulées sans que 1. ou 2. ne se soit réalisé : succès.

La Figure 10 et le Tableau 2 présentent les résultats bruts des tests réalisés sur les quatre EPI et sur la planche de contrôle.

Tableau 2. Nombre total de réussites d'EPI – Période globale

	Control	E-Shark Force	No Shark	Rpela	Shark Shield
Succès	2	3	8	14	33
Echec	71	71	67	58	41

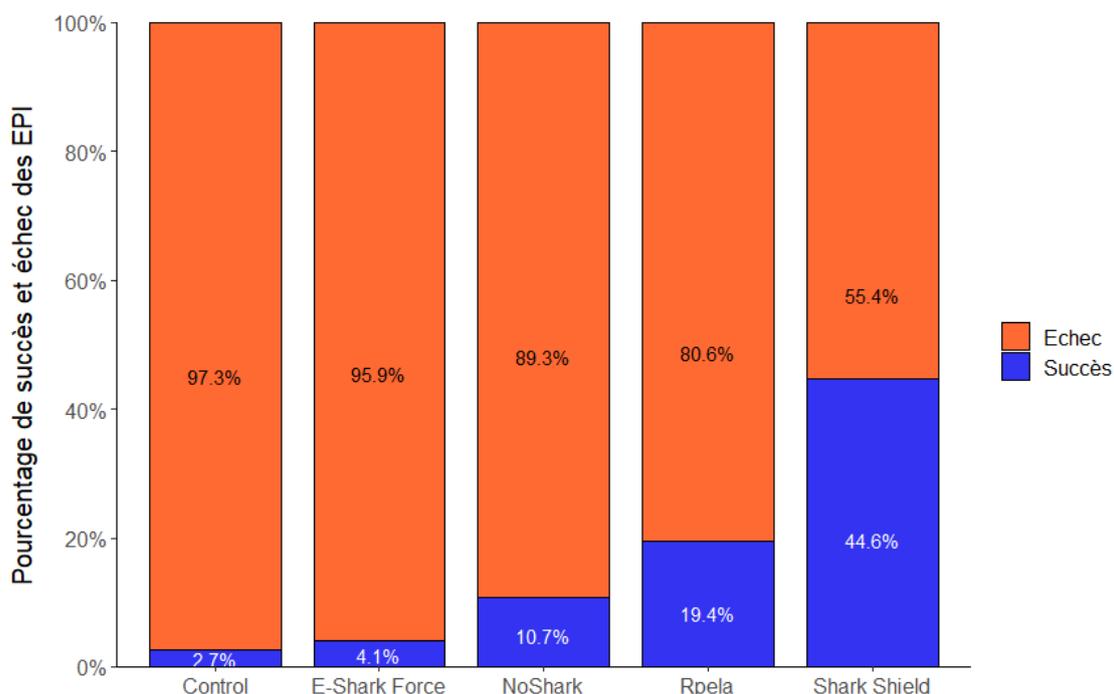


Figure 10. Nombre de succès et d'échecs en pourcentages pour l'ensemble des tests d'EPI et de la planche contrôle de 15 min sur la période d'étude.

Le pourcentage de succès varie de 2,7% pour le test sans EPI activé (contrôle, $n = 73$) à 44,6% pour le Shark Shield ($n = 74$). Pour les trois autres EPI, le pourcentage de succès est inférieur à 20% pour un nombre de tests compris entre 72 et 75. Il y a une différence statistique significative entre les taux de succès de la planche contrôle et des EPI (test de Fisher, $p < 0,05$).

Cependant tous les EPI ne présentent pas la même efficacité. En effet, aucune différence statistique n'est observée dans le taux de succès entre le contrôle et l'E-Shark Force ($n = 74$) ou le No Shark ($n = 75$; test de Fisher, $p > 0,05$). En revanche, le taux de succès du Rpela ($n = 72$) et du Shark Shield sont significativement supérieurs au contrôle (test de Fisher, $p < 0,05$). Le Shark Shield a également un taux de succès significativement supérieur au Rpela ($X^2_{(4, 146)} = 9,45$, $p < 0,05$).

L'analyse statistique indique que seuls les appareils Rpela et Shark Shield présentent une efficacité statistiquement supérieure à la planche contrôle pour repousser les requins bouledogue du port de Nouméa sur une période de quinze minutes. L'analyse montre également que le Shark Shield est significativement plus efficace que le Rpela dans son rôle de répulsif dans les mêmes conditions expérimentales.

2.2.2. Effet des EPI sur le comportement d'approche des requins

La Figure 11 permet de montrer l'effet de l'utilisation des EPI sur le nombre de passages de requins pour chaque appareil, pendant les tests de 15 minutes. Seuls les passages de requin sont considérés ici, c'est-à-dire les passages ne se terminant pas par un échec (planche et appât ni touchés ni mordus).

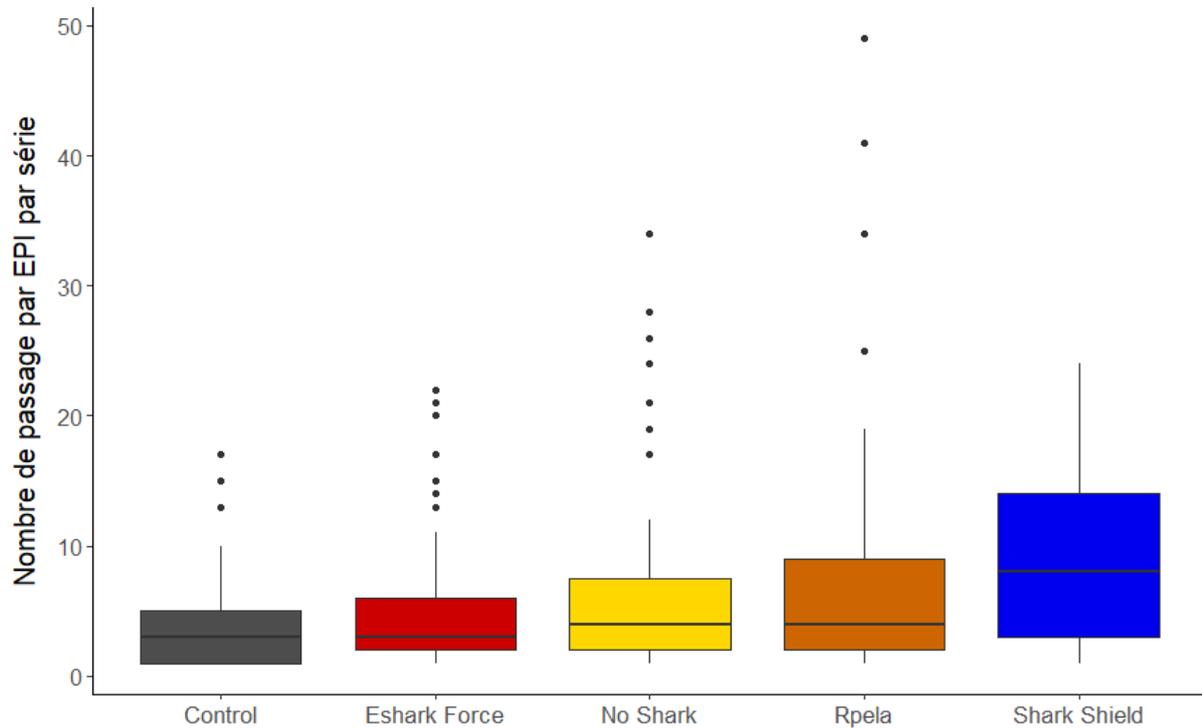


Figure 11. Boîtes à moustaches présentant la distribution du nombre de passages de requins pendant les tests pour chaque EPI et la planche de contrôle. La barre centrale correspond à la médiane des données, et la boîte délimite le deuxième et le troisième quartiles. Les moustaches délimitent le premier et le quatrième quartiles.

Un test de Kruskal–Wallis révèle une différence significative globale dans la distribution statistique des passages de requin à proximité du dispositif expérimental entre la planche contrôle et les EPI ($H_{(4, 368)} = 37,92, p < 0,05$). Un test post-Hoc de Dunn révèle qu’il y a significativement plus de passages avec le No Shark ($p < 0,05$), le Rpela ($p < 0,05$), et le Shark Shield ($p < 0,05$) que lorsqu’aucun EPI n’est activé (planche contrôle). Il y a également significativement plus de passages sans contact avec la planche ou l’appât avec le Shark Shield qu’avec tous les autres EPI (test de Dunn, $p < 0,05$). En revanche, l’activation du E-Shark Force ne semble pas conduire à statistiquement plus de passages que la planche contrôle.

Cette augmentation du nombre de passages quand les EPI sont actifs ne veut pas dire que les EPIs attirent plus de requins. Au contraire, l’augmentation du nombre de passages de requins est une conséquence de l’efficacité répulsive des appareils : le requin est repoussé et revient plusieurs fois vers la planche pour attraper l’appât par essais successifs.

En conséquence, plus le nombre de passages est élevé, plus l'EPI peut être considéré comme efficace. On peut ainsi considérer que tous les passages supplémentaires qu'on constate avec un EPI (en comparaison de la planche contrôle), sont des passages de requin pour lesquels l'EPI a joué un rôle de dissuasion supplémentaire par rapport à l'effet dissuasif naturel d'une planche non équipée.

