Evaluation des pressions anthropiques et de la qualité des eaux de la baie et de rivière de Faaroa (Raiatea, Polynésie française)

Charlotte LEROI

Master EIO
Université de la Polynésie française
Promotion 2015/2016

Tutrice scientifique : Dr. Céline LAFABRIE

UMR 241 EIO
« Ecosystèmes Insulaires Océaniens »,
Université de la Polynésie française

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont entouré durant ces 6 derniers mois, vous avez tous participé à faire de ce stage, au-delà d'une simple formalité de fin d'étude, une expérience humaine incroyable que je n'oublierai jamais !

Un grand merci à toi Céline, tout d'abord de m'avoir fais confiance pour entrer dans l'aventure, puis pour ton aide précieuse tout au long de ce stage. Ce fut un réel plaisir de travailler avec toi, malgré la distance tu as toujours été présente, disponible pour moi. Merci, pour ton enthousiasme à toutes épreuves, durant ces longues journées de missions, ta vision des choses pertinente, tes paroles rassurantes et pour ton énergie communicative ! Je pense qu'on se souviendra toutes les deux pendant longtemps de cette journée sans relâche où nous avons travaillé 15h, c'était dur mais ça en valait la peine !

Un grand merci à toi Caroline, merci également de m'avoir offert la possibilité de vivre cette expérience unique qui m'a beaucoup appris sur moi en m'ouvrant l'esprit sur un domaine que je ne connaissais pas. Je suis ravie que nos chemins se soient croisés, ton approche plus humaine de la science est réconfortante.

Un grand merci à toi Vincent, de m'avoir emmené un peu partout avec toi, de m'avoir permis de m'ouvrir au-delà de la mission du stage. Merci pour les poissons. Merci d'avoir plongé dans les eaux bleues et translucides de la baie de Faaroa. Le SDR en mer c'était quand même quelque chose !

Un grand merci à toi Manutea, de m'avoir si bien accueilli, ces deux mois passés à Raiatea ont été un pur bonheur, en grande partie grâce à toi ! Merci pour les balades en kanak, en paddle, les promenades aux Tapioi, les apéros, le vélo et j'en passe. Je suis ravie qu'on est pu se rencontrer, d'avoir découvert un ami (peut être même un cousin ^^) à Raiatea, et merci pour toutes ces belles rencontres…

Un grand merci à toi Toofa, mon papa *fa'a'amu*, mon binôme d'enquête, mon garde du corps. Ca été un plaisir d'aller sur le terrain avec toi et d'avoir appris de la culture polynésienne. Merci pour la bringue tahitienne en mer, sur le catamaran, bercés par les vagues et le son des *ukulélés*, avec un bon *maha'a*, Des moments authentiques passés avec ta famille et tes amis qui n'ont pas de prix !

Un grand merci également à Heiari et Claude, merci pour votre dévouement à toutes épreuves ! Merci d'avoir accompagné Vincent dans les eaux bleues et translucides de Faaroa, d'avoir plongé à 10 mètres sans visibilité pour les *poito* ! Claude merci pour le bateau et ton sourire et Heiari je te revois encore avec les anoraks jaunes, qu'est ce qu'on en aura bavé mais au fond ce sont de bons souvenirs.

Un grand merci à toi Patricia, pour son sourire et ta bonne humeur, pour les petits cafés et les repas partagés au bureau ou les pieds dans l'eau !

Un grand merci à Catherine, Murielle et Sylvie, pour votre accueil chaleureux à Alès, merci de votre disponibilité, de vos conseils, mais aussi de votre bonne humeur contagieuse ! J'ai apprécié le travail avec vous, mais aussi les repas partagés à parler de tout et de rien. Je garde un très bon souvenir de mon passage à Ales grâce à vous. Merci aussi à Roro et toute l'équipe du LGEI pour les pauses café et dégustation.

Un grand merci à Perrine, pour ton accueil au travail et surtout pour m'avoir fais découvrir les paysages de la région. Merci aussi aux mangeurs de cornichons et d'olives qui ont accompagnés les repas de la cafète.

Un grand merci à toutes les personnes que j'ai rencontrés au cours des enquêtes, en particulier Pierre et Victoire, merci pour la belle sortie au *motu*, pour m'avoir permis d'essayer la pirogue et pour le temps passé avec moi.

Un grand merci à tous les enfants des collèges de Faaroa et d'Uturoa et aux professeurs qui ont contribués aux organisations de ces journées de sensibilisation.

Merci à toute l'équipe du SDR, à l'Epic Vanille, à Thierry Beylier, à Teva Guillain, à Marie-Ange pour le tournage du court métrage et à Maurice pour m'avoir fais visiter la centrale EDT et le barrage d'Opoa.

Un grand merci à Poe et Vetea, pour votre accueil formidable, à Delphine, pour la cuisine végétarienne, à Carole et Felix pour le *faapu* bio, et merci à tous ceux que j'oublie.

Un grand merci à toi Flo, pour ta présence durant cette belle aventure, pour ton aide sur le terrain, pour avoir toi aussi succomber aux eaux bleues et translucides de Faaroa ! Et bien sur pour tous les souvenirs et les rencontres à Raiatea

Et enfin un grand merci à ma famille, Maman, Grand-père, Mamie et Yohan, pour les agréables moments passés ensemble lors de mon séjour en France. Merci aux pensées sauvages, au 'tit punch et aux fromages d'Auvergne !

L'anthropisation croissante des zones côtières engendre une augmentation des rejets de substances chimiques dans l'environnement et contribue à la dégradation de nombreux écosystèmes dans le monde. Certaines zones lagonaires du Pacifique sont exposées à des pressions croissantes ; c'est le cas de la baie de Faaroa (Raiatea, Polynésie française) où sont concentrées plusieurs activités agricoles. Les objectifs de cette étude étaient (i) d'identifier et de caractériser les principales sources de pressions anthropiques s'exerçant sur l'écosystème dulçaquicole et lagonaire de Faaroa, en particulier celles liées aux activités agricoles, et (ii) d'évaluer l'impact des pressions identifiées sur un compartiment biologique clé, le phytoplancton. Des approches, à la fois humaines et scientifiques, ont permis d'aborder les problématiques liées à la qualité de l'eau de manière complémentaire. Les résultats analytiques, en cohérence avec ceux des enquêtes, ont permis de mettre en évidence des gradients décroissants, depuis la rivière jusqu'à l'océan, d'enrichissement en sels nutritifs et de contamination par les pesticides. La même tendance a été observée pour la contamination par les bactéries fécales. Concernant les pesticides, quatre ont été mis en évidence dans les sédiments de la rivière et de l'embouchure (acétochlore, alachlore, DCPU et métolachlore), avec des concentrations proches de celles trouvées dans des systèmes côtiers anthropisés. Quant aux communautés phytoplanctoniques, des différences structurelles ont été mises en évidence entre les sites de la rivière et de la baie, mais également au sein des sites de la baie. Outre la variabilité des sites d'étude en termes de température et de salinité, ces différences structurelles pourraient également s'expliquer par les gradients d'eutrophisation et de contamination observés. Des études complémentaires permettraient de préciser et d'affiner ces résultats.

Mots clés : Contamination chimique, pesticides, phytoplancton, qualité de l'eau, écosystèmes lagonaires, Polynésie française.

Growing human pressures in coastal zones generate increasing chemical releases into the environment, contributing to ecosystem degradation. Some Pacific coastal areas are exposed to growing anthropogenic pressures. This is case for the Faaroa bay (Raiatea, French Polynesia) where several agricultural activities are concentrated. The aims of the study were (i) to identify and characterize the main sources of human pressures, in particular those related to agricultural activities, and (ii) to assess the impact of these pressures on a key biological component, the phytoplankton. Human and scientific approaches allowed to address water quality assessment in a complementary way. Analytical results, in agreement with the surveys, revealed decreasing gradient of nutrient enrichment and pesticide contamination, from the river and toward the ocean. The same trend was observed for faecal bacteria contamination. Regarding pesticides, four elements were found in the sediment of the mouth and the river (acetochlor, alachlor, DCPU and metolachlor), with concentrations close to those measured in human-impacted zones. As to phytoplankton communities, structural differences have been highlighted between the river and the bay sites, and also among the bay sites. Besides the temperature and salinity variability of the study sites, these structural differences may also be explained by the eutrophication and contamination gradients found. Supplementary studies would allow to precise and these results.

Key words: Chemical contamination, pesticides, phytoplankton, water quality, lagoon ecosystems, French Polynesia.

Sommaire

I. Contexte général et objectifs 1
A. Contexte institutionnel 1
B. Contexte géographique 1
C. Etat de l'art scientifique 3
D. Objectifs 5
II. Matériels et méthodes 6
A. Enquêtes 6
1. Elaboration des questionnaires 6
2. Réalisation des enquêtes 6
3. Traitement des données 7
B. Sites d'étude pour les analyses physico-chimiques et biologiques 7
C. Analyses physico-chimiques et bactériologiques 7
1. Analyse des paramètres environnementaux classiques 7
2. Analyse des éléments nutritifs 7
3. Analyse bactériologique 8
4. Analyse des pesticides 8
a) Echantillonnage d'eaux et extraction des pesticides 8
b) Analyses des échantillons par HPLC-MS/MS 9
c) Extraction des pesticides des échantillons de sédiment 9
D. Analyse des communautés phytoplanctoniques 10
1. *Mesures des concentrations en chlorophylle a (Chla)* 10
2. *Chémotaxonomie* 11
E. Analyses statistiques 11
III. Résultats 12
A. Enquêtes 12
1. Exploitants 13
2. Habitants 14
3. Entreprises et établissements publics 15
B. Caractérisation physico-chimique des sites d'étude 15
1. Variables environnementales 15
2. Concentrations en éléments nutritifs 15

3. Concentrations en bactéries fécales et évaluation de la qualité des eaux par rapport à ce critère 16
4. Concentrations en pesticides dans le sédiment et l'eau 16
5. Caractérisation des sites d'étude en fonction des variables environnementales 17
C. Caractérisation des communautés phytoplanctoniques 19
1. Abondance et classes de taille 19
2. Empreintes pigmentaires et structure des communautés 19
3. Caractérisation des sites en fonction des variables biologiques 20
4. Caractérisation des sites en fonction des paramètres environnementaux et de la structure des communautés phytoplanctoniques 21
IV. Discussion 22
A. Caractérisation de l'environnement de la rivière et de la baie de Faaroa, et liens avec les pressions anthropiques identifiées 22
B. Caractérisation des communautés phytoplanctoniques et évaluation des effets de l'environnement sur ces communautés 24
V. Conclusions et perspectives 26
VI. Valorisation des résultats et démarches de sensibilisation à la problématique de la contamination chimique de l'environnement 28
A. Réalisation d'un poster scientifique 28
B. Sensibilisation des élèves du collège de Faaroa à la pollution de l'eau et mise en œuvre d'une action participative 28
C. Participation à un court métrage pour la sensibilisation au tri des déchets (communauté de commune Havai'i) 30
Bibliographie 31
Annexes 34

I. Contexte général et objectifs

A. Contexte institutionnel

Ce stage a été effectué au sein de l'UMR 241 « Ecosystèmes Insulaires Océaniens » de l'Université de la Polynésie française dont une des thématiques de recherche concerne l'analyse des interactions entre les peuplements et leurs réponses face aux forçages naturels et anthropiques (http://www.upf.pf/fr). Il a été réalisé en partenariat avec le Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel (LGEI) d'Alès qui dispose d'une expertise dans l'analyse et le screening des polluants organiques persistants (séjour d'1 mois au sein du LGEI ; http://lgei.mines-ales.fr). Il a également été effectué en partenariat avec le Service du Développement Rural (SDR) de Raiatea, chargé de l'élaboration des programmes de recherche et de développement agricole, de l'application de la réglementation phytosanitaire et de la vulgarisation technique auprès des agriculteurs (séjour de 2 mois au sein du SDR de Raiatea ; http://www.biosecurite.gov.pf).

Ce travail s'inscrit dans le cadre du programme INTEGRE (Initiative des Territoires pour la Gestion Régionale de l'Environnement), dont l'objectif est de «*promouvoir et renforcer, au niveau régional, la gestion intégrée des milieux insulaires littoraux, et de contribuer à valoriser durablement les ressources des PTOM*[1] *du Pacifique dans l'intérêt des populations*» (http://integre.spc.int). L'une des actions du programme INTEGRE concerne la mise en place d'un plan de gestion pour le lagon de Raiatea-Tahaa (archipel de la Société, Polynésie française), à travers des projets participatifs impliquant l'ensemble des acteurs dans les réflexions sur les études à mettre en place. Au cours d'une réunion publique organisée à Faaroa (île de Raiatea ; **Annexe I)**, les habitants ont fait part de leur inquiétude concernant la qualité de l'eau de la baie de Faaroa et de la rivière s'y déversant, en raison de problèmes cutanés et d'infections ORL récurrents survenant dans la population suite à la baignade. L'étude de 39 dossiers médicaux de collégiens scolarisés dans la commune de Faaroa montre que 53.8% des élèves présentent des infections cutanées de type impétigo ou eczéma, et que 28.2% présentent des infections ORL chroniques de type otite moyenne chronique (communication personnelle, Dr T. Beylier du Centre d'Hygiène et de Salubrité Publique - Antenne des îles Sous-le-Vent). Une augmentation de ces affections, avec deux fois plus d'enfants présentant des problèmes cutanés, en comparaison avec d'autres enfants issus du même type de milieu socio-économique en Polynésie (milieu plutôt défavorisé avec des conditions de salubrité et d'hygiène précaires), a par ailleurs été observée (com. personnelle, Dr T. Beylier). Les habitants de la baie de Faaroa ont émis l'hypothèse d'un lien possible entre ces infections et une éventuelle pollution de l'eau par des agents chimiques tels que les pesticides.

B. Contexte géographique

L'île de Raiatea (archipel de la Société, Polynésie française) a pour ville principale Uturoa et est divisée en trois communes, Uturoa, Taputapuatea et Tumaraa. Elle est découpée en plusieurs grandes baies : Vairahi, Faaroa, Opoa sur la côte Est, Faatemu sur la côte Sud, Vaihuti et Vaiaau sur la côte Ouest **(Figure 1)**.

[1] PTOM : Pays et Territoires d'Outre-Mer

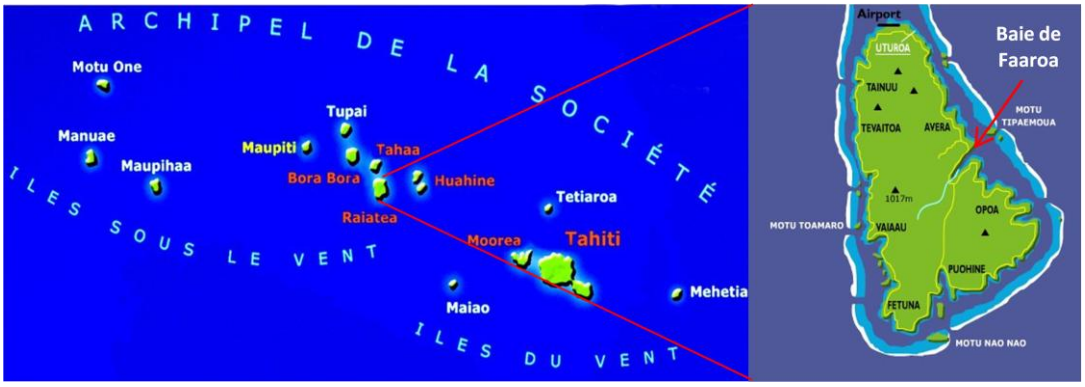


Figure 1 : L'île de Raiatea, située dans l'archipel de la Société (Polynésie française). *Source : Google image.*

Son développement économique repose principalement sur des activités d'agriculture (Verdier, 2011). La perliculture, avec huit fermes perlières en exploitation, sur une surface de 43.6 ha, représente également un secteur économique important pour l'île (Verdier, 2011 ; com. personnelle G. Adams, DRMM).

L'agriculture est surtout développée sur la côte Est, au niveau du lotissement du domaine de Faaroa, situé sur la commune de Taputapuatea. Les agriculteurs exploitants sont des personnes peu ou non qualifiées dont les productions sont essentiellement autoconsommées ou commercialisées sur des circuits informels. Les productions sont principalement constituées de nono, vanille, taro, ananas, fruits divers (papayes, agrumes…) et légumes. Le domaine de Faaroa, qui s'étend sur une superficie de 1 640 ha, est drainé par la rivière d'Apoomau qui se jette dans la baie, au nord. Les conditions pédoclimatiques du domaine sont caractérisées par de fortes précipitations et un sol fragile dont la fertilité est parfois dégradée (Verdier, 2011). Les recommandations concernant l'utilisation de produits phytosanitaires, tels que les pesticides (herbicides, insecticides et fongicides, principalement), et les engrais sont formulées par le SDR de Raiatea (**Tableau 1)**.

Tableau 1: Substances pesticides et engrais utilisés pour les différents types de cultures pratiquées à Faaroa (données *SDR).*

Cultures	Pesticides			Engrais	
	Type	Molécules	Utilisations	Type	Utilisations
Ananas	Induction florale	Ethrel, Acide 2 Chloro-Ethanephosphorique, Acide α-Naphtalène Acétique		Engrais complet, Urée et Potasse	Applications mensuelles, à date fixe, avec des doses croissantes ou de doses identiques à des intervalles de temps décroissants.
	Herbicides	Diuron, Amétrine, Bromacyl, Paraquat, Glyphosate	De manière préventive et sans relâche tout au long du cycle		
	Insecticides	Diazinon	Incorporer au sol au moment de la préparation du terrain		
Nono				Engrais complet 12-12-17-2 et Super Potasse	Lors de la transplantation du plant dans le sol
Taro	Herbicides	Paraquat, Diuron, Atrazine, Prométryne, Simazine et Nitrofen	Lutte contre les adventices	Engrais complet 12-2-12-17-2, Urée, Super Potasse et Chlorure de potasse	
Vanille	Fongicides	Prochloraz, Triadimefon, Thiophanate ethyl, Carbendazime et Benomyl.	Fusariose		
		Metalaxyl, Phoséthyl-Al, Propinèbe, Cynoxanil, Manèbe, Ofurace, Folpel, Captafol.	Mildiou		
	Insecticides		Contre les pucerons et les punaises		

En Polynésie française, l'usage des pesticides est réglementé selon la dangerosité de la matière active qu'ils contiennent (Loi du Pays, arrêté n°1853/CM du 4 Octobre 2010). Trois catégories ont été définies pour le classement de la matière active : « produits toxiques », « produits dangereux » et « autres produits ». La loi du Pays n°2011-19, du 19 juillet 2011, réglemente l'importation, la commercialisation et l'utilisation des pesticides sur le territoire polynésien. En 2012, 29.4 t de pesticides ont été importés sur le territoire polynésien, dont 38% d'herbicides (Département de la protection des végétaux du SDR, 2013). Plusieurs études (e.g., Fabricius, 2005) montrent que, lors d'un traitement d'une surface agricole, plus de 90% des quantités de pesticides utilisées n'atteignent pas le ravageur visé ; l'essentiel est dispersé dans les sols. Dans les régions tropicales soumises à d'intenses et longues saisons de pluie, les eaux ruissèlent le long des pentes et des quantités très importantes d'apports terrigènes se retrouvent rapidement dans les lagons (Botte *et al*., 2012). Pour Faaroa, qui est la vallée la plus arrosée de Raiatea (Verdier 2011), il semble donc important de se demander si les pesticides employés par les exploitations agricoles pourraient engendrer une contamination des eaux de la rivière, via le lessivage du bassin versant, puis de la baie (gradient décroissant de contamination).

Très peu d'études se sont intéressées aux contaminations par les pesticides des écosystèmes lagonaires en Polynésie française. Les rares travaux réalisés sur le sujet ont mis en évidence des niveaux significatifs de chlordécone dans différentes organismes, dont des poissons consommés localement (Salvat *et al.*, 2012 Roche *et al*., 2011). Ce fait est d'autant plus préoccupant que l'usage de cet insecticide, dont la rémanence dans les sédiments se chiffre en millénaires, n'aurait jamais été officiellement autorisé en Polynésie française. Ces travaux montrent également une contamination des organismes récifaux par des dérivés de l'acide trichloracétique, des dérivés des triazines, le diuron (herbicides), et par des insecticides organochlorés, en particulier le lindane (Roche *et al.*, 2011, Salvat *et al.*, 2012).

C. Etat de l'art scientifique

Les zones marines côtières présentent une importance écologique et économique majeure. Elles sont caractérisées par une forte biodiversité et sont à l'origine de nombreux services écosystémiques (e.g., pêche, aquaculture, protection des côtes, tourisme balnéaire ; Costanza *et al*., 1997). Ces zones d'interfaces terre/mer sont également fortement menacées en raison des nombreuses pressions anthropiques auxquelles elles sont exposées. L'urbanisation croissante de l'espace côtier (Martinez *et al.*, 2007), ainsi que l'augmentation et la diversification des activités humaines qui en résultent, engendrent des rejets considérables de substances chimiques toxiques dans l'environnement marin (métaux-traces, pesticides, hydrocarbures aromatiques polycycliques…). Afin de préserver les écosystèmes marins côtiers, il est donc nécessaire d'évaluer et de surveiller la qualité des eaux littorales. Il est également essentiel de mieux comprendre l'impact des pressions anthropiques, notamment celles associées à la contamination chimique environnementale, sur des organismes clés tels que les producteurs primaires qui sont à la base des réseaux trophiques.

Dans les pays tropicaux, les écosystèmes insulaires océaniens présentent une importance majeure d'un point de vue socio-économique (UNEP, 2006). Les populations insulaires des

régions tropicales sont en effet fortement dépendantes des ressources fournies par ces écosystèmes, notamment pour leur besoins protéiques (e.g., poissons lagonaires et récifaux, crustacés ; FAO, 2012). Par ailleurs, la pêche artisanale, l'aquaculture et le tourisme balnéaire constituent les principaux piliers du développement économique de ces pays (UNEP, 2006). C'est le cas notamment de la Polynésie française où les produits de la mer constituent une ressource nutritionnelle de base et/ou une source de revenus non négligeable pour une grande partie de la population (Lehane and Lewis, 2000).

La quantification de pesticides dans un milieu est généralement basée sur des analyses de ces substances dans les compartiments abiotiques que sont la colonne d'eau et les sédiments. L'analyse de ces deux compartiments fournit des données complémentaires. Le dosage des pesticides dans l'eau permet d'estimer leurs concentrations à un temps donné (moment du prélèvement), alors que leur dosage dans les sédiments permet une quantification intégrée (contamination des mois et années passées en fonction de la hauteur de la carotte de sédiment analysé). Par ailleurs, en raison des propriétés physico-chimiques différentes de ces contaminants et donc de leur affinité différente pour les deux compartiments (par exemple les pesticides les plus retrouvés dans les sédiments seront les composés chlorés car apolaires), une plus large gamme de pesticides peut être détectée si l'on combine les deux analyses (Gustafson, 1989).

Afin de pallier au manque de représentativité de l'échantillonnage ponctuel, les techniques d'échantillonnages passifs ont été développées dans les années 1980 (Ibrahim, 2013, Vrana *et al*., 2005). Cette méthode est basée sur l'utilisation de dispositifs capables de concentrer in-situ les micropolluants présents dans le milieu aquatique, permettant ainsi de mettre en évidence la présence de composés parfois indétectables par les approches classiques d'analyse. La méthode permet d'intégrer les polluants au cours du temps et ainsi d'accéder à une concentration cumulée moyenne sur une période donnée (en général environ 15 à 20 jours). L'échantillonnage est ainsi plus représentatif qu'un prélèvement ponctuel et permet la détection de plus de micropolluants par rapport à la technique d'échantillonnage ponctuel (Terzopoulou *et al*., 2015).

En raison de sa position à la base des réseaux trophiques, le phytoplancton joue un rôle essentiel dans les cycles biogéochimiques et le fonctionnement des écosystèmes marins (e.g., production primaire, production d'oxygène, transfert de matière ; Bertrand *et al*., 2011). Or, l'équilibre des communautés phytoplanctoniques peut être modifié par les importants changements environnementaux actuels et engendrer d'importantes modifications du fonctionnement des écosystèmes (e.g., effets en cascade sur les organismes de niveaux trophiques supérieurs). La contamination chimique du milieu peut notamment constituer un facteur important de perturbation du fonctionnement de ces communautés (Rochelle-Newall *et al*., 2008). La contamination par les pesticides est notamment susceptible d'affecter le phytoplancton, d'un point de vue structurel et physiologique. Plusieurs études montrent des effets négatifs des herbicides sur le phytoplancton (e.g., Arzul *et al*., 2014, Nystrom *et al.*, 1999, Tien and Chen 2012). Leboulanger *et al*. (2011) ont par exemple montré des effets de deux herbicides largement utilisés en régions tempérées et tropicales, le paraquat et le diuron, sur la biomasse phytoplanctonique. Le paraquat semble également avoir un impact sur la diversité taxonomique phytoplanctonique ; il réduirait le nombre d'espèces (Leboulanger *et*

al., 2009 et 2011). Afin de caractériser l'état écologique d'un écosystème aquatique, Blanck *et al*. (1988) propose l'évaluation des impacts écotoxicologiques des substances chimiques retrouvées dans le milieu, à partir de l'étude des réponses physiologiques et structurelles des communautés. En effet, suite à une exposition à un toxique, les organismes les plus sensibles ne sont plus concurrentiels et sont remplacés par des organismes plus tolérants. La communauté résultante présente alors une tolérance, vis-à-vis du toxique, supérieure à celle observée pour une communauté semblable mais n'ayant pas connu de pression de sélection par ce toxique. Selon plusieurs auteurs, les variables de structure de la communauté phytoplanctonique seraient plus sensibles au stress que les variables de fonctions de la communauté (e.g., Odum, 1985; Pratt, 1990). Les paramètres de fonction des communautés sont plus adaptés à la détection d'effets rapides (quelques heures à quelques jours), tandis que les paramètres de structure répondent au-delà, même lorsque les fonctions sont restaurées. La caractérisation *in situ* des communautés phytoplanctoniques dans différents sites, selon des gradients de pression, permet de définir la variabilité spatiale de ces communautés et de les relier aux variabilités physico-chimiques du milieu (température, salinité, eutrophisation, contamination chimique). Plusieurs travaux menés en laboratoire ont montré le caractère espèce dépendante de la sensibilité aux pesticides, il serait donc possible de relier certains types de communautés phytoplanctoniques à un type de contamination donnée. Par exemple, les travaux de DeLorenzo *et al.* (2004) montrent que les espèces de phytoplancton présentant un petit biovolume tendent à avoir une sensibilité plus importante vis-à-vis de substances pesticides ; ce résultat s'expliquerait par un ratio surface/volume plus important pour les petites cellules. Les mêmes observations ont été effectuées pour d'autres types de contaminants chimiques, des hydrocarbures aromatiques polycycliques ; la sensibilité phytoplanctonique au benz(a)anthracene et au fluoranthene étaient négativement corrélée au biovolume des cellules (Ben Othman *et al*., 2012).