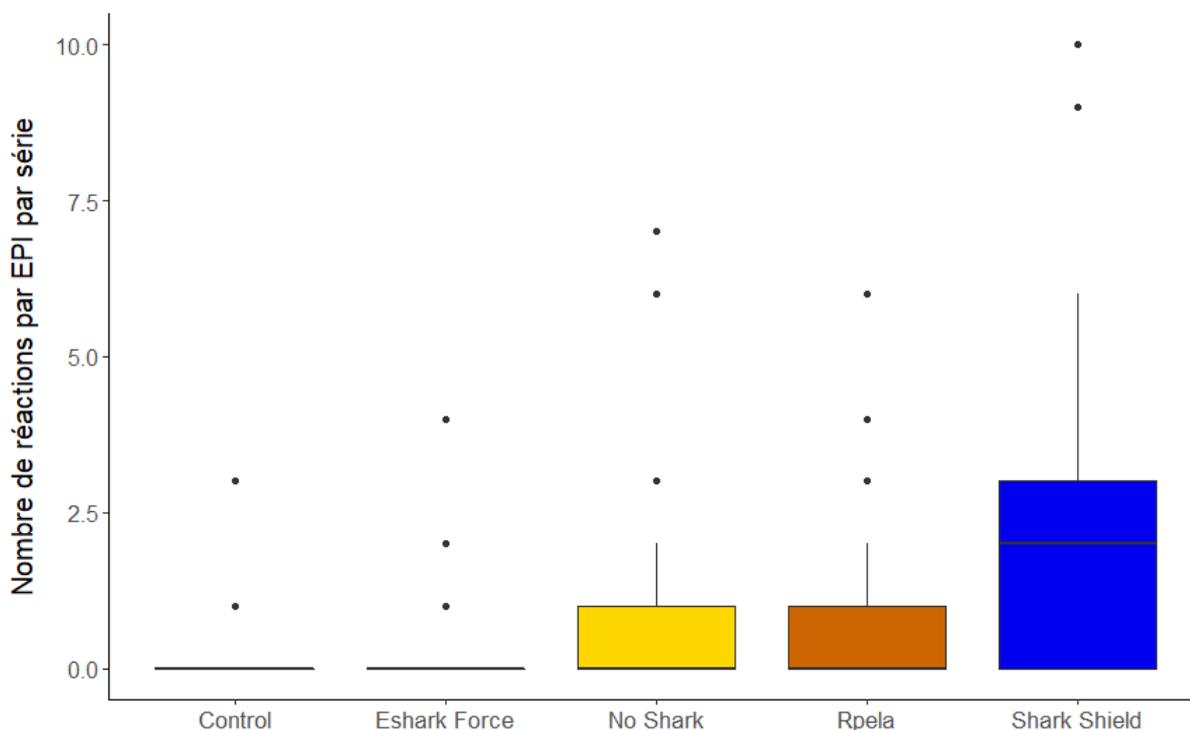


Figure 12. Boîtes à moustaches représentant la distribution du nombre de réactions de gènes visibles sur les requins bouledogue lors d'un passage proche de la planche de contrôle en fonction de l'activation d'un EPI ou pas. La barre centrale correspond à la médiane des données, et la boîte délimite le deuxième et le troisième quartiles. Les moustaches délimitent le premier et le quatrième quartiles.

Un test de Kruskal–Wallis révèle une différence significative globale du nombre de réactions de gène ou désagrément visibles des requins bouledogue lors de l'approche de la planche de test entre les EPI et le dispositif de contrôle ($H_{(4, 368)} = 105,72, p < 0,05$). Les réactions de gène des requins sont significativement plus nombreuses (test post-hoc de Dunn) lorsque le No Shark ($0,5 \pm 1,2, p < 0,05$), le Rpela ($0,8 \pm 1,2, p < 0,05$), ou le Shark Shield ($2,3 \pm 2,5, p < 0,05$) sont activés qu'en présence de la planche contrôle. De plus, les requins montrent significativement plus de réactions de gène en

présence d'un Shark Shield activé que pour les trois autres EPI ($p < 0,05$, test de Dunn). En revanche, l'E-Shark Force ne provoque pas significativement plus de réactions de gêne chez le requin bouledogue que la planche contrôle.

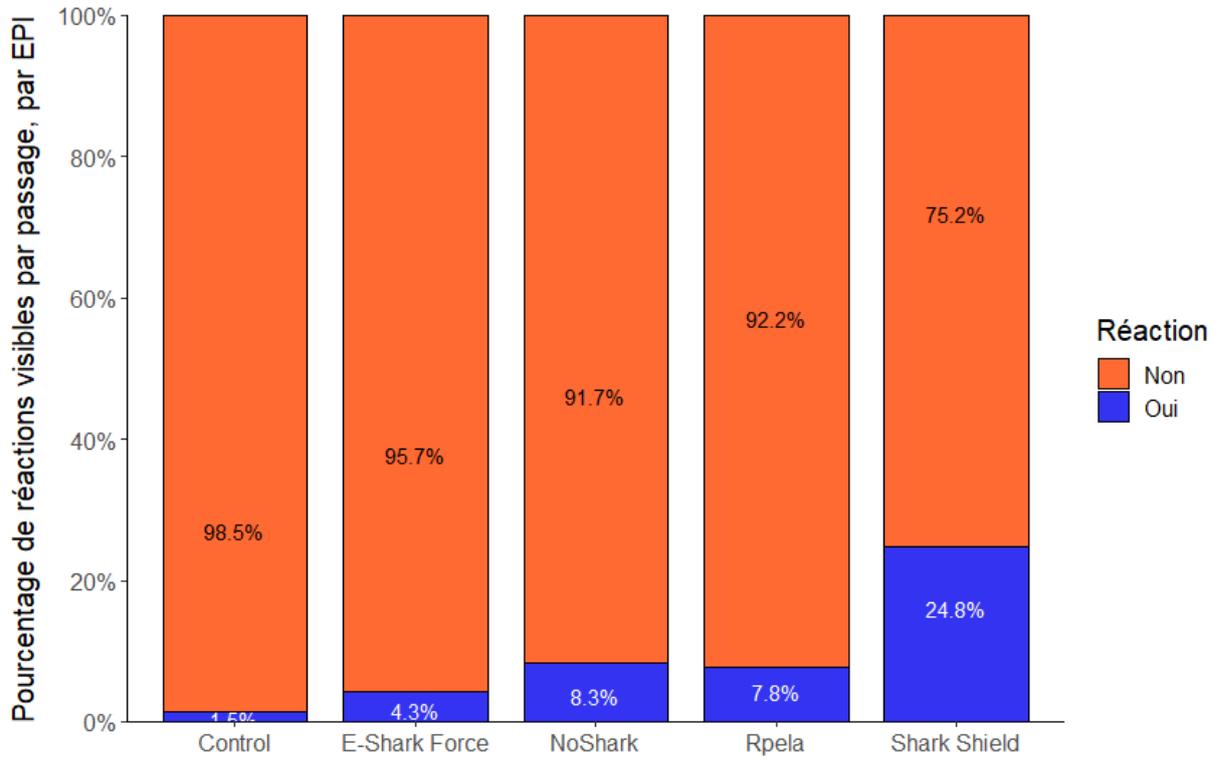


Figure 13. Nombre de réactions visibles en pourcentage par passage, par EPI.

Un test de χ^2 montre qu'il y a une différence significative entre les chances qu'un requin montre une réaction par interaction avec proximité de la planche test pour chaque EPI ($X^2_{(4, 2289)} = 171,04$, $p < 0,05$). Il n'y a aucune différence significative sur le nombre de réactions de gêne entre la planche contrôle (1,5%) et l'E-Shark Force (4,3% ; $p > 0,05$, Fisher's exact test), mais le No Shark (8,3%), le Rpela (7,8%), et le Shark Shield (24,8%) présentent tous une probabilité de provoquer une réaction significativement supérieure au contrôle ($p < 0,05$, Fisher's exact test) et à l'E-Shark Force ($X^2_{(1, 818)} = 4,70$, $p < 0,05$; $X^2_{(1, 925)} = 3,93$, $p < 0,05$; $X^2_{(1, 1022)} = 67,80$, $p < 0,05$ respectivement). Il n'y a aucune différence significative entre le No Shark et le Rpela ($X^2_{(1, 999)} = 0,03$, $p > 0,05$), mais le Shark Shield provoque un nombre de réactions de gêne visibles significativement supérieur au No Shark et au Rpela ($X^2_{(1, 1096)} = 47,39$, $p < 0,05$; $X^2_{(1, 1203)} = 60,07$, $p < 0,05$ respectivement).

2.2.3. Conclusions préliminaires

Les résultats préliminaires de cette phase 3 de l'étude montrent que trois des EPI testés ont un effet sur le comportement des requins, permettant à minima de retarder une attaque en augmentant le nombre de passages de requin autour de la planche avant de pouvoir se saisir de l'appât ou mordre la planche. Cet effet s'avère non significatif chez l'E-Shark Force par rapport aux conditions de la planche contrôle. Une hiérarchisation des autres EPI est clairement démontrée : le No Shark est le moins efficace, suivi du Rpela, et du Shark Shield qui montre des résultats significativement supérieurs aux autres.

Pour ces trois EPI, le phénomène de dissuasion n'est pas à négliger, car il peut être un facteur important permettant d'améliorer la prise de conscience de la présence d'un requin pour une victime potentielle d'attaque, cette dernière pouvant alors adopter une réaction comportementale défensive pour tenter d'enrayer une charge (surveillance, fuite et posture de défense).

Cependant, les résultats indiquent que tous les EPI ne sont pas en mesure de changer l'issue d'une série d'interactions, si aucune réaction comportementale défensive ou de fuite n'est engagée par le porteur de l'appareil.

En effet, seul le Shark Shield, et dans une moindre mesure le Rpela, présentent des résultats significativement supérieurs à la planche contrôle, avec des succès respectifs aux tests de 44,6% et 19,4%.

Globalement, les résultats préliminaires suggèrent que l'EPI le plus efficace vis-à-vis des requins bouledogue du port de Nouméa est le Shark Shield.

2.3. ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ DU SURF+ MINI

2.3.1. Résultats des tests de 15 minutes

Lors des tests réalisés sur le Surf Mini, la planche contrôle (n = 69) a été en échec dans 95,7% des cas contre 75,3% avec le Surf Mini (n = 73) allumé, soit un pourcentage de succès de 4,3% pour la planche contrôle et de 24,7% de succès avec le Surf Mini (Figure 14). Cette différence est significative et indique que le Surf Mini augmente

statistiquement le nombre de succès durant les tests de 15 minutes (Test de Fisher, $p < 0,05$).

Tableau 3. Nombre total de réussites et d'échecs du Surf Mini et de la planche contrôle.