D. Objectifs

Les objectifs de cette étude sont (i) d'identifier et de caractériser les principales sources de pressions anthropiques pouvant s'exercer sur l'écosystème dulçaquicole et lagonaire de Faaroa, en particulier celles liées aux activités agricoles, et (ii) d'évaluer l'impact des pressions identifiées sur un compartiment biologique clé des écosystèmes aquatiques, le phytoplancton.

Pour cela, différentes approches ont été utilisées. Des enquêtes ont tout d'abord été réalisées auprès d'exploitants et d'habitants de Faaroa afin d'obtenir notamment des informations sur les substances chimiques utilisées (engrais et pesticides) et les systèmes d'assainissement installés. Des échantillonnages d'eau et de sédiment ont ensuite été effectués afin de caractériser différents sites d'un point de vue physico-chimique et de détecter d'éventuels phénomènes d'eutrophisation et/ou de contamination chimique. Les sites d'étude ont été choisis de façon à disposer d'un éventuel gradient de pression anthropique, depuis la rivière de Faaroa et en direction de l'océan. Enfin, les communautés phytoplanctoniques des différents sites d'étude ont été étudiées afin d'établir d'éventuelles relations entre les pressions anthropiques identifiées d'une part, et l'abondance et la structure de ces communautés d'autre part.

II. Matériels et méthodes

A. Enquêtes

Afin d'identifier et de cartographier les éventuelles sources de contamination de la rivière et de la baie de Faaroa, des enquêtes ont été menées auprès des habitants et exploitants de la vallée à partir de questionnaires.

1. Elaboration des questionnaires

Les questionnaires ont été élaborés autour de trois thématiques :
- l'agriculture et l'élevage, professionnel ou de subsistance (partie du questionnaire rédigée avec l'aide de Vincent Vaucherot, technicien au SDR de Raiatea) ;
- la gestion des déchets (partie rédigée avec l'aide de Teva Guillain, président de la communauté de commune de Taputapuatea) ;
- l'assainissement (partie rédigée avec l'aide de Manutea Leroi, technicien sanitaire au Centre d'Hygiène et de Salubrité Publique de Raiatea).

Le questionnaire « exploitants », destiné aux agriculteurs et aux éleveurs de la vallée de Faaroa, aborde les points suivants : l'utilisation des intrants chimiques (pesticides et engrais) dans l'exploitation, d'un point de vue qualitatif (nom du produit) et quantitatif (dose d'utilisation par an) ; la gestion des déchets générés par le *faapu*[2] (déchets verts, ménagers et emballages de produits pesticides) ; et les distances d'utilisation des produits phytosanitaires par rapport aux cours d'eaux. Le nombre de bêtes et le dispositif d'assainissement utilisé sur l'exploitation sont également demandés aux éleveurs interrogés.

Le questionnaire « habitants », destiné aux habitants et aux responsables d'entreprises et de bâtiments publics dans la vallée de Faaroa, est quant à lui préférentiellement axé sur la gestion des déchets (déchets ménagers, piles, batteries, huiles de vidange), ainsi que sur les dispositifs d'assainissements utilisés et leur état de fonctionnement (**Annexe II**).

2. Réalisation des enquêtes

Les enquêtes se sont déroulées du 7 janvier au 25 février 2016, avec l'aide de Toofa Natua (agent du SDR de Raiatea) qui a permis des interactions plus aisées avec les interlocuteurs parlant préférentiellement Tahitien. Les rencontres avec les habitants ont été faites au hasard, directement sur les lieux d'habitation, en fonction de la présence ou non des personnes à leur domicile. Pour les exploitants, la même méthode a été employée dans les *faapu*, complétée par une prise de rendez-vous avec les plus importants exploitants agricoles de la vallée.

L'entretien débutait avec une présentation de l'étude et rappelait qu'elle répondait à la demande formulée par la population locale lors de la réunion publique du 8 Juin 2015. Il était suivi d'informations sur les sites étudiés dans la baie et la rivière de Faaroa, et les types d'analyses effectuées, afin d'inciter les personnes interrogées à participer à la surveillance du matériel déployé pendant deux semaines sur le terrain.

Les personnes interrogées étaient informées du caractère anonyme des questionnaires. Au terme de l'entretien, elles étaient invitées à la réunion de restitution des résultats de l'étude planifiée pour le 13 juin 2016.

[2] Nom tahitien pour « champs »

3. Traitement des données

Les données obtenues ont été géo-référencées (système d'information géographique SIG) puis représentées cartographiquement à l'aide du logiciel ArcGis.

B. Sites d'étude pour les analyses physico-chimiques et biologiques

Dix sites d'étude ont été sélectionnés selon un gradient de pression anthropique (gradient d'activités agricoles et d'élevage ; **Figure 2**) :

- S1 : site « témoin » à l'extrémité de la baie ;
- S2 à S7 : sites de part et d'autre de la baie, à différentes distances de l'embouchure ;
- S8 : site « embouchure » ;
- S9 et S10 : sites « rivière » (S9 répond à une demande de la population qui souhaitait des analyses à proximité du poulailler de Faaroa ; S10 correspond au lieu de baignade des enfants où des problèmes cutanés ont été signalés).

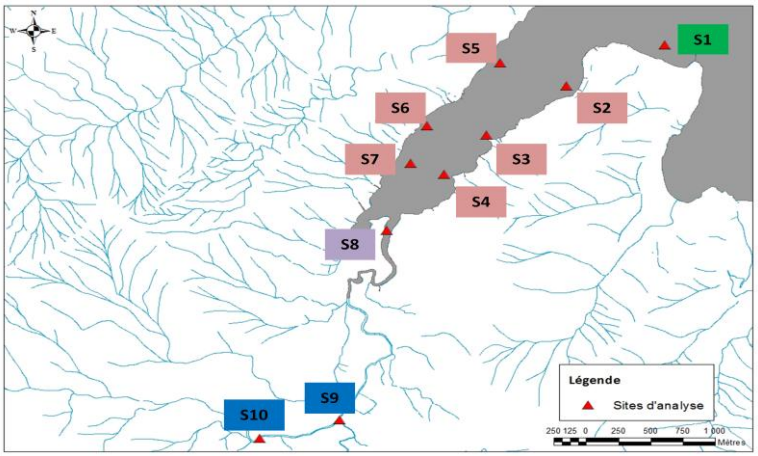


Figure 2 : Localisation des sites d'étude dans la baie et la rivière de Faaroa (profondeur des sites de la baie, S1 à S7 : ≈ 10 m).

C. Analyses physico-chimiques et bactériologiques

Les mesures présentées ci-dessous ont été effectuées sur des échantillons d'eaux prélevés en Février et Mars 2016, à environ 1.5 m de profondeur pour les sites de la baie et environ 50 cm pour les sites de la rivière, à l'aide d'une bouteille de prélèvement NISKIN (Hydro-Bios). Certaines mesures (analyses de pesticides) ont également été effectuées sur des échantillons de sédiment prélevés à l'aide d'une benne Van Veen (Anhydre).

1. Analyse des paramètres environnementaux classiques

Dans chaque site, les paramètres suivants ont été mesurés :
- température, radiations lumineuses photosynthétiquement actives (PAR ; capteurs HOBO Onset Prosensor) ;
- salinité, concentration en oxygène dissous, pH (sonde multi-paramètre, YSI 650 MDS).

2. Analyse des éléments nutritifs

Les analyses des concentrations en ammonium (NH_4^+) ont été réalisées par fluorimétrie (fluorimètre TRILOGY, Turner Designs), à partir du protocole de Holmes *et al*. (1999). Les autres éléments nutritifs (nitrates NO_3^-, nitrites NO_2^-, silicates $Si(OH)_4$, phosphates PO_4^{3-}) ont été quantifiés au CRIOBE[3], à l'aide d'un auto-analyseur TECHNICON, après conservation des échantillons à -20°C dans des flacons opaques.

L'ensemble de ces analyses ont été effectuées en triplicatas.

[3] Centre de Recherches Insulaires et Observatoire de l'Environnement, Moorea

3. Analyse bactériologique

L'enquête ayant révélé l'absence de systèmes d'assainissement dans certaines habitations et la présence d'un grand nombre de systèmes d'assainissement défectueux, des analyses bactériologiques ont été effectuées afin de détecter la présence potentielle de bactéries fécales et de recueillir ainsi des informations complémentaires sur la qualité de l'eau des sites étudiées. Ces analyses ont été effectuées par la méthode d'impédancemétrie (instrument Xplorer) à l'Institut Louis Malardé (ILM), à partir d'échantillons prélevés le 18 février (après un épisode de forte pluie) et le 3 mars (après quelques jours sans pluie). La qualité de l'eau a été évaluée à partir de la comparaison des concentrations en *Escherichia coli* et entérocoques mesurées dans les sites avec les concentrations seuils établies par la Directive 2006/7/CE du 15/02/06 (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Normes décrites par la Directive 2006/7/CE du 15/02/06, circulaire DGS/EA4/2014/166 du 23/05/2014 pour l'évaluation de la qualité des eaux de baignade.

Normes	E. *coli* Nb/100mL	Entérocoques Nb/100mL	Qualification du prélèvement
Eau de mer	≤ 100	≤ 100	Bonne
	> 100 et ≤ 1000	> 100 et ≤ 370	Moyenne
	> 1000	> 370	Mauvaise
Eau douce	≤ 100	≤ 100	Bonne
	> 100 et ≤ 1800	> 100 et ≤ 660	Moyenne
	> 1800	> 660	Mauvaise

4. Analyse des pesticides

Au total, 32 composés ont été analysés dans l'eau et les sédiments : acétochlore, alachlore, atrazine, azoxystrobine, carbendazime, chlortoluron, DCPMU (3-(3,4-dichlorophenyl)-1-methylurea), DCPU (3,4-dichlorophenylurea), DEA (Deséthylatrazine), DET (Deséthyl terbutylazine), DIA (Deisopropyl-atrazine), dimethomorphe, diuron, epoxiconazole, flazasulfuron, imidaclopride, isoproturon, linuron, metalaxyl, métalochlore, oxadixyl, penconazole, prochloraze, propyzamide, prosulfocarbe, pyrimethanil, simazine, simazine epoxy, tebuconazole, terbuthylazine hydroxy, terbutylazine et tetraconazole. Ces composés correspondent principalement à des substances herbicides et fongicides.

a) Echantillonnage d'eaux et extraction des pesticides

Echantillonnages passifs : Des POCIS (Polar Organic Chemical Integrative Samplers), échantillonneurs passifs ciblant les composés organiques polaires tels que les pesticides, ont été utilisés dans le cadre de cette étude (Alvarez *et al.*, 2004).(**Figure 3**) (**Annexe III**).

La phase réceptrice des POCIS est maintenue entre deux membranes de diffusion microporeuses (pores de 0.1 µm) en polyéthersulfone (PES ; membranes hydrophiles), elles-mêmes insérées entre deux anneaux métalliques en acier inoxydable. Ces échantillonneurs présentent une surface totale d'échange de 41 cm^2.

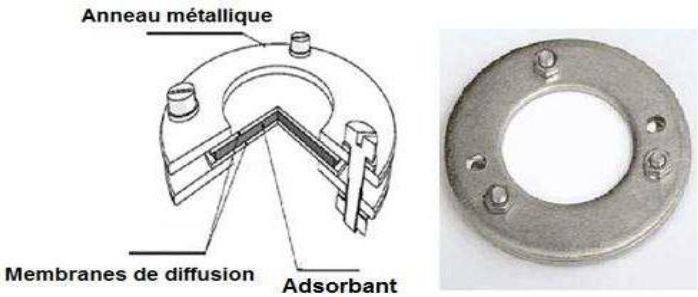


Figure 3 : Schéma des POCIS. *Source : Ibrahim, 2013.*

La phase réceptrice des POCIS est constituée d'un adsorbant solide en N-vinylpyrrolidone-divinylbenzène adapté aux composés organiques polaires, notamment aux herbicides, quel que soit le pH (Alvarez *et al*., 2004, Mazzella *et al*., 2007). Au total, 30 POCIS ont été déployés dans l'eau (3 POCIS par site d'étude), à une profondeur d'environ 1.5 m. Ils ont été retirés 2 semaines après leur déploiement, rincés à l'eau milli-Q, puis la phase réceptrice des POCIS a été transférée sur des cartouches SPE en polypropylène, et séchées grâce à une unité de filtration sous vide (Nalgène). Les cartouches ont ensuite été éluées au LGEI à Alès avec de l'acétonitrile (**Figure 4**)

Echantillonnages ponctuels : Des échantillonnages d'eau (1 L) ont été effectués au moment du déploiement (**T_i**) (16 et 17 février 2016) puis lors retrait (**T_f**) (1er et 3 mars 2016) des POCIS. Chaque prélèvement a été divisé afin d'obtenir deux réplicats de 500 mL par site. Ainsi 40 échantillons au total ont été obtenus à l'issue des deux campagnes. Les échantillons d'eau ont été extraits sur des cartouches Oasis HLB grâce à une unité de filtration sous vide (Nalgène). Les cartouches ont ensuite été éluées au LGEI à Alès avec de l'acétonitrile (**Figure 4**).

b) Analyses des échantillons par HPLC-MS/MS

Les extraits ont été analysés par chromatographie en phase liquide couplée à de la spectrométrie de masse (HPLC-MS/MS). La phase stationnaire correspond à une colonne en phase inverse Kinetex C18 (Phenenex). La phase mobile est constituée d'eau milli-Q et d'acétonitrile, tamponnées avec de l'acide formique. Le chromatographe (Waters) est couplé à un spectromètre de masse triple quadripôle Micromass Quattro micro API (Waters). Les spectres de masses sont exploités avec le logiciel MassLynx de Waters ; son interface QuantLynx permet la quantification des substances cibles à partir des ions spécifiques.

c) Extraction des pesticides des échantillons de sédiment

Les échantillons *de* sédiments prélevés ont été stockés à -20°C puis lyophilisés. Ils ont ensuite été tamisés (maillage : 200 µm).