	Control	Surf Mini
Succès	3	18
Echec	66	55

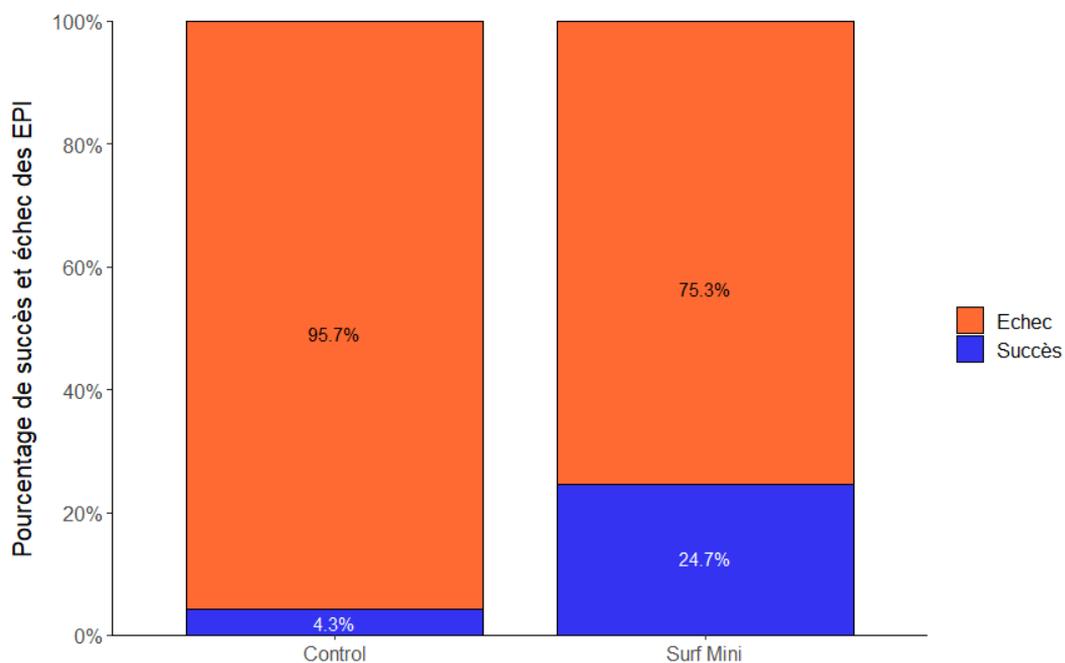


Figure 14 . Nombre de succès et d'échecs en pourcentages pour le Surf Mini et de la planche contrôle de 15 min sur la période d'étude.

Il semble délicat de vouloir comparer les résultats du Surf Mini aux autres EPI car les tests n'ont pas été réalisés dans les mêmes conditions, ni avec le même matériel.

2.3.2. Effet du Surf Mini sur le comportement d'approche des requins

La Figure 15 permet de montrer l'effet de l'utilisation du Surf Mini sur le nombre de passages de requins bouledogue pendant les tests de 15 minutes.

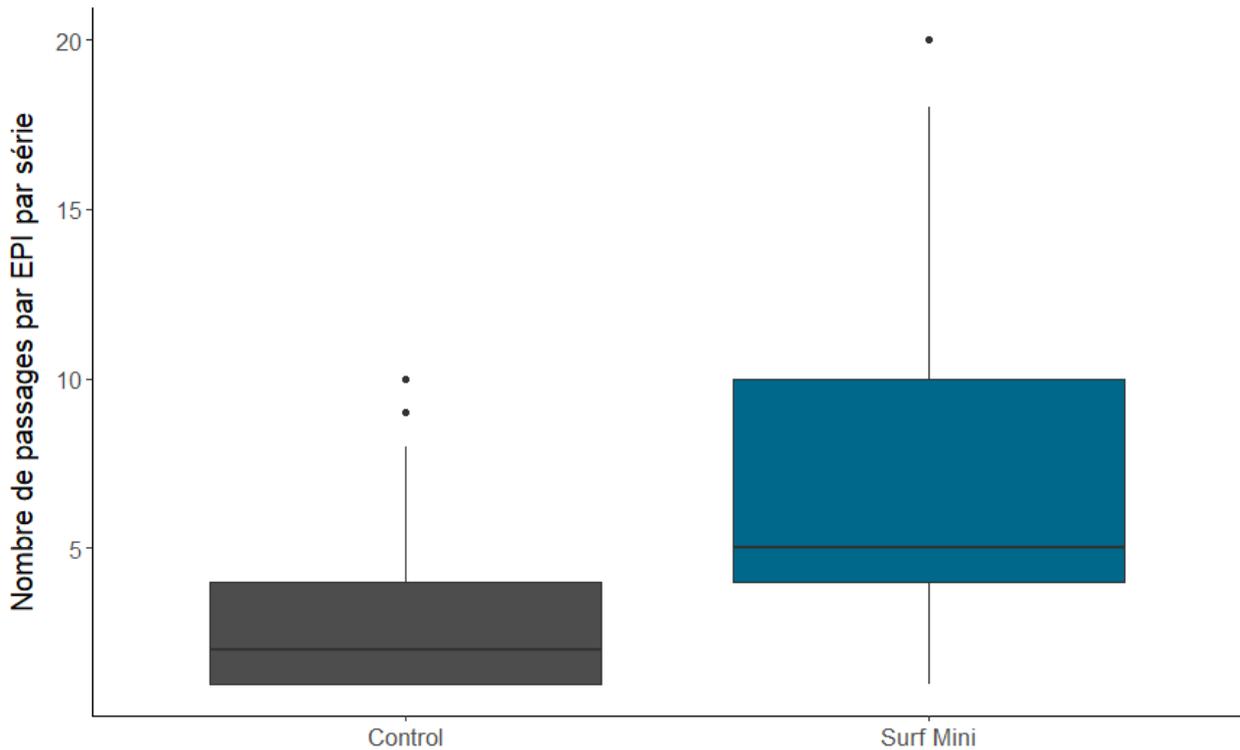


Figure 15. Boîtes à moustaches présentant la distribution du nombre de passages de requins pendant les tests avec le Surf Mini et la planche contrôle. La barre centrale correspond à la médiane des données, et la boîte délimite le deuxième et le troisième quartiles. Les moustaches délimitent le premier et le quatrième quartiles.

Il y a significativement plus de passages de requins bouledogue à côté de la planche de test quand le Surf Mini est actif ($6,9 \pm 4,5$) qu'à côté de la planche contrôle (Test de Mann-Whitney, $2,8 \pm 2,2$; $n = 143$, $W = 1002,5$, $p < 0,05$).

Il y a en moyenne $2,4 \pm 2,6$ passages de requins à côté de la planche contrôle avant que le test ne se termine et $7,8 \pm 5,6$ passages de requins pour le Surf Mini. Ici encore, il est impossible de comparer ce résultat aux autres EPI, les conditions de test étant différentes.

La Figure 16 permet de montrer l'effet de l'utilisation du Surf Mini sur le nombre de réactions de gênes par les requins bouledogue pendant les tests de 15 minutes lors de passages proches de la planche.

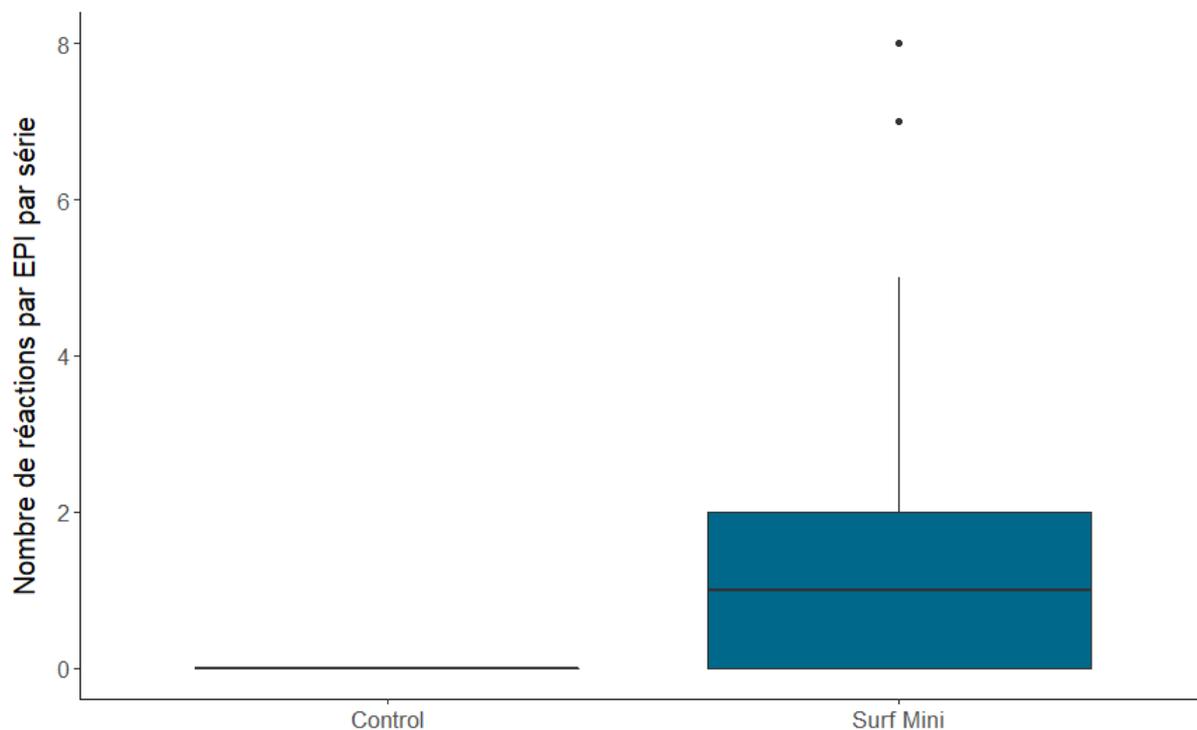


Figure 16. Boîtes à moustaches présentation de la distribution des réactions de gène par les requins bouledogue lors d'un passage proche de la planche de test en présence du Surf Mini activité ou pas. La barre centrale correspond à la médiane des données, et la boîte délimite le deuxième et le troisième quartiles. Les moustaches délimitent le premier et le quatrième quartiles.

En présence du Surf Mini activé, les requins bouledogue montrent significativement plus de réactions de gène que lors des tests avec la planche contrôle (test de Mann-Whitney $n = 143$, $W = 1136$, $p < 0,05$).

2.4. CONCLUSION ET SYNTHÈSE

La mission réalisée par le Centre Sécurité Requin a permis de collecter une importante base de données dans le but d'évaluer l'efficacité de cinq EPI différents sur les requins bouledogue. Le choix du site d'expérimentation du Port de Nouméa s'est donc avéré

judicieux, puisqu'il a permis de collecter un grand volume de données sur une période de temps restreinte de 18 jours.

Le volume de données et le protocole mis en place, en partenariat avec l'université de Flinders en Australie, permettent d'apporter une connaissance consolidée sur la problématique. Au cours des 18 jours de tests, un total de 3 551 interactions a été dénombré entre des requins bouledogue et le dispositif expérimental. Les tests ont été organisés afin de pouvoir systématiquement comparer l'effet de chaque EPI à une planche de contrôle qui ne diffère de l'EPI que par l'absence de champ électrique. Tous les autres paramètres visuels peuvent être considérés comme identiques. Cette précaution de base permet d'affirmer que les changements de comportement des requins sont bien dus à la présence du champ électrique dans l'eau.

La base de données traitée dans ce rapport pourra encore apporter des éléments de compréhension lorsque le travail final d'analyse des images stéréoscopiques aura été réalisé. Cette analyse plus approfondie permettra notamment d'accéder à des informations telles que l'identification des spécimens présents (sexe, marques externes, tailles) et la distance des requins par rapport à l'appât. Ce travail a démarré et se terminera courant 2020.

En premier lieu, les tests de résistance réalisés sur 15 minutes montrent l'existence d'une hiérarchie clairement établie entre les différents EPI.

Placée dans les conditions du test, la planche de contrôle, sur laquelle aucun EPI n'est actif, ne sort indemne que dans 2,7 % des tests, ce qui atteste de la très grande efficacité des requins bouledogue à s'emparer d'une proie. Avec un EPI activé, le succès du test augmente jusqu'à 44,6 % pour le Shark Shield, 19,4 % pour le Rpela, 10,7 % pour le No Shark, et 4,1% pour le E-Shark Force.

L'analyse statistique démontre que les différences entre succès et échecs ne sont statistiquement significatives que pour le Shark Shield et le Rpela par rapport à la planche contrôle. Ces deux appareils démontrent ainsi leurs capacités respectives à augmenter les chances de succès, c'est-à-dire à empêcher des requins bouledogue à s'emparer d'une proie dans un contexte de fortes stimulations olfactives et acoustiques ainsi qu'en présence de nombreux spécimens (>5) autour de la planche test. Ces résultats confirment une hiérarchie déjà démontrée dans les phases précédentes entre les EPI testés et fondés sur la caractérisation du champ électrique produit : le Shark Shield étant l'appareil le plus efficace des deux pour repousser le requin bouledogue.

Ces résultats confirment également ce qui était déjà connu pour d'autres espèces de requins : même si ces appareils augmentent statistiquement les chances de succès au

test, aucun d'entre eux n'est capable de garantir une absence d'échec. Ces appareils réduisent le risque mais ne l'annihilent pas.

D'autres explorations, basées sur l'analyse du comportement d'approche des requins, ont permis de montrer un effet de trois EPI (Shark Shield, Rpela et No Shark) sur l'augmentation du nombre d'approches de ces derniers à proximité des appareils lorsqu'ils sont actifs. Cette augmentation du nombre de passages (sans contact avec le dispositif expérimental) de requins est une conséquence de l'efficacité répulsive des appareils : le requin est repoussé/dissuadé par l'EPI et revient plusieurs fois vers la planche par essais successifs. Pour l'E-Shark Force, la différence avec la planche contrôle n'est pas statistiquement significative.

Bien que les éléments ci-dessus nous indiquent que tous les EPI ne sont pas en mesure de changer l'issue d'une série d'interactions, ces résultats démontrent que les EPI ont tous un effet de dissuasion permettant à minima de retarder une attaque en augmentant le nombre de passages de requin autour de la planche. Ce phénomène n'est pas à négliger, car il peut être un facteur important permettant d'améliorer la prise de conscience de la présence d'un requin pour une victime potentielle d'attaque, cette dernière pouvant alors adopter une réaction comportementale défensive pour tenter d'enrailer une charge (fuite et posture de défense).

Ces considérations permettent de prendre conscience de ce que les EPI peuvent apporter, mais également des limites de leur utilisation. **En effet, il convient de rappeler qu'aucun des appareils testés ne permet de garantir un risque nul.** En situation aussi dégradée que celle du port de Nouville, seuls les appareils les plus efficaces peuvent contribuer à réduire le risque, permettant probablement une diminution statistique des attaques. **Le Shark Shield offre la meilleure dissuasion parmi les EPI existants sur le marché, en diminuant significativement le nombre d'échecs aux tests, tout en augmentant statistiquement le nombre de passages et de réactions de gênes des requins à proximité. Le Rpela V2 présente également des résultats statistiquement significatifs permettant de réduire le risque, mais ses résultats restent inférieurs au Shark Shield. Les autres appareils se portant à la cheville (No Shark et E-Shark Force) semblent, au vu des conditions de tests, insuffisamment dissuasifs pour changer l'issue d'une série d'approches de requin.** Ces résultats viennent corroborer les conclusions obtenues lors de la phase 2 du projet, les mesures de champ électrique alors réalisées en bassin sur ces mêmes appareils avaient permis de dégager la même hiérarchie entre ces EPI. Ils prolongent également les résultats des dernières publications scientifiques ayant montré l'efficacité de certains appareils sur le grand requin blanc.

Enfin, il semble important de rappeler les conditions dans lesquelles ces expérimentations ont été réalisées. Les requins présents sur ce site sont des animaux qui ont été habitués, pendant plusieurs années, à des pratiques de nourrissage anthropiques sur le quai des pêcheurs de Nouville. Ils sont visiblement habitués à remonter en surface dès qu'un stimulus leur indique la présence de nourriture. Ils étaient entre cinq et huit individus en moyenne présents à proximité de la planche d'expérimentation, et étaient régulièrement stimulés, en dehors de l'appât fixé à la planche, par des stimuli complémentaires : morceaux de sardines et simulation de chute d'objets dans l'eau. On peut ainsi considérer que ces requins sont des candidats sérieux pour éprouver les EPI, et que les conditions de tests sont loin d'avoir ménagé les appareils. Les résultats obtenus peuvent, à ce titre, être considérés comme conservateurs.

Alors que des doutes pouvaient subsister au démarrage de cette étude concernant l'efficacité réelle des EPI sur les requins bouledogue, les résultats obtenus lors de la phase 3 de ce projet permettent désormais d'écarter avec certitude ce doute. Il semble maintenant possible d'affirmer que l'usage d'un EPI suffisamment puissant peut être un outil opérationnel de réduction du risque pour l'île de La Réunion, qui est fortement exposée au risque d'attaque vis-à-vis du requin bouledogue. Compte tenu des enjeux liés aux conséquences d'une potentielle attaque, et compte tenu du caractère non absolu de l'efficacité de ces appareils sur le requin bouledogue, en date du présent rapport, il ne pourrait être conseillé autre chose que d'utiliser le plus efficace des appareils en date existant sur le marché, c'est-à-dire le Shark Shield.

Pour finir, il est important de rappeler que l'usage d'un EPI pour la réduction du risque requin ne doit être envisagé que comme une mesure supplémentaire venant s'ajouter en premier lieu, à une prise de risque éclairée de l'utilisateur tenant compte des conditions environnementales de la pratique de son activité. Le choix des conditions de pratique doit rester le premier facteur de choix de la mise à l'eau, et le port d'un EPI ne peut en aucun cas justifier une mise à l'eau dans des conditions dégradées. De même, les résultats des tests sont fondés sur des dispositifs neufs, entretenus et en bon état de fonctionnement. Toute négligence dans la maintenance d'un EPI diminuera fortement, voire annulera totalement, tous ces effets.



■ 3. MESURE DIRECTE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES GÉNÉRÉS PAR LES EPI EN MER

3.1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

3.1.1. Principe de mesure

La mesure du champ électrique en mer reprend les principes déjà expérimentés dans la phase 2 du projet, avec quelques améliorations techniques permettant de réaliser ces mesures directement en mer sur plusieurs points de mesure simultanément.

Le dispositif s'appuie sur (Figure 17) :

- **Un châssis en PVC en forme de T** : le petit segment du T étant maintenu en surface par des flotteurs, et le grand segment du T étant positionné verticalement dans la colonne d'eau grâce à un lest positionné à son extrémité. La partie supérieure du châssis permet de fixer un EPI directement ou une planche équipée. La partie immergée du châssis permet de maintenir les quatre paires d'électrodes à des distances bien déterminées : 0,5 m, 1,0 m, 1,75 m et 2,5 m.
- **Quatre paires d'électrodes** : chaque paire d'électrodes permet de mesurer une différence de potentiel dans l'eau en un point de l'espace. Les électrodes sont espacées de 10cm l'une de l'autre, et sont orientées dans la direction du champ

électrique généré par l'EPI. La connaissance préalable de la structure du champ électrique est donc primordiale afin de pouvoir réaliser cette mesure uniquement avec deux électrodes. Cette connaissance a été permise par les travaux réalisés en phase 2 du projet.

- **Un oscilloscope digital à 8 canaux** : relié à un ordinateur, cet appareil permet la mesure simultanée de 8 sondes de potentiel. Au niveau de chaque paire d'électrodes, il est ainsi possible de mesurer le différentiel de potentiel sur 10cm de distance, et de calculer l'intensité du champ électrique dans la direction donnée.