Les sédiments ont ensuite été extraits au laboratoire LGEI d'Alès par la technique d'ASE (Accelerated Solvent Extraction) sur DIONEX ASE 350 avec un mélange acétone-hexane (1/1), puis purifiés sur cartouche Strata SAX (Strong Anion Exchange, 1000 mg) en utilisant le système Visiprep (**Figure 4**).

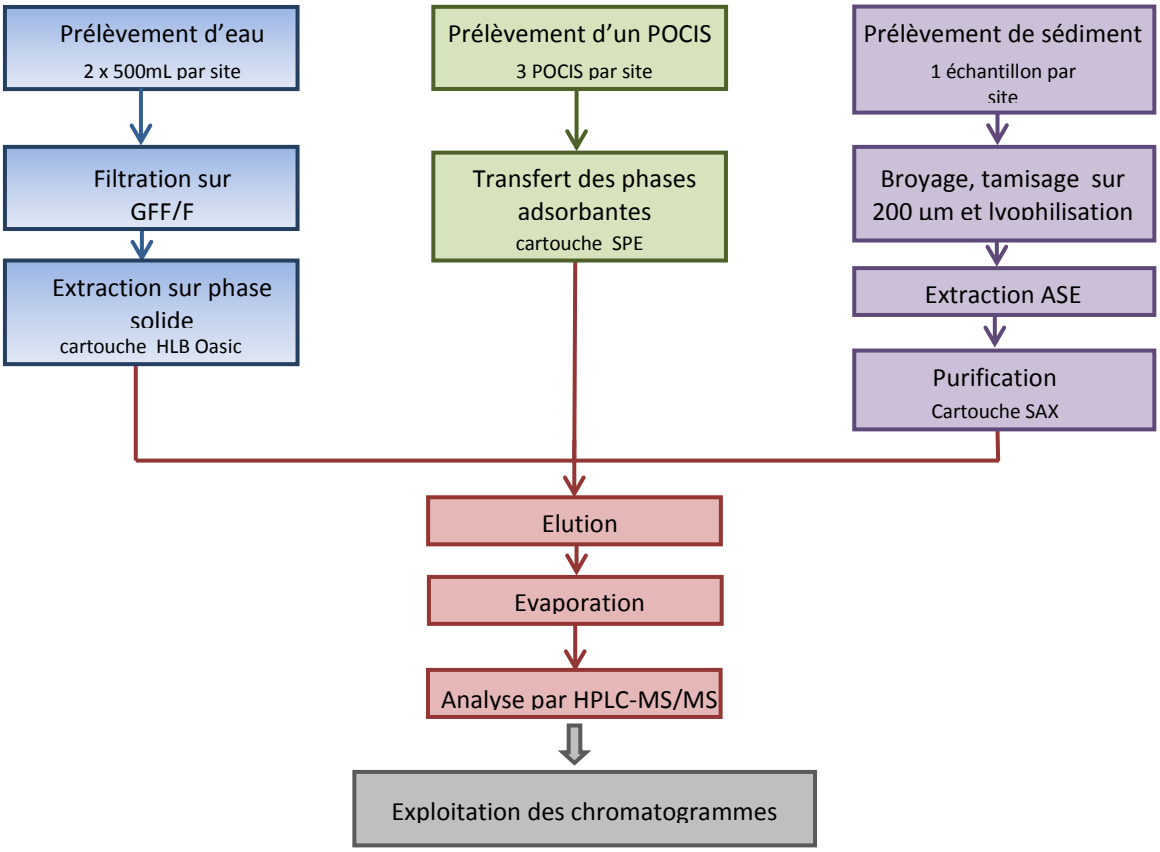


Figure 4 : Présentation générale de la méthode d'extraction et d'analyse des échantillons d'eau, des POCIS et des sédiments. L'ensemble des échantillons ont été dopés avec un étalon interne d'extraction (atrazine) et les éluats avec un étalon interne d'injection (simazine) afin de garantir la justesse des analyses.

D. Analyse des communautés phytoplanctoniques

Dans chaque site d'étude, 10 L d'eau ont été prélevés à l'aide de la bouteille de prélèvement NISKIN, à 1.5 mètre de profondeur. Ils ont ensuite été préfiltrés sur une soie de 200 µm (la préfiltration permet le retrait des éventuels débris ainsi que le retrait d'un maximum de zooplancton afin de minimiser la prédation en attendant le traitement des échantillons). Les échantillons d'eau ont été stockés à l'obscurité et au frais (glacière) avant d'être traités au laboratoire du SDR de Raiatea.

1. *Mesures des concentrations en chlorophylle a (Chla)*

L'analyse de la Chl*a* dans des échantillons d'eau est utilisée comme proxy de la biomasse phytoplanctonique. Des filtrations fractionnées ont été réalisées (utilisations de filtres GF/F et de 2µm, et d'une soie de 20µm) afin d'obtenir les concentrations en Chl*a* des différentes classes de taille du phytoplancton (< 2 µm : pico-phytoplancton ; 2-20 µm : nano-phytoplancton, et 20 et 200 µm : micro-phytoplancton), ainsi que la concentration totale en Chl*a*.

Les analyses ont été réalisées de la manière suivante : filtration de 500 mL d'eau, conservation des filtres à -20°C, extraction de la Chl*a* avec de l'acétone à 90% puis détermination des concentrations en Chl*a* par fluorimétrie (méthode de Welschmeyer *et al*., 1994 ; fluorimètre TRILOGY, Turner Designs). Elles ont été réalisées en triplicatas.

2. *Chémotaxonomie*

L'HPLC est une méthode très sensible pour la séparation, l'identification et la quantification des pigments des communautés phytoplanctoniques (Jeffrey *et al*., 1999). L'étude de nombreuses souches de phytoplancton a permis aux scientifiques de constater que certaines classes algales contiennent des empreintes pigmentaires particulières (Jeffrey *et al*., 1997). Ils ont ainsi pu constituer une liste de pigments marqueurs de différents groupes taxonomiques (pigments diagnostics ; **Tableau 3**).

Pour chaque site, 500 mL d'échantillon d'eau ont été filtrés (filtre GF/F). Les filtres ont ensuite été conservés à – 180°C (azote liquide) puis – 80°C avant d'être envoyés dans de la carboglace à l'Université de Liège où ils ont été analysés (Laboratoire d'Océanologie, A. Goffart). L'extraction des pigments a été réalisée par sonication dans du méthanol selon la technique décrite dans Vidussi *et al*. (2000). Les pigments ont ensuite été séparés par HPLC selon la technique décrite dans Zapata *et al*. (2000), puis quantifiés à l'aide du logiciel Empower de Waters. Au total, 15 pigments ont été séparés et quantifiés : 3 chlorophylles (chlorophyle *a*, divinyl chlorophylle *a* et chlorophyle *b*) et 12 caroténoides (peridinine, 19'-butanoloxxfucoxanthine, fucoxanthine, neoxanthine, prasinoxanthine, violaxanthine, 19'-hexanoloxyfucoxanthine, diadinoxanthine, alloxanthine, diatoxanthine, zeaxanthine et luteine). Les courbes de calibration ont été réalisées à partir de pigments purifiés (DHI, Danemark). L'abondance de chaque groupe phytoplanctonique a été déterminée en utilisant les correspondances taxonomiques des pigments diagnostics présentées dans Gin *et al*. (2003 ; **Tableau 3**). Ces analyses ont été réalisées en triplicatas dans chaque site.

Tableau 3 : Signature pigmentaire des 6 principaux groupes taxonomiques du phytoplancton (d'après Goffart *et al*., 2014).

Groupes taxonomiques	Pigments diagnostics
Dinophycée	Peridine
Diatomophycée	Fucoxanthine
Prymnesiophycée	Hexanoyloxyfucoxanthine
Cryptophycée	Alloxanthine
Cyanophycée	Zeaxanthine
Prasinophycée + Chlorophycée	Neoxanthine + Prasinoxanthine + Violaxanthine + Luteine + Chl b

E. Analyses statistiques

Pour les analyses réalisées en triplicatas, les moyennes et les erreurs-standards ont été calculées.

Afin d'étudier le rôle des facteurs environnementaux sur la structure des communautés phytoplanctoniques, des analyses en composantes principales (ACP) ont été réalisées sur les données (i) des caractéristiques physico-chimiques des 10 sites, (ii) des caractéristiques des

signatures pigmentaires des communautés phytoplanconiques des 10 sites et (iii) sur l'ensemble des données physico-chimiques et biologiques des 10 sites.

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel XlStat.

III. Résultats

A. Enquêtes

La réunion publique, organisée le mercredi 20 janvier 2016 dans le cadre du lancement de l'étude, a montré l'intérêt certain que porte la population de Faaroa au sujet de la qualité des eaux de leur rivière et de leur « *garde manger* » (c'est ainsi que les polynésiens nomment leur lagon), puisque qu'environ 70 personnes étaient présentes le soir de la réunion (**Figure 5**). La présentation de l'étude a permis (i) de sensibiliser la population sur l'importance de la qualité de leur environnement, (ii) d'impliquer la population dans l'étude, notamment en leur confiant la surveillance du matériel d'étude, (iii) de préparer la population à l'enquête afin de recueillir un maximum de données fiables lors des entretiens.

Les enquêtes s'étant déroulées avec Toofa Natua, agent du SDR, originaire de Raiatea et connaissant l'ensemble des agriculteurs et éleveurs de Faaroa, l'approche avec la population a été facilitée. La traduction en Tahitien effectuée par Toofa, quand cela était nécessaire, a également permis de recueillir des informations majeures malgré la barrière de la langue. L'accompagnement de cet agent du SDR lors des entretiens a donc constitué un soutien fort qui a permis de mettre en confiance les habitants (seulement 1 personne sur les 165 interrogées n'a pas souhaitée participer à l'enquête), de garantir une bonne compréhension des questions posées, et d'optimiser la qualité des données obtenues (**Tableau 4**).

Figure 5 : Réunion publique du Mercredi 20 Janvier à Faaroa

Au total, 165 personnes ont été interrogées : 96 foyers, 63 exploitants (agriculteurs et éleveurs), 3 entreprises et 3 établissements publics

(**Tableau 4**).

Concernant les exploitants interrogés, 57 font partie des 128 agriculteurs recensés par le SDR (possession d'une carte agriculteur) ; les 6 autres ne sont non recensés par le SDR.

Tableau 4 : Informations sur les personnes enquêtées (habitants et exploitants dans la vallée de Faaroa).

	Détails
96 foyers	427 habitants (4.4 personnes /foyer)
63 exploitants	60 agriculteurs
	3 éleveurs
3 entreprises	2 pensions
	EDT
3 établissements publics	Collège de Faaroa
	CFPA (Centre de Formation Professionnelle des Adultes)
	CJA (Centre pour Jeunes Adolescents).

1. Exploitants

Sur les 68.7 ha de parcelles exploitées recensées par le SDR, 38.8 ha ont fait l'objet de l'enquête, soit 56.5% de la surface. Les parcelles enquêtées mais non recensées par le SDR, représentent quand à elle 5.6 ha (**Figure 6A**).

Sur les 44.4 ha de parcelles enquêtés, 79.6% sont traités avec des pesticides, parmi elles 93.5% le sont avec des herbicides et 42.6% avec des insecticides et 47.7% sont à moins de 100 m d'un court d'eau (**Figure 6B**). Sur les 32.9 ha traités avec les herbicides, 60.5% le sont avec du glyphosate et 56.8% avec du paraquat, aux doses respectives de 20.1 $L.an^{-1}.hectare^{-1}$ pour le glyphosate et de 34.2 $L.an^{-1}.hectare^{-1}$ pour le paraquat.

Par ailleurs, sur les 44.4 ha de parcelles enquêtés, 62.0% sont traités avec des engrais, avec une dose moyenne d'utilisation de 104.3 $kg.an^{-1}.hectare^{-1}$.

Concernant les activités d'élevage, trois exploitations ont été recensées dans la vallée de Faaroa : 1 élevage de poules pondeuses (≈ 11 000 bêtes), 1 élevage bovin (≈ 8 bêtes) et 1 élevage porcin (≈ 20 bêtes). Aucune de ces exploitations ne possède de système d'assainissement.

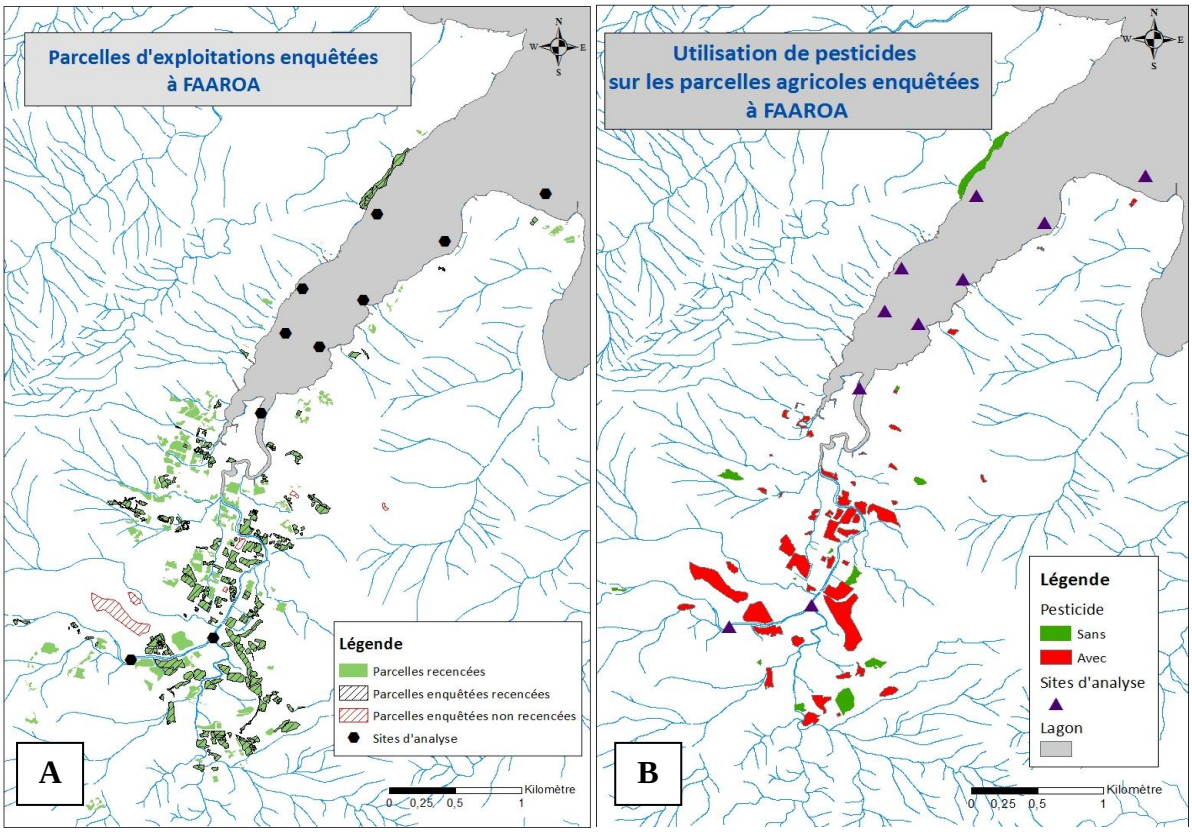


Figure 6 : Représentations cartographiques des parcelles enquêtées et/ou recensées par le SDR à Faaroa (**A**), et de l'utilisation de pesticides sur les parcelles agricoles enquêtées à Faaroa (**B**).

2. Habitants

Sur l'ensemble des foyers enquêtés, 60.4% utilisent des pesticides. Il s'agit principalement d'insecticides (89.7% des foyers en utilisent) et d'herbicides (22.4% des foyers en utilisent).

Par contre, seuls 2.3% des foyers utilisent des engrais.

Concernant les activités d'élevage, elles sont recensées dans un foyer sur quatre. Dans 70.8% des cas, il s'agit d'élevage de poules ou de coqs de combat ; et, dans 29.2% des cas, il s'agit d'élevage de cochons.

Concernant les déchets ménagers, 78.1% des foyers en brûlent, 24% en enterrent, 27.1% en mettent à la poubelle et 46.9% en déposent aux points d'apports volontaires. Pour les huiles de vidange, dans 34.3% des cas, elles ne sont pas rapportées à un garage automobile mais sont utilisées : dans le *faapu* autour des *fei*[4] (répulsif contre les fourmis), ou pour le traitement du bois contre les termites, ou comme lubrifiant pour les pièces mécaniques (voitures ou engins agricoles), ou comme combustibles pour brûler les déchets verts du *faapu*. Concernant les batteries usagées, 82.2% des foyers les déposent aux points d'apports volontaires et 17.8% les stockent dans la cour (à même la terre) ou les enfouissent dans le sol. Quant aux piles usagées, 75.7% des foyers enquêtés les déposent dans des lieux de collectes (commerces, écoles, maries) alors que 24.3% les jettent à la poubelle ou les enfouissent dans le sol.

[4] Nom tahitien pour une variété de banane.

Concernant les systèmes d'assainissement des habitations, près d'un sur trois présente un défaut (débordements réguliers de la fosse septique, 58.1% ; ou absence de fosse sceptique, 41.9%).

3. Entreprises et établissements publics

Les entreprises questionnées utilisent ponctuellement de petites doses d'insecticides. Par ailleurs, elles disposent toutes d'un système d'assainissement des eaux usées.

B. Caractérisation physico-chimique des sites d'étude

1. Variables environnementales

Les valeurs de température de l'eau, d'intensité lumineuse, de salinité, de concentration en oxygène dissous et de pH, dans chacun des sites, sont présentées dans le **Tableau 5.** La température moyenne de l'eau dans les sites de la baie est d'environ 30 °C alors qu'elle avoisine 25°C dans les sites de la rivière. Les sites disposent d'une luminosité moyenne contrastée allant de 234 µmol photons.m^{-2}.s^{-1} pour S10 en rivière à 4124 µmol photons.m^{-2}.s^{-1} pour S8 situé à l'embouchure. La salinité est d'environ 34.7 pour l'eau de la baie (S1 à S7), de 18.6 à l'embouchure (S8) et nulle pour les sites en rivière (S9 et S10). Les mesures de pH varient de 7.9 (S4) à 8.3 (S8). La teneur en oxygène dissous est minimale pour les sites proches de l'embouchure de la rivière (S8 et S4) et maximale pour les sites en rivière (S9 et S10).

Tableau 5 : Paramètres physico-chimiques mesurées dans les sites d'étude (S1 à S10). T moy : Température moyenne ; Lum moy : Luminosité moyenne ; Sal : Salinité ; [O_2] : concentration en oxygène dissous. Pour les concentrations en NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-, $Si(OH)_4$ et PO_4^{3-}, les valeurs indiquées correspondent à la moyenne ± l'erreur-standard (n = 3).

	T moy	Lum moy	Sal	[O_2]	pH	[NH_4^+]	[NO_2^-]	[NO_3^-]	[$Si(OH)_4$]	[PO_4^{3-}]
unité	°C	µmol photon s.m^{-2}.s^{-1}		mg. L^{-1}		µg.L^{-1}	µg.L^{-1}	µg.L^{-1}	µg.L^{-1}	µg.L^{-1}
S1	29,8	3 035	34,9	45	8,2	**2,1** ± 0.1	**2,4** ± 0.1	**14,7** ±0.5	**816** ± 17	**14,6** ± 1.8
S2	30,0	2 208	35,0	44	8,2	**1,0** ± 0.5	**1,1** ±0.3	**9,9** ±0.6	**440** ± 6	**17,8** ± 3.5
S3	30,0	2 404	34,7	42	8,0	**1,5** ± 0.2	**2,5** ±0.1	**19,4** ±0.9	**844** ± 5	**28,9** ± 1.4
S4	30,2	1 794	33,9	38	7,9	**1,2** ± 0.1	**0,9** ±0.1	**4,9** ±0.1	**861** ± 29	**14,2** ± 2.4
S5	30,1	3 920	33,8	50	8,0	**1,9** ± 0.3	**1,4** ±0.0	**5,9** ±0.0	**1 609** ± 14	**15,5** ± 1.7
S6	30,1	2 408	33,4	119	8,2	**6,7** ± 1.6	**1,1** ±0.0	**15,4** ±1.0	**1 990** ± 103	**20,9** ± 0.4
S7	30,0	1 355	33,9	115	8,2	**0,6** ± 0.2	**1,0** ±0.1	**9,4** ±1.0	**1 871** ± 220	**16,6** ± 1.1
S8	27,4	4 124	18,6	68	8,3	**34,9** ± 1.7	**2,5** ±0.1	**63,2** ±4.4	**6 201** ± 170	**18,7** ± 0.0
S9	25,4	1 340	0,0	113	8,1	**53,0** ± 0.2	**4,1** ±0.2	**72,8** ±2.0	**5 715** ± 395	**44,0** ± 1.2
S10	25,0	234	0,0	133	8,1	**4,2** ± 1.3	**3,1** ±0.4	**40,5** ±1.3	**6 562** ± 630	**60,7** ± 2.1

2. Concentrations en éléments nutritifs

Les concentrations en sels nutritifs dans les différents sites sont également indiquées dans le **Tableau 5**. Les valeurs maximales sont retrouvées dans les sites en rivière (S9 et S10) et à l'embouchure (S8), à l'exception de l'ammonium que l'on trouve en faible quantité dans le site S10.

3. Concentrations en bactéries fécales et évaluation de la qualité des eaux par rapport à ce critère

Les analyses effectuées après un épisode de pluie (18 Février, 67.3 mm de pluie durant 24h, données météo France pour Opoa) indiquent une « Bonne » qualité de l'eau pour le site S2, une qualité « Moyenne » des eaux pour les sites S1, S3, S4, S5, S6, S7 et S10, et une « Mauvaise » qualité des eaux pour les sites S8 et S9 (**Tableau 6**).

Les analyses effectuées par temps « plus sec » (3 mars, 16.6 mm de pluie en 24h, données météo France pour Opoa) conduisent à des conclusions identiques, à l'exception du site S9 qui rentre dans la catégorie qualité « Moyenne » **(Tableau 6)**.

Tableau 6 : Concentrations en *Escherichia coli* et entérocoques dans l'eau des différents sites d'étude (S1 à S10) et interprétation de la qualité des eaux d'après la norme Normes décrites par la Directive 2006/7/CE du 15/02/06, circulaire DGS/EA4/2014/166 du 23/05/2014 pour l'évaluation de la qualité des eaux de baignade.

		18-févr			03-mars		
Sites	**Eau**	E. *coli* Nb/100mL	Entérocoques Nb/100mL	Interprétation Qualité ponctuelle	E. *coli* Nb/100mL	Entérocoques Nb/100mL	Interprétation Qualité ponctuelle
S1	mer	144	30	Moyenne	143	15	Moyenne
S2	mer	61	15	Bonne	77	15	Bonne
S3	mer	330	160	Moyenne	640	61	Moyenne
S4	mer	330	177	Moyenne	161	15	Moyenne
S5	mer	764	125	Moyenne	365	61	Moyenne
S6	mer	438	232	Moyenne	125	61	Moyenne
S7	mer	640	127	Moyenne	126	15	Moyenne
S8	mer	2 759	1 794	Mauvaise	661	412	Mauvaise
S9	douce	8 329	9 329	Mauvaise	270	177	Moyenne
S10	douce	412	368	Moyenne	160	266	Moyenne

4. Concentrations en pesticides dans le sédiment et l'eau

Sur les 32 composés analysés 12 ont été détectés (acétochlore, alachlore, atrazine, chlortoluron, DCPMU, DCPU, diuron, imidaclopride, flazasulfuron, metolachlore, oxadixyl et prosulfocarbe) et 6 ont été quantifiés (un exemple de chromatogramme obtenu par analyse HPLC est présenté en **Annexe IV**). Parmi les composés détectés, 3 correspondent à des herbicides de la famille des chloracétanilides (l'acétochlore, l'alachlore et le métolachlore), 2 correspondent à des herbicides de la famille des urées (le diuron et le DCPU, métabolite du diuron) et 1 correspond à un insecticide de la famille des néonicotinoïdes (l'imidaclopride ; **Tableau 7**).

Sur l'ensemble des résultats, les concentrations en pesticides varient entre 0.2 et 14.7 $ng.L^{-1}$ dans l'eau (pour S10 et S3, respectivement), et entre 10.04 et 27.43 $ng.g^{-1}$ de poids sec dans le sédiment (pour S8 et S9, respectivement; **Tableau 7**).

L'acétochlore a été quantifié sur le site S8 par échantillonnage passif (POCIS), l'alachlore sur le site S3 par l'échantillonnage passif (POCIS), le diuron sur le site S9 par l'échantillonnage passif (POCIS), l'imidaclopride sur les sites S1 et S10 par échantillonnage passif et S7 et S8 par échantillonnage ponctuel (Tf).

Les résultats des contaminants présents dans l'eau ne montrent qu'une faible répétabilité entre les méthodes d'échantillonnage (passive et ponctuelle), et les prélèvements ponctuels (T_i et

T_f). Cette faible répétabilité peut être attribuée aux faibles quantités de pesticides détectées, souvent proches des limites de quantification.

Dans les sédiments, l'acétochlore, l'alachlore, le DCPU et le métolachlore ont été quantifiés dans les sites en rivière (S9 et S10) et à l'embouchure (S8). Dans les sédiments de la baie, aucun pesticide n'a été quantifié.
Dans l'embouchure, 2 pesticides ont été quantifiés (acétochlore : 9.28 $ng.L^{-1}$ et métolachlore : 0.2 $ng.L^{-1}$), et dans la rivière, 4 pesticides à S9 (acétochlore : 3.24 $ng.L^{-1}$, alachlore : 21.35 $ng.L^{-1}$, 2.08 DCPU : $ng.L^{-1}$ et métolachlore : 0.76 $ng.L^{-1}$) et 1 pesticide à S10 (alachlore : 15.09 $ng.L^{-1}$).

5. Caractérisation des sites d'étude en fonction des variables environnementales

L'ACP réalisée à partir de l'ensemble des données physico-chimiques permet un classement des sites en 4 groupes principaux : 1 groupe est formé par l'ensemble des sites de la baie et les 2 sites en rivière et celui de l'embouchure sont individualisés (**Figure 7B**). Les axes F1 et F2 expliquent 85.92% de la variabilité totale. Les variables qui contribuent le plus à l'axe F1 sont la température (11.2%), la salinité (11.5%), l'ammonium (9.2%), les nitrites (9.4%), les nitrates (11.5%) et les silicates (10.4%) (**Figure 7A**). Les variables qui contribuent le plus à l'axe F2 sont la luminosité (32.6%), le phosphate (16.4%), l'acétochlore (16.3%), l'alachlore (9.2%) et le métolachlore (13.7%). La position des sites de la baie et de la rivière sont expliqués principalement par l'axe F1, et la position du site de l'embouchure S8 par l'axe F2 (cosinus carré des observations les plus grands).