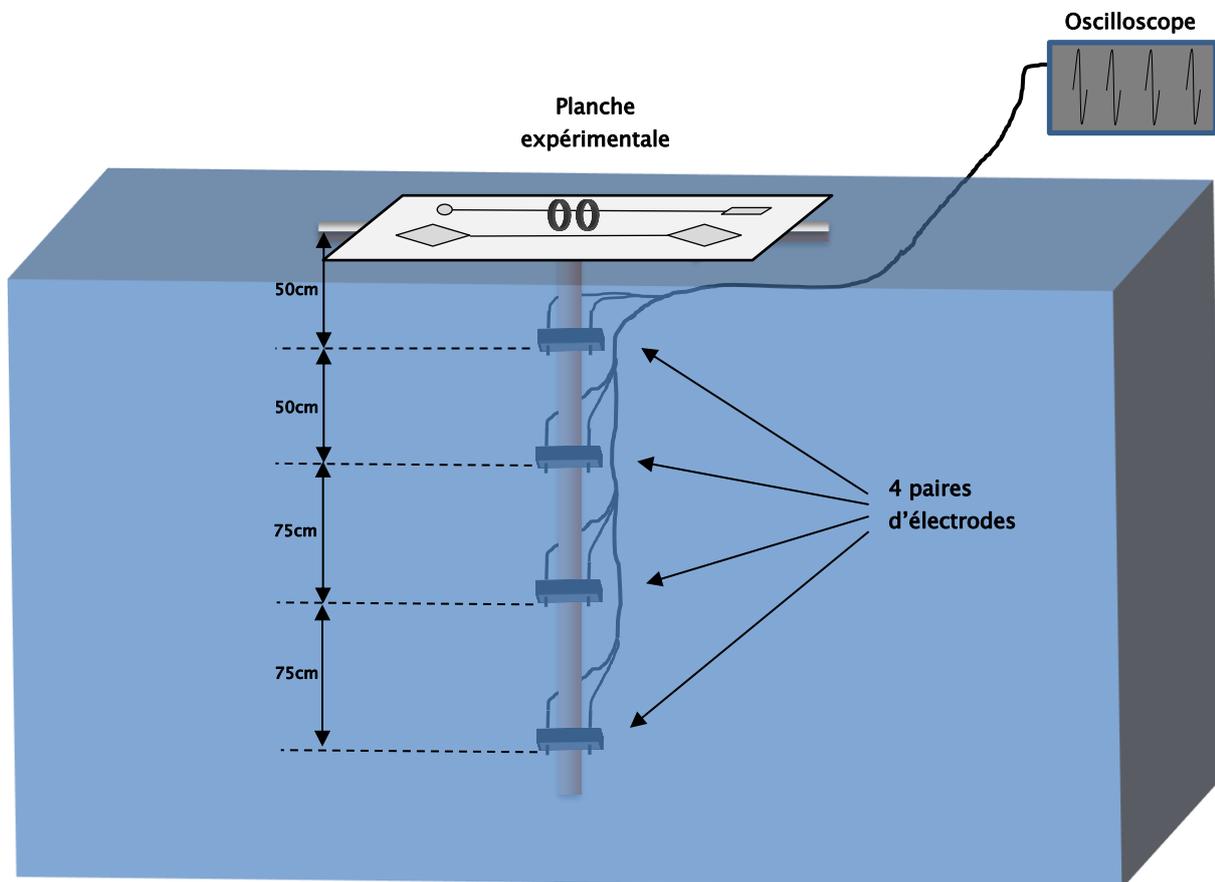


Figure 17. Instrumentation du banc d'essai en mer.

3.1.2. Site de mesure

Les mesures se sont déroulées le 15 septembre 2019, sur l'île Larégnère en face de la ville de Nouméa, dans environ 8m de profondeur.

Chaque EPI a fait l'objet d'une séquence d'acquisition de mesures au niveau des quatre paires d'électrodes. Les résultats sont enregistrés en format brut pour le logiciel d'acquisition Picoscope®. Les données sont ensuite analysées afin d'en extraire les différences maximales de potentiel mesurées au niveau des quatre paires d'électrodes.

3.2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les résultats des mesures réalisées en mer sur les EPI sont présentés dans la Figure 18. Cette figure rappelle également les résultats des mesures réalisées en bassin lors de la phase 2.

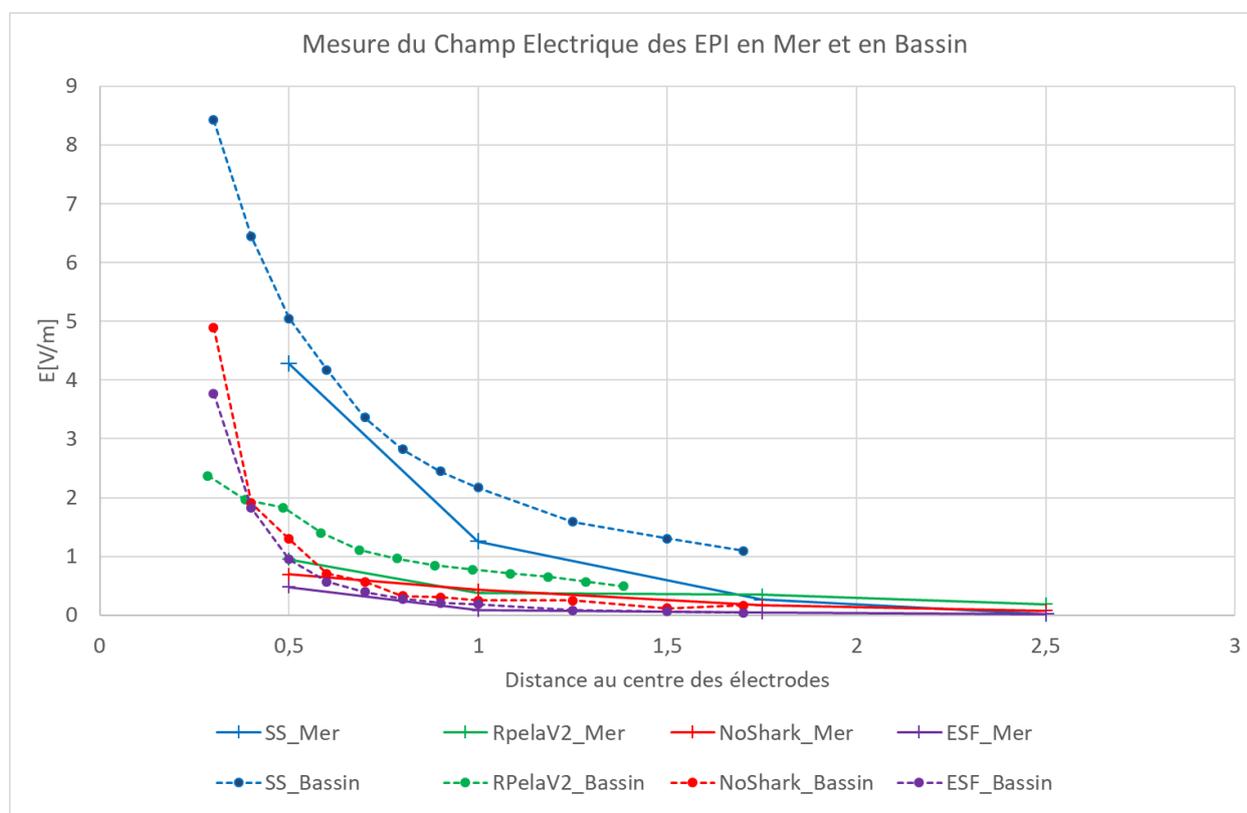


Figure 18. Mesures du maximum du champ électrique produit par les EPI ($E[V/m]$) en fonction de la distance au centre des électrodes en mètre (SS : Shark Shield ; ESF : E-Shark Force).

L'analyse des résultats des mesures appelle les remarques suivantes :

- Le Shark Shield présente le champ électrique le plus puissant des quatre appareils analysés avec un champ de $1,2 \text{ V.m}^{-1}$ à 1 m de distance du centre des électrodes, ce qui est proche des spécifications constructeur (1 V.m^{-1} à 1 m de distance)
- Le Rpela et le No Shark présentent la même puissance de champ électrique à 1 m de distance ($0,4 \text{ V.m}^{-1}$), mais le Rpela est légèrement plus puissant à 0,5 m de distance avec 1 V.m^{-1} .
- Le E-Shark Force est en dessous avec seulement $0,5 \text{ V.m}^{-1}$ à 0,5 m de distance.

La hiérarchie des appareils reste donc relativement identique à celle établie lors de la phase 2 du projet, même si les résultats du Rpela semblent proportionnellement inférieurs à ceux obtenus en phase 2.

La Figure 18 montre également que les mesures qui avaient été réalisées en bassin lors de la phase 2 étaient supérieures à celles réalisées en mer, à l'exception du No Shark dont la mesure en mer à 1 m dépasse celle réalisée en bassin. Les données mesurées sur le Shark Shield en mer montrent une asymptote proche de l'axe des abscisses, ce qui semble plus en cohérence avec la théorie (cf chapitre 3.3).

Les résultats semblent confirmer ce qui avait été avancé lors de la phase 2 : les champs électriques générés en bassin subissent une déformation due à la présence des bords isolants de la piscine, de la surface et du fond, ce qui amène à y mesurer des valeurs supérieures à ce qui serait généré en mer, toutes choses égales par ailleurs.

Pour autant, en mer, la présence de la surface est naturelle et il semble important de pouvoir en évaluer l'incidence sur le champ. Une tentative d'approche est proposée dans le chapitre 3.3.

3.3. APPROCHE THÉORIQUE

En première approche, le champ électrique délivré par un EPI peut être modélisé en considérant l'appareil comme un dipôle électrique. Chaque électrode peut être considérée comme une charge ponctuelle de charge q ou $-q$. L'écartement des électrodes dépend alors de l'appareil. Chaque charge délivre un champ scalaire de

potentiel électrique qui peut être décrit par les équations de l'électromagnétisme dérivées de l'équation de Poisson.

$$V_q(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{1}{r} \quad (1)$$

$$\vec{E}_q(r) = -\text{grad}(V) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} r^{-2} \vec{U}_r \quad (2)$$

Avec :

ϵ_0 : Permittivité dans le vide

ϵ_r : Permittivité relative du matériau

r : distance de la charge ponctuelle q

Pour calculer le champ généré par deux électrodes de charge opposées, il est possible d'additionner les champs scalaires produits par chaque charge, et de recalculer le champ électrique total par l'équation (2). Le résultat donne, ici en coordonnées polaires, le champ électrique théorique délivré par l'EPI dans l'eau.

$$\vec{E} = E_r \vec{U}_r + E_\theta \vec{U}_\theta$$

$$E_r = K \left[\frac{r - a \cos \theta}{(a^2 + r^2 - 2ar \cos \theta)^{3/2}} - \frac{r + a \cos \theta}{(a^2 + r^2 + 2ar \cos \theta)^{3/2}} \right]$$

$$E_\theta = K \left[\frac{a \sin \theta}{(a^2 + r^2 - 2ar \cos \theta)^{3/2}} + \frac{a \sin \theta}{(a^2 + r^2 + 2ar \cos \theta)^{3/2}} \right]$$

Avec $K = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}$

Pour le Shark Shield, dont les spécifications du constructeur indiquent un champ de 1 V.m⁻¹ à 1 m de distance des électrodes, le résultat théorique est reproduit sur la Figure 19.