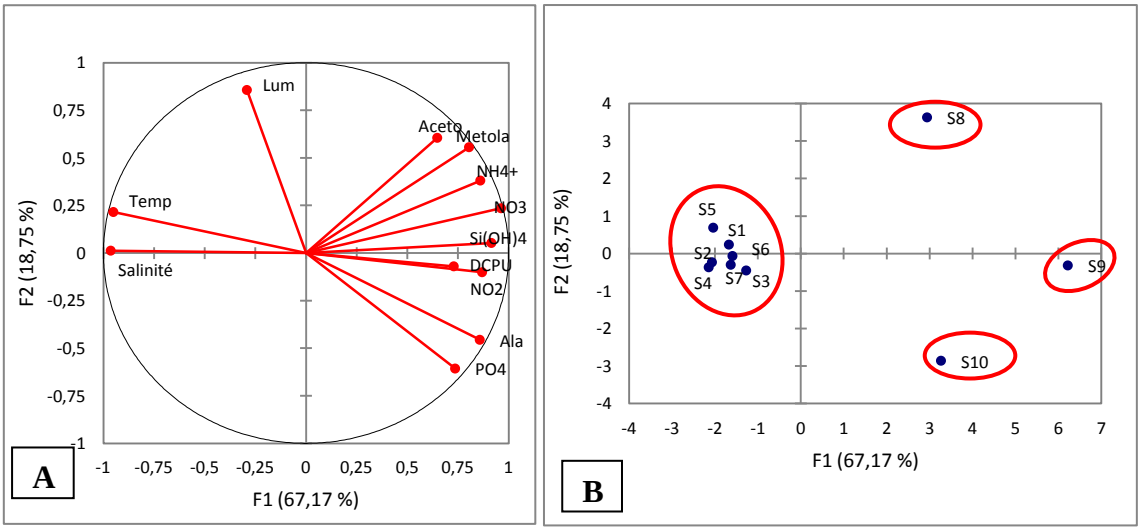


Figure 7 : ACP, variables : caractéristiques physico-chimiques, observations: 10 sites de FAAROA. Cercle de corrélation **(A)**, Biplot (**B**).

Tableau 7 : Concentration des 12 composés détectés sur les 10 sites de Faaroa. Eau : compartiment eau ; Séd = compartiment sédiment. Pour le compartiment eau : Ti = prélèvement au temps initial, Tf = prélèvement au temps final, Passif = échantillonneur passif. ND = Non détecté, <LD = inférieur à la limite de détection, <LQ = Inférieur à la limite de quantification. Sont indiquées en rouge les concentrations détectées dans l'eau (en $ng.L^{-1}$) et dans les sédiments (en $ng.g^{-1}$ de poids sec).

	S1				S2				S3				S4				S5			
	Eau			Séd	Eau			Séd	Eau			Séd	Eau			Séd	Eau			Séd
	Ti $ng.L^{-1}$	Tf $ng.L^{-1}$	Passif $ng.L^{-1}$	$ng.g^{-1}$	Ti $ng.L^{-1}$	Tf $ng.L^{-1}$	Passif $ng.L^{-1}$	$ng.g^{-1}$	Ti $ng.L^{-1}$	Tf $ng.L^{-1}$	Passif $ng.L^{-1}$	$ng.g^{-1}$	Ti $ng.L^{-1}$	Tf $ng.L^{-1}$	Passif $ng.L^{-1}$	$ng.g^{-1}$	Ti $ng.L^{-1}$	Tf $ng.L^{-1}$	Passif $ng.L^{-1}$	$ng.g^{-1}$
Acetochlore	<LD	ND	<LD	<LD	<LQ	NA	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LQ	<LD	NA	<LD	<LQ	<LD	NA	<LD
Alachlor	<LQ	<LD	<LQ	<LD	<LQ	NA	<LQ	<LD	14,7	NA	<LQ	<LD	<LD	<LD	NA	<LQ	<LD	<LD	NA	<LQ
ATRAZINE	ND	ND	ND	ND	ND	NA	ND	ND	ND	NA	ND	ND	ND	ND	NA	ND	ND	ND	NA	ND
Chlortoluron	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	NA	<LD
DCPMU	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	NA	<LD
DCPU	<LD	<LQ	<LQ	ND	<LD	NA	<LQ	ND	<LD	NA	<LQ	ND	<LD	<LQ	NA	ND	<LD	<LD	NA	ND
DIURON	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	NA	<LD
Flazasulfuron	ND	ND	<LQ	ND	ND	NA	<LQ	ND	ND	NA	<LQ	ND	ND	<LD	NA	ND	ND	<LD	NA	ND
Imidaclopride	ND	<LD	0,5	ND	ND	NA	ND	ND	ND	NA	ND	ND	ND	ND	NA	ND	ND	ND	NA	ND
Metolachlor	<LD	<LD	<LD	ND	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	NA	<LD
Oxadixyl	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	<LD	NA	<LD	<LD	<LD	NA	<LD
Prosulfocarbe	ND	ND	<LQ	ND	ND	NA	<LQ	ND	ND	NA	<LQ	ND	ND	ND	NA	ND	ND	ND	NA	ND

	S6				S7				S8				S9				S10			
	Eau			Séd	Eau			Séd	Eau			Séd	Eau			Séd	Eau			Séd
	Ti $ng.L^{-1}$	Tf $ng.L^{-1}$	Passif $ng.L^{-1}$	$ng.g^{-1}$	Ti $ng.L^{-1}$	Tf $ng.L^{-1}$	Passif $ng.L^{-1}$	$ng.g^{-1}$	Ti $ng.L^{-1}$	Tf $ng.L^{-1}$	Passif $ng.L^{-1}$	$ng.g^{-1}$	Ti $ng.L^{-1}$	Tf $ng.L^{-1}$	Passif $ng.L^{-1}$	$ng.g^{-1}$	Ti $ng.L^{-1}$	Tf $ng.L^{-1}$	Passif $ng.L^{-1}$	$ng.g^{-1}$
Acetochlore	<LQ	<LD	<LD	<LD	<LQ	<LQ	<LD	<LQ	<LD	<LD	4,7	9,28	ND	<LD	<LQ	3,24	ND	<LD	<LQ	<LQ
Alachlor	<LD	<LD	<LQ	<LD	<LQ	<LD	<LQ	<LQ	<LD	<LD	<LD	<LD	<LQ	<LD	<LQ	21,35	<LD	<LD	<LQ	15,09
ATRAZINE	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<LQ	ND	ND	ND	<LQ
Chlortoluron	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LQ	<LD	<LD	<LD	<LQ
DCPMU	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LQ	<LD	<LD	<LD	<LQ	<LQ	<LD	<LD	<LQ	<LQ
DCPU	<LD	<LQ	<LQ	ND	<LD	<LQ	<LQ	ND	<LD	<LQ	<LQ	ND	<LD	<LQ	<LQ	2,08	<LQ	<LQ	<LQ	ND
DIURON	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LQ	<LD	<LD	<LD	1,6	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Flazasulfuron	ND	ND	<LQ	ND	ND	ND	<LQ	ND	ND	ND	<LQ	ND	ND	ND	<LQ	ND	ND	ND	<LQ	ND
Imidaclopride	ND	ND	ND	ND	ND	3,6	ND	ND	ND	ND	0,2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,2	<LQ
Metolachlor	<LD	<LD	<LD	ND	<LD	<LD	<LQ	<LD	<LD	<LD	ND	0,76	<LD	<LD	<LD	0,76	<LD	<LD	<LD	ND
Oxadixyl	<LD	<LD	<LD	<LD	ND	<LD	<LD	<LD	ND	<LD	<LD	<LD	ND	<LD	<LD	<LQ	ND	<LD	<LD	<LQ
Prosulfocarbe	ND	ND	<LQ	ND	ND	ND	<LQ	ND	ND	ND	<LQ	ND	ND	ND	<LQ	ND	ND	<LD	<LQ	ND

C. Caractérisation des communautés phytoplanctoniques

1. Abondance et classes de taille

Les sites possédant la biomasse phytoplanctonique la plus importante sont S8 (site embouchure), S7 et S6 (sites localisés sur la côte nord de la baie), avec respectivement des concentrations en Chl*a* de 2.3, 2.0 et 2.1 µg.L^{-1} (**Figure 8A**). Les sites possédant la plus faible biomasse phytoplanctonique sont localisés dans la rivière : 0.2 µg.L^{-1} pour S9 et 0.1 µg.L^{-1} pour S10 (**Figure 8A**).

L'organisation structurelle des communautés, en fonction des différentes classes de taille du phytoplancton (micro, nano et pico-phytoplancton) est présentée sur la **Figure 8B.** Peu de différence sont notées entre les sites, à l'exception du site S9 où on remarque une quasi-absence de microphytoplancton et du site S10 où on note une quasi-absence de picophytoplancton**.**

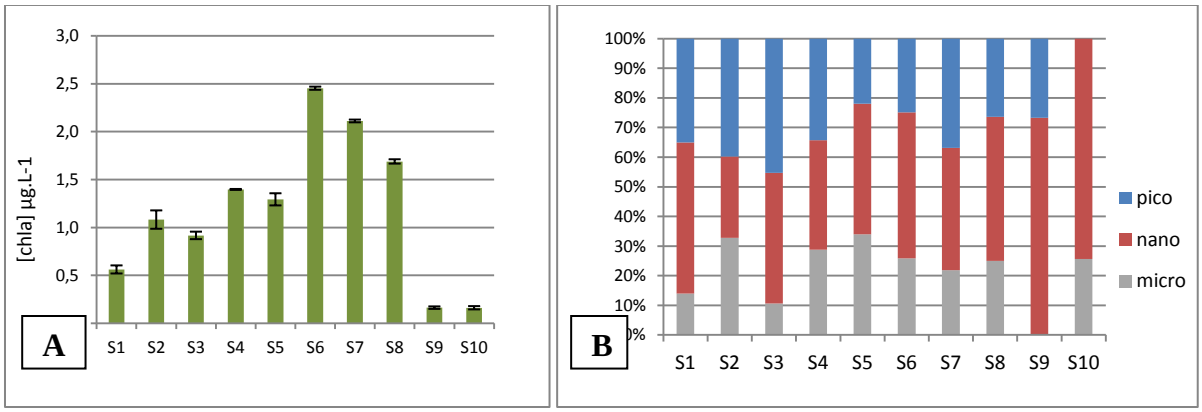


Figure 8 : Concentration en Chl*a* (moy. ± se) dans les sites d'étude **(A)** et organisation structurelle des communautés phytoplanctoniques en fonction de différentes **c**lasses de taille (micro : microphytoplancton ; nano = nanophytoplancton ; pico : picophytoplancton ; **B**).

2. Empreintes pigmentaires et structure des communautés

L'analyse chémotaxonomique réalisée à partir des 15 pigments analysés a permis de représenter l'organisation structurelle des communautés phytoplanctoniques en fonction de 6 grands groupes taxonomiques : diatomophycée, cyanophycée, prasinophycée + chlorophycée, prymnesiophycée, dinophycée et crytophycée **(Figure 9 et Annexe V)**. Les taxons les plus représentés sont les cyanophycées pour les sites S1 à S5 ; les diatomophycées pour les sites S6, S7 et S8 et les prasinophycées + chlorophycée pour les sites S9 et S10. Les sites de la baie sont caractérisés par la présence des 6 groupes taxonomiques, l'embouchure par l'absence de prymnesiophycée, le site S9 par l'absence de prymnesiophycée, dinophycée et de cryptophycée, et le site S10 par l'absence de dinophycée et de cryptophycée.

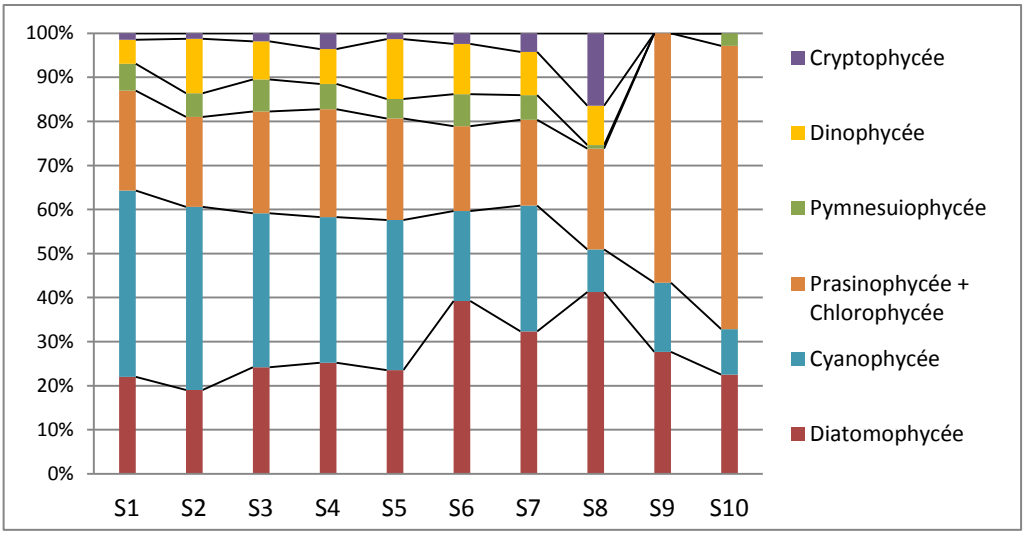
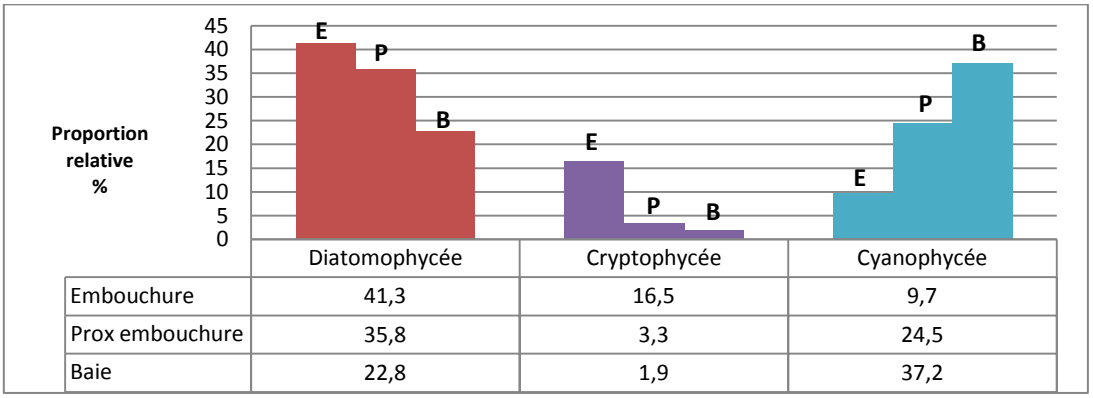


Figure 9 : Structure des communautés phytoplanctoniques pour chaque site de Faaroa.