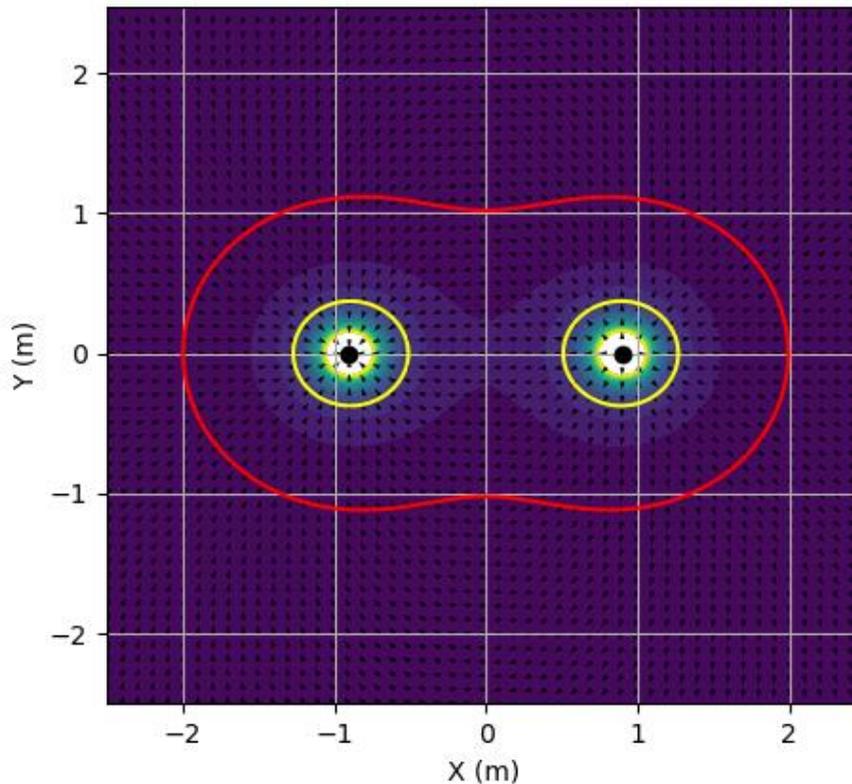


Figure 19. Champ électrique théorique du Shark Shield dans le plan horizontal – courbe rouge = 1V/m ; courbe jaune = 10V.m^{-1} .

Cette approche permet ainsi de décrire le champ électrique d'un EPI dans une masse d'eau considérée isotrope et infinie.

Dans notre cas, il apparaît important d'essayer de tenir compte de la présence de la surface de l'eau, qui se trouve à proximité des deux électrodes, et qui sera susceptible de déformer la structure du champ électrique généré par l'EPI. Pour cela, on peut utiliser la méthode des images électrostatiques, qui consiste à ajouter des charges fictives dans l'espace afin de recréer les frontières se comportant comme des plans de symétrie (dans notre cas) ou d'antisymétrie.

Du point de vue théorique, le principe est fondé sur le fait que, pour une distribution donnée de charges dans l'espace, la solution de l'équation de Poisson est unique. En conséquence, un plan isolant ou parfaitement conducteur peut être représenté par des charges fictives dont l'effet est de reproduire les mêmes conditions aux limites de champ et de potentiel au niveau de l'interface.

En faisant l'hypothèse que l'air est parfaitement isolant, au moins relativement à de l'eau de mer, on peut simuler la présence de l'interface air/eau par des charges fictives positionnées dans l'air, sur un plan symétrique par rapport à la surface de la mer.

La Figure 20 présente les résultats obtenus, pour chacun des EPI, avec ou sans prise en compte de la surface, avec la méthode des images électrostatiques.

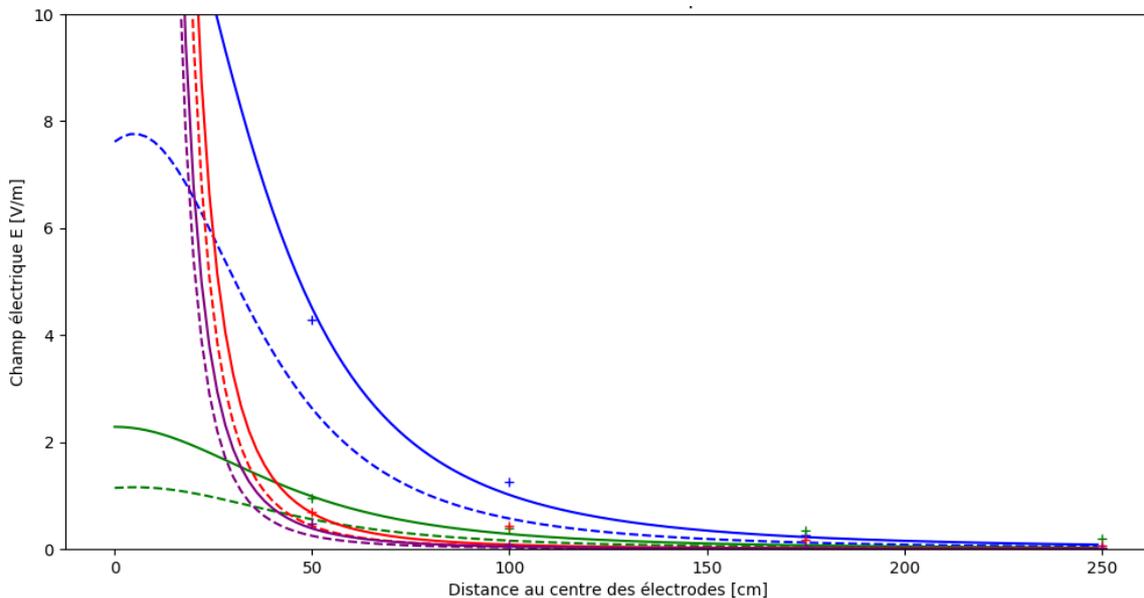


Figure 20. Calcul théorique du champ électrique pour chaque EPI avec (trait plein) ou sans (pointillés) prise en compte de la surface – Shark Shield : courbe bleue, Rpela : courbe verte, No Shark : courbe rouge, E-Shark Force : courbe violette – Points «+» : mesures réalisées avec le banc d’essai en mer.

La Figure 20 montre l’effet de la prise en compte de la présence de la surface : le champ est plus important à l’approche de la surface. Les courbes ont été calées sur les points de mesures réalisées par le banc d’essai en mer en Nouvelle-Calédonie.

Cette figure montre également une différence d’allure remarquable entre les deux EPI bracelets (No Shark et E-Shark Force) et les deux autres EPI (Shark Shield et Rpela) qui équipent des planches de surf : bien que plus faible dans le lointain, le champ semble relativement plus important dans le champ proche. Cette remarque s’explique par la forme du champ électrique qui est elle-même contrainte par l’écartement des électrodes. Les deux EPI bracelets présentent un écartement faible (12 à 13cm), alors que les EPI qui équipent une planche présentent des distances nettement plus importantes : 88 à 114cm. Ainsi, lorsqu’on trace un profil du champ électrique passant par le milieu des électrodes, on est quasiment en face des électrodes pour les EPI bracelets, mais on est décalé de 44 à 57cm de l’électrode pour les deux autres EPI.

Grâce au modèle théorique du champ, on peut tracer les différents profils verticaux des EPI, au niveau du milieu des électrodes et au niveau de ces dernières.

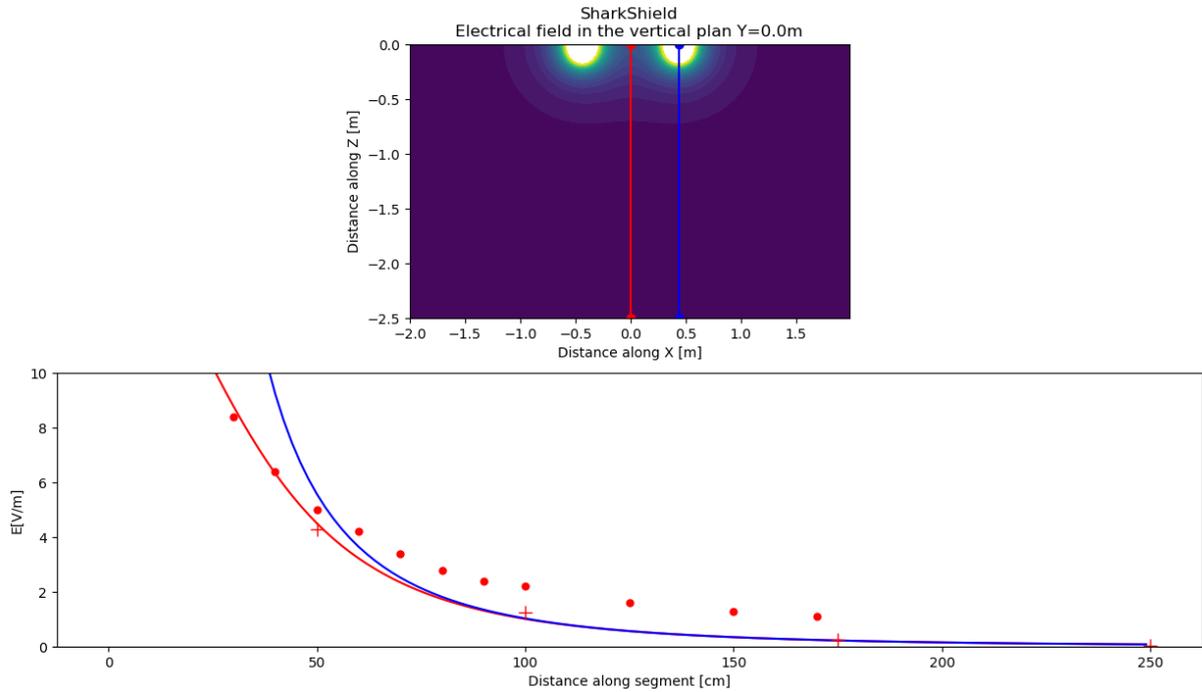


Figure 21. Shark Shield - Champ électrique à la verticale du centre des électrodes et à la verticale d'une électrode – Courbe rouge : champ théorique à la verticale du centre, Courbe bleue : champ théorique à la verticale d'une électrode – Point «+» : mesures réalisées en mer – Point «o» : mesures réalisées en bassin.

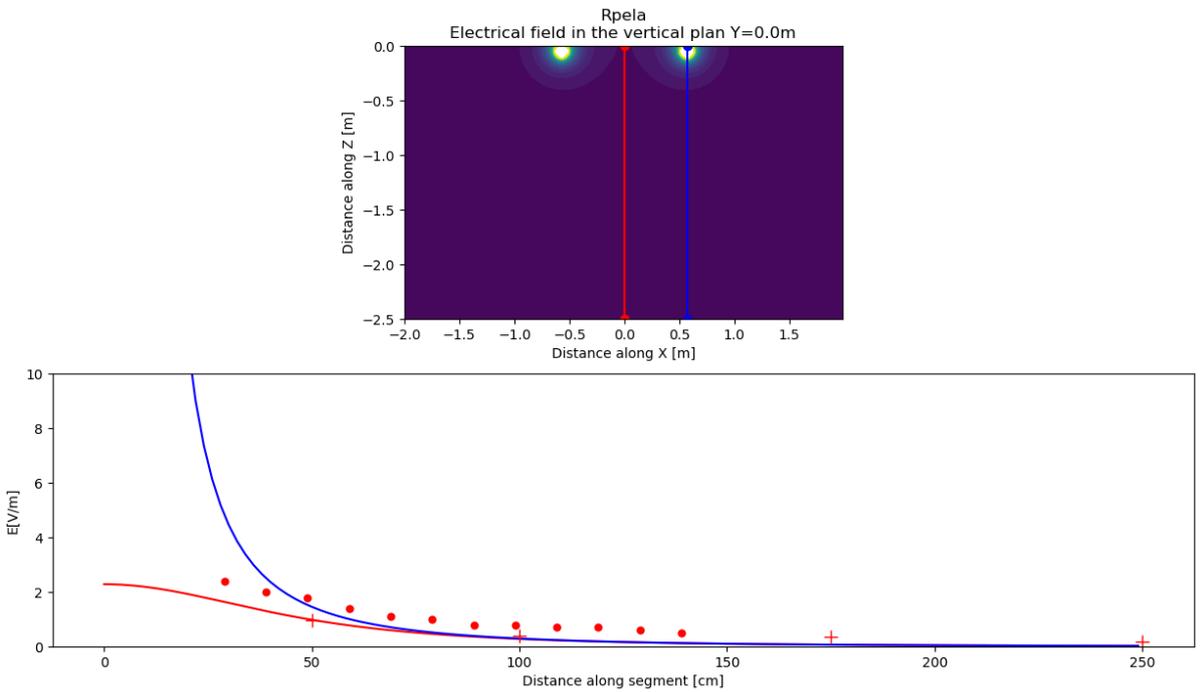


Figure 22. Rpela - Champ électrique à la verticale du centre des électrodes et à la verticale d'une électrode – Courbe rouge : champ théorique à la verticale du centre, Courbe bleue : champ théorique à la verticale d'une électrode – Point «+» : mesures réalisées en mer – Point «o» : mesures réalisées en bassin.

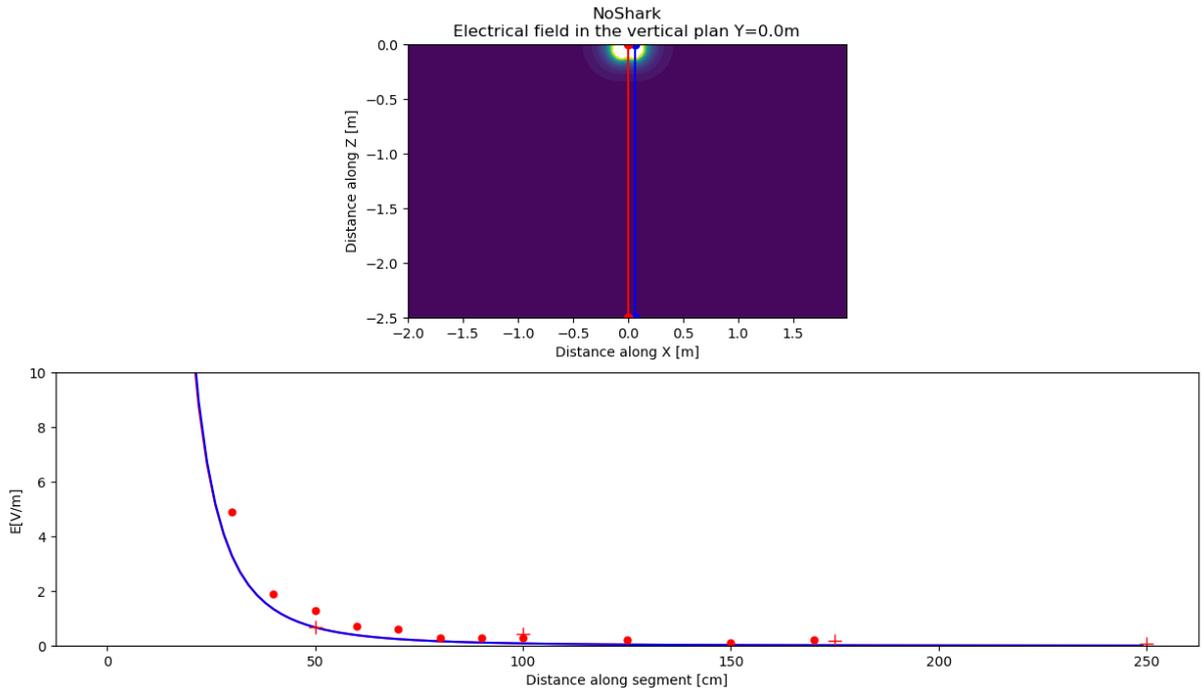


Figure 23. No Shark - Champ électrique à la verticale du centre des électrodes et à la verticale d'une électrode – Courbe rouge : champ théorique à la verticale du centre, Courbe bleue : champ théorique à la verticale d'une électrode – Point «+» : mesures réalisées en mer – Point «o» : mesures réalisées en bassin.

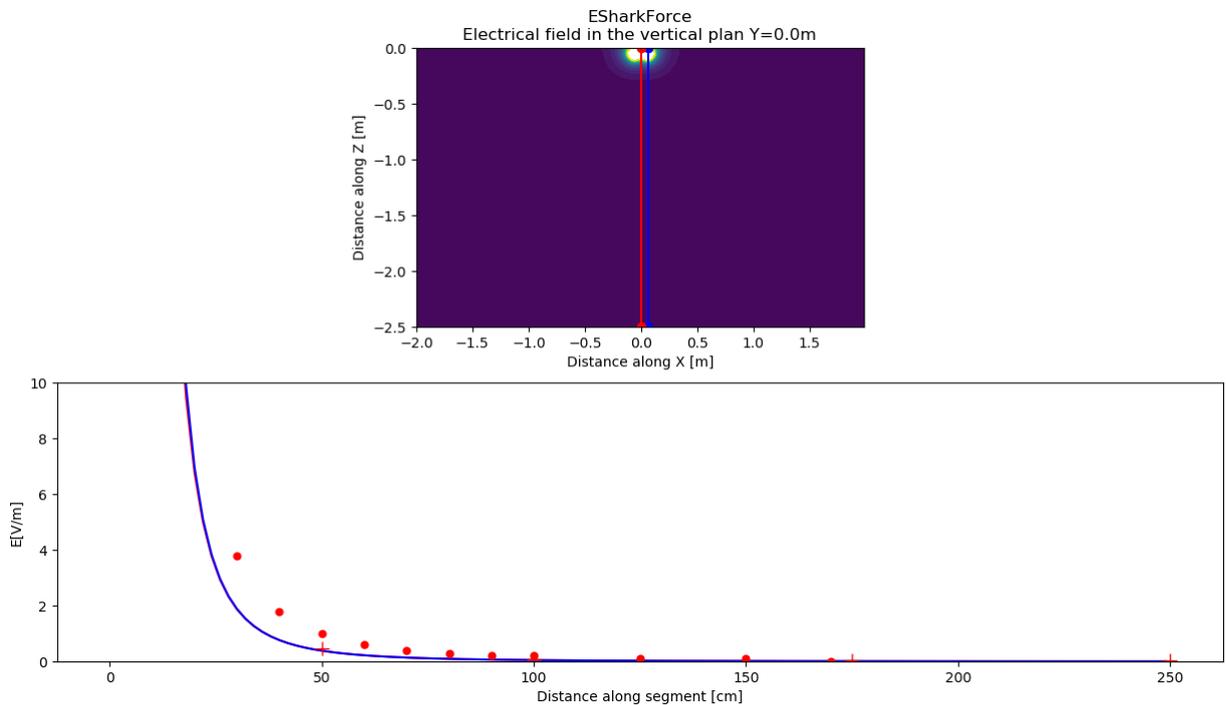


Figure 24. E-Shark Force - Champ électrique à la verticale du centre des électrodes et à la verticale d'une électrode – Courbe rouge : champ théorique à la verticale du centre, Courbe bleue : champ théorique à la verticale d'une électrode – Point «+» : mesures réalisées en mer – Point «o» : mesures réalisées en bassin.