Afin de mieux caractériser les différences de structure au sein des sites de la baie, ces sites ont été classés en 3 groupes selon un gradient d'éloignement depuis la rivière : (i) l'embouchure, (ii) les sites à proximité de l'embouchure (S7 et S6), (iii) les autres sites de la baie (S1 à S5). Les sites à proximités de l'embouchure ont été choisis en raison du courant qui part de la rivière et longe la rive gauche de la baie. Les résultats montrent une diminution de la quantité relative de diatomophycée et de crytophycée, et une augmentation de cyanophycée, lorsque l'on s'éloigne de la rivière **(Figure 10)**.



	Diatomophycée	Cryptophycée	Cyanophycée
Embouchure	41,3	16,5	9,7
Prox embouchure	35,8	3,3	24,5
Baie	22,8	1,9	37,2

Figure 10 : Proportion relative des diatomophycées, cryptophycées et cyanophycées dans la baie de Faaroa (E = site à l'embouchure (S8), P = sites à proximité de l'embouchure (S6 et S7), B = ensemble des autres sites de la baie (S1 à S5)).

3. Caractérisation des sites en fonction des variables biologiques

L'ACP réalisée à partir des données de concentrations pigmentaires permet de classer les sites en 5 groupes : les 2 sites rivière (S9 et S10), l'embouchure (S8), les sites proches de l'embouchure sur la rive gauche de la baie (S6 et S7), le site en dehors de la baie (S1) et enfin l'ensemble des autres sites de la baie (S2, S3, S4 et S5) **(Figure 11B)**. Les axes F1 et F2 expliquent 81.44% de la variabilité. Les variables qui contribuent le plus à l'axe F1 sont la

diadinoxanthine (10.4%), la chlorophylle b (9.8%), la péridinine (9.7%) et la diatoxanthine (9.5%). Les variables qui contribuent le plus à l'axe F2 sont la luteinine (26.4%), l'alloxanthine (25.0%) et la divinyl chlorophylle α (16.6%) **(Figure 11A)**. La position des sites S6, S7, S8 et S9 est principalement expliquée par l'axe F1, et la position du site de l'embouchure S8 par l'axe F2. Le tableau de corrélation (Pearson) réalisé à partir de l'ensemble des variables utilisées dans l'ACP est présenté en **Annexe VI**.

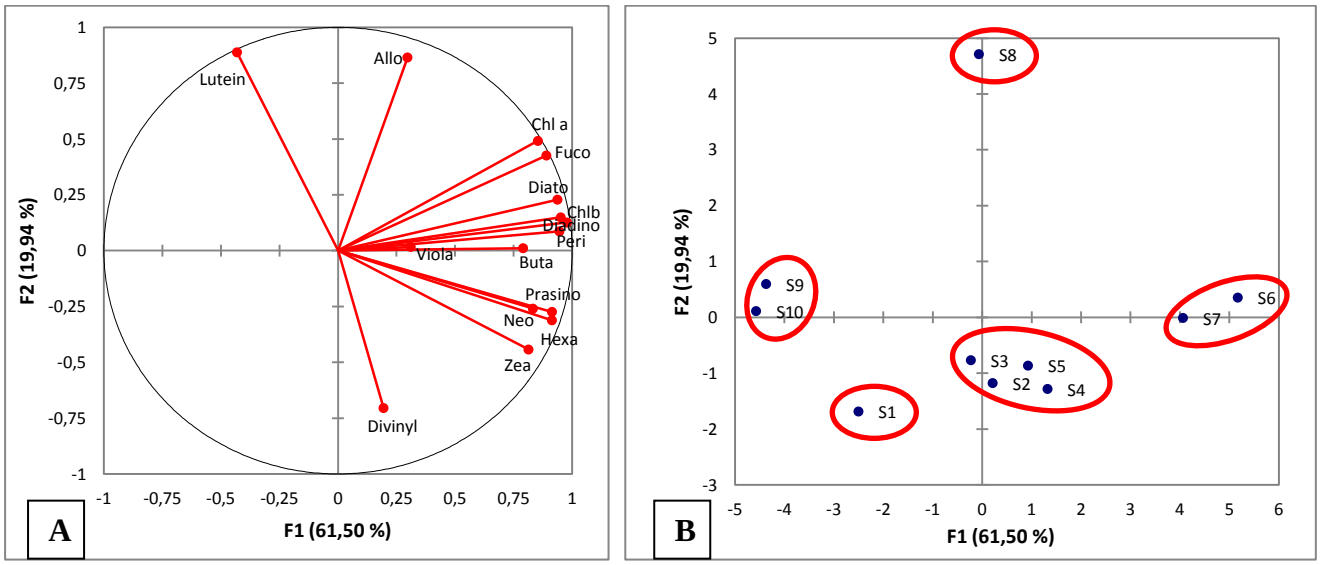


Figure 11 : ACP, variables: concentration pigmentaires, observations: 10 sites de Faaroa. Cercle de corrélation (**A**), Biplot (**B**).

4. Caractérisation des sites en fonction des paramètres environnementaux et de la structure des communautés phytoplanctoniques

L'ACP réalisée à partir de l'ensemble des paramètres environnementaux et de la structure des communautés phytoplanctonique permet le classement des sites en 4 groupes : 1 groupe est formé par l'ensemble des sites de la baie et les 2 sites en rivière et celui de l'embouchure sont individualisés (**Figure 12B**). Les axes F1 et F2 expliquent 80.46% de la variabilité. Les variables qui contribuent le plus à l'axe F1 sont la température (7.5%), la salinité (7.2%), le nitrate (7.2%), le nitrite (7.1%), et les cyanobactéries (7.1%). Les variables qui contribuent le plus à l'axe F2 sont les cryptophycées (20.0%), l'acetoxanthine (13.0%), les diatomophycées (12.8 %) et les prasinophycée / chlorophycés (10.6%) (**Figure 12A**). Le groupe des sites de la baie est situé à gauche de l'axe F1. Les sites en rivière et l'embouchure sont situés à droite sur l'axe F1, S8 est situé en haut de l'axe F2, S9 au milieu et S10 en bas. La position des sites de la baie hors S1 et de la rivière sont expliqués principalement par l'axe F1, et la position du site de l'embouchure S8 par l'axe F2 (cosinus carré des observations les plus grands).

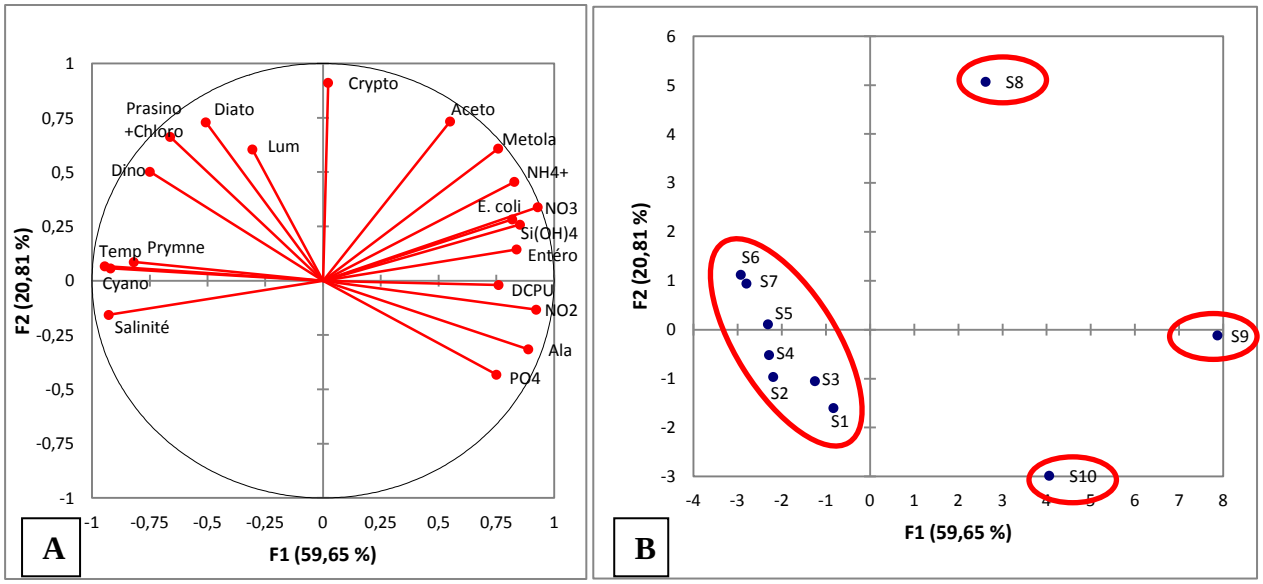


Figure 12 : ACP, variables: paramètres environnementaux et structure de la communauté phytoplanctonique, observations: 10 sites de Faaroa. Cercle de corrélation (**A**), Biplot (**B**).

IV. Discussion

A. Caractérisation de l'environnement de la rivière et de la baie de Faaroa, et liens avec les pressions anthropiques identifiées

D'après les valeurs seuils en éléments nutritifs (ammonium, nitrate, nitrite, silice et phosphate) établies par Beliaeff *et al*. (2011) pour des eaux marines tropicales, les eaux de la baie et de la rivière de Faaroa peuvent être qualifiées de oligo/mésotrophes. Par ailleurs, selon la Directive Nitrate 91/676/EEC du 12/12/1991 (AIDA, 2016) les sites de Faaroa pour lesquels les plus fortes concentrations en nitrite et nitrate ont été trouvées (S9 ; 72.8 $\mu g.L^{-1}$) sont largement en dessous des limites définissant l'eutrophisation (50 $mg.L^{-1}$). Les concentrations mesurées dans les eaux de la baie de Faaroa sont similaires à celles trouvées dans les eaux de la baie d'Opunohu à Moorea, île de l'archipel de la Société (Polynésie française) également caractérisée par la présence d'activités agricoles (Dellesalle, 1984) et supérieures aux eaux lagonaires de cette même île, en retrait des activités agricoles (Reix-Tronquet, 2015).

La comparaison des sites d'étude de Faaroa entre eux montre un enrichissement en nutriments plus important dans les eaux de la rivière que dans celles de la baie. Ceci est en accord avec les résultats de l'enquête qui révèlent l'utilisation d'engrais chimique sur 62.0% de la surface des parcelles agricoles localisées en grande majorité dans le fond de vallée, près des cours d'eaux. Ces résultats mettent en évidence l'existence d'un gradient de concentration en sels nutritifs, avec un enrichissement maximum en rivière, où les apports terrigènes chargés en nutriments enrichissent les cours d'eaux, et un enrichissement moins important dans la baie, qui serait lié à la dilution de ces apports dans l'eau de mer.

Par ailleurs, les concentrations en *E. coli* et entérocoques dans les différents sites d'étude indiquent une présence importante de bactéries fécales dans les eaux de la rivière comme dans celles de la baie. Les concentrations mesurées sont toutefois supérieures dans la rivière et à son embouchure, confirmant la présence d'un gradient de contamination organique décroissant depuis la rivière et en direction de l'océan. Toutefois, la présence de ces bactéries fécales en quantités importantes soulève l'hypothèse d'une contamination ne provenant pas uniquement de la rivière. En effet, les habitations sont réparties de manière homogène autour de la baie, et la proximité des fosses septiques des habitations par rapport à la baie pourrait conduire, lors de forts épisodes de pluies ou de marées, à une contamination des eaux de la baie par débordements de fosses sceptiques pleines, non vidangées ou défectueuses. Les résultats de l'enquête ont montré qu'une habitation sur trois dispose d'un système d'assainissement absent ou défectueux.