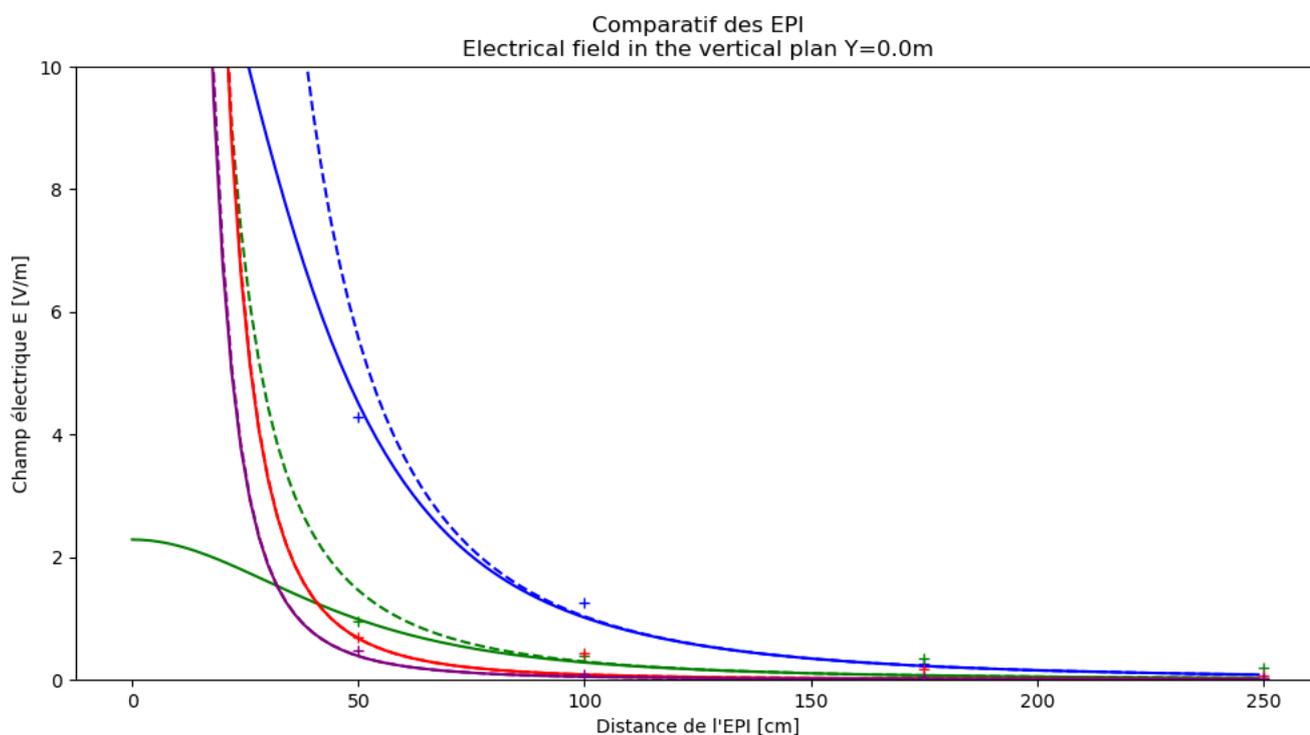


Figure 25. Champ électrique théorique des EPI à la verticale du centre des électrodes (courbes pleines) et à la verticale d'une électrode (courbes pointillées) – Points «+» : mesures réalisées en mer à la verticale du centre des électrodes – Shark Shield : bleu, Rpela : vert : No Shark : rouge, E-Shark Force : violet.

On constate sur les figures précédentes que le choix de la position de la verticale de mesure (sous le centre des électrodes ou sous l'une des électrodes) peut avoir une incidence en dessous du premier mètre de distance. Au-delà, les différences sont négligeables.

On peut également remarquer que dans le champ proche (distance inférieure à 0,5m), le Rpela fait mieux que le No Shark et le E-Shark Force à la verticale des électrodes, mais il est moins performant au niveau du milieu des électrodes.

Le Shark Shield est lui le plus performant des quatre EPI dans les deux cas de figure, ce qui démontre à la fois la puissance du champ généré, mais également de son extension sous la planche équipée.

3.4. ÉVOLUTIONS DU DISPOSITIF

Compte tenu des résultats obtenus, il semblerait judicieux pour la suite :

- De régler l'appareil pour permettre une mesure du champ électrique plus ramassée dans l'espace entre 0,5 m et 1,7 m de distance. Avec 4 points de mesures, il serait alors possible de connaître le champ électrique à 0,5 m, 0,9 m, 1,3 m et 1,7 m. Il semble qu'au-delà, il ne soit pas nécessaire d'aller réaliser des mesures.
- D'ajouter un système permettant de fixer rapidement, soit un EPI bracelet, soit une planche de surf, sur la partie supérieure du châssis du banc d'essai, de sorte d'avoir une électrode de l'EPI à l'aplomb vertical des électrodes de mesure. La mesure du champ d'un EPI au niveau de l'électrode permet une comparaison plus facile des EPI entre eux en termes de puissance. Pour connaître l'étendue du champ, on pourra se référer aux résultats du modèle numérique.

3.5. CONCLUSION ET SYNTHÈSE

Le 15 septembre 2019, le Centre Sécurité Requin a pu réaliser des essais en mer de son prototype permettant de mesurer la puissance des champs électriques émis par différents appareils EPI.

Le prototype a fait la preuve de sa capacité à pouvoir mesurer le champ électrique d'un EPI en quatre points de l'espace simultanément, ce qui est un gain de temps important et évite d'avoir à déplacer des sondes de mesure sous l'eau pendant la manipulation. L'appareil a été déployé depuis un bateau léger. Une fois l'EPI ou la planche de surf positionné sur le châssis, l'acquisition des données prend quelques dizaines de secondes. Le champ a été mesuré à 0,5 m, 1,0 m, 1,75 m et 2,50 m de distance de l'EPI, à la verticale du milieu des électrodes.

À l'avenir, les distances pourraient être raccourcies afin de mesurer le champ entre 0,5 m et 1,7 m par exemple, afin de mieux cerner la décroissance de la puissance des champs électriques. Au-delà, il ne semble pas nécessaire d'aller réaliser des mesures, le champ électrique étant trop faible.

Les résultats obtenus semblent bien correspondre à la théorie et montrent des puissances de champ électriques plus faibles en mer que pour les mesures réalisées en bassin lors de la phase 2.

Malgré cela, la puissance des EPI respecte une hiérarchie qui est à peu près celle déjà obtenue lors de la phase 2 : le Shark Shield présente la puissance la plus importante avec une marge relativement importante, suivie par ordre décroissant de puissance par le Rpela, le No Shark et le E-Shark Force, qui est le moins puissant des appareils.

Les travaux de modélisation du champ électrique ont également permis d'avancer sur la connaissance de champs émis et de leur structuration au niveau de la surface de la mer. Ce modèle permet notamment de quantifier la perte de puissance du champ électrique qui peut être constatée au milieu des électrodes. Ce phénomène pourra peut-être permettre de mieux comprendre les stratégies que pourraient avoir les requins à l'approche de l'appât, qui se trouve justement dans cette zone d'inflexion du champ électrique. Le modèle permet de bien cerner la forme tridimensionnelle du champ électrique. Il pourrait être utilisé pour améliorer la position des électrodes et pour aider à développer de nouveaux produits de ce type.



■ 4. REMERCIEMENTS

Le Centre Sécurité Requin tient à remercier la Province Sud et la ville de Nouméa, , le Port Autonome de Nouvelle-Calédonie (PANC), la Direction des Affaires maritimes (DAM) de Nouvelle-Calédonie et la Direction de la Sécurité Civile et de la Gestion du Risque (DSCGR) pour leur accueil et leur collaboration.

Les autorités locales ont permis la réalisation des expérimentations menées concernant les tests EPI sur les requins bouledogue dans les meilleures conditions possible.

Nous tenons à remercier également tous les volontaires des différentes associations telles que Caledoclean, WWF Nouvelle-Calédonie, le référent drone de la ville de Nouméa, les gardes nature de la Province Sud, tous présents lors de nos essais sur le quai des pêcheurs du Port de Nouville.

Nous remercions nos partenaires internationaux, Pr. Charlie Huveneers et Dr. Sasha Whitmarsh de l'université de Flinders pour leurs implications sur le terrain et conseil permettant la bonne conduite des expérimentations lors de notre mission en Nouvelle-Calédonie.

Enfin, nous remercions les membres de notre Conseil d'Administration (l'État Français, la Région Réunion, les communes de Saint-Paul, Trois-Bassins, Saint-Leu, L'Étang-Salé, Saint-Pierre et l'Université de La Réunion) pour le soutien financier apporté au bon déroulement de la mission.



5. RÉFÉRENCES

Cardno (2018). Rpela V2: Testing effectiveness against white sharks. Prepared for SurfSAFE Pty Ltd. 59918196.

Chateauminois E, Hoarau M, Maillard F. 2019. Projets innovants du Centre de Ressources et d'Appui pour la réduction du risque requin (CRA) – Résultats des tests expérimentaux sur les équipements individuelle de répulsion à impulsion électrique – Rapport Final. CRA-V2.2

Egeberg C, Kempster R, Hart N, Ryan L, Chapuis L, Kerr C, Schmidt C, Gennari E, Yopak K, Collin S. 2019. Not all electric shark deterrents are made equal: Effects of a commercial electric anklet deterrent on white shark behavior. *PLOS ONE* 14(3): e0212851

Huveneers C, Rogers PJ, Semmens JM, Beckman C, Kock A, Page B, Goldsworthy SD. 2013. Effects of an electric field on white sharks: in situ testing of electric deterrent. *PLOS ONE* 8: e62730.

Huveneers C, Whitmarsh S, Thiele M, Meyer L, Fox A, Bradshaw CJA. 2018. Effectiveness of five personal shark-bite deterrents for surfers. *PeerJ* 6: e5554

Kempster R, Egeberg C, Hart N, Ryan L, Chapuis L, Kerr C, Schmidt C, Huveneers C, Gennari E, Yopak K, Meeuwig JJ, Collin SP. 2016. How close is too close? The effect of non-lethal electric fields on white shark behaviour. *PLOS ONE* 11(7): e0157717

Smit CE, Peddemors V. 2003. Estimating the probability of shark attack when using an electric repellent. *South African Journal of Statistics* 37: 59–78