Quatre pesticides ont été quantifiés dans l'eau, à partir des méthodes d'échantillonnage passif (échantillonneurs POCIS) et ponctuel (2 prélèvements d'eaux). Il s'agit de l'acétochlore, l'alachlore, le diuron et l'imidaclopride. L'alachlore et le diuron font l'objet de Normes de Qualité Environnementale (NQE), établies par la Directive 2008/105/CE pour les substances prioritaires, et l'acétochlore et l'imidaclopride font l'objet de Valeur Guide Environnementales (VGE), établies par l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS). Les NQE et VGE sont définies comme la « *concentration d'un polluant ou d'un groupe de polluants dans l'eau, les sédiments ou le biote qui ne doit pas être dépassée, afin de protéger la santé humaine et l'environnement* ». Les concentrations obtenues pour ces 4 pesticides sont largement en dessous des NQE et VGE, à titre d'exemple la concentration s'en rapprochant le plus est celle de l'imidaclopride, quantifiée à 3.6 $ng.L^{-1}$ dans la baie, pour une $VGE_{\text{eau marine}}$ définie à 0.02 $\mu g.L^{-1}$. De plus, les concentrations en pesticides mesurées dans l'eau sont inférieures à celles retrouvées dans d'autres environnements côtiers considérés comme anthropisés ou impactés par des activités agricoles (e.g., en France et à la Réunion : Arzul *et al.,* 2014 ; aux Etats-Unis : Lehotay at *al,* 1998 ; Oros *et al.,* 2003 ; Ensminger *et al*., 2013; Target *et al.,* 2013).

Les concentrations en pesticides mesurées dans les sédiments mettent en évidence des valeurs relativement élevées pour 4 pesticides : l'acétochlore, l'alachlore, le DCPU et le métolachlore, au niveau de la rivière et de son embouchure. Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'enquête qui montrent une concentration des surfaces agricoles exploitées au fond de la vallée de Faaroa, à proximité des cours d'eaux. Aucun pesticide n'a été quantifié dans les sédiments du lagon ; renforçant le lien entre les activités agricoles et une contamination du sédiment par les pesticides, et mettant en évidence un gradient de concentrations en pesticides depuis la vallée et en direction de l'océan. Concernant le DCPU et le métolachlore, les concentrations mesurées à Faaroa sont du même ordre de grandeur que celles retrouvées dans d'autres environnements côtiers exposés à des activités d'agriculture ($\approx$ 10.0 $ng.g^{-1}$ pour le DCPU et $\approx$ 0.6 $ng.g^{-1}$ pour le métolachlore, e.g., au Portugal : Palma *et al.,* 2015 ; en Chine : Köck-Schulmeyer *et al.,* 2013). En revanche, les concentrations mesurées à Faaroa pour l'acétochlore (9.28 $ng.g^{-1}$) et l'alachlore (21.35 $ng.g^{-1}$) sont supérieures à celles obtenues dans d'autres zones côtières agricoles (e.g., $\approx$ 0.15 $ng.g^{-1}$ pour l'alachlore, Chine : Köck-Schulmeyer *et al.,* 2013 ; $\approx$ 0.3 $ng.g^{-1}$pour l'acétochlore et $\approx$ 5.5 $ng.g^{-1}$ pour l'alachlore,

Tunisie : Com. personnelle C. Lafabrie et H. Zmerli Triki). L'acétochlore, l'alachlore et le métalochlore ont des coefficients de partage octanol/eau (Log K_{ow}) supérieurs à 3 (3.0, 3.5 et 3.1, respectivement) et présentent de ce fait un important potentiel de bioaccumulation au sein des réseaux trophiques (Sangster, 1989). Ces substances pesticides, retrouvées en quantité non négligeables à Faaroa, mériteraient donc d'être étudiées de manière plus approfondie (par exemple : mises en place de campagnes d'échantillonnages supplémentaires pour vérifier les concentrations mesurées ; suivis de la contamination à différentes saisons). De plus, l'alachlore et le métolachlore présentent un risque de contamination des eaux souterraines. Les valeurs de l'indice GUS (Ground Ubiquity Score) permettant d'évaluer ce risque sont en effet de 2.06 pour l'alachlore et de 3.29 pour le métolachlore (1.8 < GUS < 2.8 : risque « modéré » ; GUS > 2.8 : risque « élevé » ; Gustafson, 1989). En raison des risques toxicologiques que peuvent présenter les substances pesticides (Pereira *et al.*, 2015 ; Yadav *et al.*, 2014), l'intérêt de la mise en œuvre d'investigations plus poussées pour ces deux composés est renforcé.

Les enquêtes, qui se sont déroulées parallèlement aux campagnes d'échantillonnage, ont révélé l'utilisation quasi ubiquiste de deux produits phytosanitaires dont les molécules actives sont le paraquat et le glyphosate. Ces deux substances herbicides ne faisant initialement pas partie de la liste des 32 pesticides sélectionnés pour cette étude, et ne pouvant être analysés au LGEI à Ales, des sous-échantillons ont été envoyés au Laboratoire Alpa Chimies de Rouen pour l'analyse de ces composés supplémentaires (analyses actuellement en cours).

B. Caractérisation des communautés phytoplanctoniques et évaluation des effets de l'environnement sur ces communautés

Les biomasses phytoplanctoniques retrouvée dans les eaux de la baie de Faaroa ([Chla] : 0.5-2.1 $\mu g.L^{-1}$) sont du même ordre de grandeur que celles indiquées pour la baie d'Opunohu ([Chla] $\approx$ 1.3 $\mu g.L^{-1}$, île de Moorea, Reix-Tronquet, 2015), et supérieures à d'autres eaux lagonaires polynésiennes ([Chla] $\approx$ 0.15 $\mu g.L^{-1}$, île de Moorea, récif frangeant: Dellesalle, 1989) ou des Caraïbes (Jameson *et al.*, 2004 $\approx$ 0.1 $\mu g.L^{-1}$). La biomasse phytoplanctonique retrouvée dans les eaux de rivière est moins importante ([Chla] : 0.1 – 0.2 $\mu g.L^{-1}$).

L'étude de la structure des communautés phytoplanctoniques à partir de l'analyse chémotaxonomique met en évidence une différence structurelle importante entre les sites de la baie et de la rivière. Les communautés phytoplanctoniques de la rivière sont caractérisées par une absence de cryptophycées et dinophycées, mais par une forte présence de prasinophycées et chlorophycées. Les communautés de la baie sont quant à elles essentiellement représentées par des diatomophycées et cyanophycées. Si l'on compare avec la structure des communautés phytoplanctoniques échantillonnées au niveau du récif frangeant de Moorea (Dellesalle, 1989), on observe une proportion relative de cyanophycées plus importante dans la baie de Faaroa (37.2% à Faaroa contre 12.9% à Moorea), et une proportion relative moins importante de dinoflagellés (9.9% à Faaroa contre 41.3% à Moorea) et de diatomophycées (26.5% à Faaroa contre 37.1% à Moorea). Toutefois, il est important de se montrer prudent quant aux différences observées car les techniques utilisées pour l'identification et le dénombrement du

phytoplancton ne sont pas identiques pour ces deux études ; chacune présentant des biais d'analyse différents. La microscopie optique utilisée par Dellesalle (1989) présentent des biais due à l'observateur, une mauvaise résolution pour les fractions nano- et picophytoplanctoniques, et une faible représentativité de la masse d'eau (Lampert, 2014). La méthode utilisant les pigments diagnostic (chémotaxonomie) comporte également des biais car certains pigments peuvent appartenir à différentes classes phytoplanctoniques. La méthode chémotaxonomique utilisant le logiciel CHEMTAX permet de réduire les biais de la méthode de pigment diagnostic, mais cette dernière nécessite de bien connaitre les grands groupes de phytoplancton présents dans le milieu analysé (rivière et baie), ce qui n'est pas le cas de Faaroa, puisqu'il s'agit de la première étude de ce type réalisée. Les différences de structure des communautés phytoplanctoniques au sein même de la baie ne sont pas visibles sur l'ACP, dont la représentation spatiale des sites est fortement influencée par les différences de structure entre les communautés phytoplanctoniques d'eaux douces et marines. En revanche, la comparaison des proportions relatives des différents groupes taxonomiques identifiés, au sein des sites « mer » (embouchure et sites de la baie), montre une différence de structure de la communauté entre les sites. Ces résultats mettent en évidence un gradient de modification de la structure des communautés en fonction de l'éloignement de la rivière, avec une quantité relative de diatomophycées et de cryptophycées plus importante à l'embouchure et de cyanophycées dans la baie. Il est important de souligner que les données de salinité et de température sont similaires pour les sites près de l'embouchure ; ces paramètres n'interviennent donc pas dans les différences de structure observées entre les communautés.

Par ailleurs, la péridinine, pigment diagnostic pour le groupe des dinophycées, présente des concentrations importantes dans la baie de Faaroa (max : 120 $ng.L^{-1}$), au regard des concentrations en péridinine qui varient entre 0 et 10 $ng.L^{-1}$ au cours de l'année pour un site oligotrophe en Méditerranée (e.g.,; com. personnelle : A. Goffart, Univ. Liège). Certaines dinophycées du genre *Gambierdiscus* peuvent être présentes dans d'importantes concentrations en Polynésie française et causer des intoxications alimentaires sévères (Chinain *et al.*, 2010a et 2010b). Des analyses complémentaires des échantillons vont être effectuées (microscopie) afin de déterminer si les fortes concentrations mesurées en péridinine sont attribuables à la présence d'espèces du genre *Gambierdiscus.*

Dans la rivière et au niveau de l'embouchure, quatre substances pesticides (l'acétochlore, l'alachlore, le DCPU et le métolachlore) ont été retrouvées dans de faibles concentrations. L'impact de ces substances sur le phytoplancton n'est pas documenté ; il est donc difficile de discuter des potentiels risques écotoxicologiques. Cependant, une étude visant à évaluer l'impact des pesticides du mélange chlorpyriphos-éthyl + époxiconazole sur le dinophycée *K.selliformis* a mis en évidence des effets additifs et synergiques de ces substances sur la croissance du phytoplancton, même à de faibles concentrations (Amara, 2012).

L'ACP, réalisée à partir de l'ensemble des données environnementales et de la structure des communautés, montre que les facteurs intervenant le plus dans la répartition des sites sont la température et la salinité, puis les concentrations en nitrites et nitrates, et enfin les cyanophycées. Ces résultats ne sont pas surprenants car les paramètres tels que la salinité et la température ont un fort impact sur les communautés phytoplanctoniques ; les espèces rencontrées en milieu dulçaquicole ne sont pas les mêmes que celles du milieu marin, et la

température joue un rôle majeur dans le développement du phytoplancton, en agissant notamment sur la photosynthèse (Havaux, 1992). Ainsi, le facteur limitant de la biomasse phytoplanctonique moins abondante en rivière peut être expliquée par la température, alors que le facteur limitant en mer est l'apport en nutriment.

Une corrélation positive a été mise en évidence entre les quatre pesticides quantifiés (acétochlore, alachlore, DCPU et métolachlore), les nutriments (ammonium, nitrite, nitrate et phosphate) et les bactéries fécales, (R^2>0.767, α=0.01). Ces résultats mettent en évidence l'effet du lessivage et des apports terrigènes dans la contamination des eaux de rivière (Botte *et al.*, 2012), entraînant à la fois les pesticides et les sels nutritifs. Dans ces conditions, les impacts négatifs des pesticides décrits pour le phytoplancton (inhibition de croissance, diminution de l'activité photosynthétique..), pourraient être contrebalancés par les effets stimulants résultant d'enrichissements du milieu en nutriments, comme souligné par Lafabrie *et al*. (2013).

Une corrélation négative a par ailleurs été mise en évidence entre l'alachlore, qui est le pesticide analysé présent en plus grande quantité dans l'eau et dans les sédiments, et les cyanophycées (R^2 > -0.765, α = 0.01). Plusieurs auteurs ont montré que les cellules phytoplanctoniques ayant un petit bio-volume ont une sensibilité plus importante aux contaminants en raison d'un rapport surface/volume plus important (étude sur les HAP : Ben Othman *et al.*, 2012 ; étude sur les pesticides : DeLorenzo *et al.*, 2004). Les cyanophycées, appartenant au picophytoplancton, seraient donc susceptibles d'être plus sensibles à l'alachlore que les autres groupes phytoplanctoniques. Cette hypothèse est cohérente avec les résultats de cette étude qui montrent une présence plus importante de cyanophycées dans la baie où les niveaux de contamination en pesticides sont très inférieurs par rapport à ceux se rapprochant de la rivière. Afin de tester cette hypothèse, des expérimentations en conditions contrôlées visant à étudier l'impact de différentes concentrations en alachlore sur différentes espèces phytoplanctoniques dont des cyanophycées pourraient être réalisées. Une corrélation positive a également été mise en évidence entre l'acétochlore et les cryptophycée (R^2 > 0.835, α = 0.01), dont la présence est plus importante prés de la rivière que dans la baie. Certains auteurs ayant montré le caractère espèce dépendante de la sensibilité du phytoplancton aux pesticides (Ben Othman *et al.*, 2012, DeLorenzo *et al*., 2004), on pourrait se demander si la présence importante des cryptophycées, mais également des diatomophycées près de la rivière, pourrait être expliquée par une sensibilité aux pesticides moins importante par rapport aux autres classes de phytoplancton, comme par exemple les cyanophycées. Cette hypothèse pourrait également être approfondie par des expérimentations en conditions contrôlées.

V. Conclusions et perspectives

Les approches, à la fois humaines et scientifiques, utilisées au cours de cette étude, ont permis d'aborder la problématique liée à la qualité de l'eau de manière complémentaire. Les résultats des données analytiques sont en cohérence avec ceux des enquêtes et montrent des liens entre l'assainissement des habitations et les activités agricoles d'une part, et la qualité chimique et écologique des eaux de la rivière et de la baie de Faaroa d'autre part.

Plus précisément, les résultats obtenus ont mis en évidence un enrichissement en éléments nutritifs (nitrates, nitrites, ammonium, phosphates, silicates) plus important dans les sites de la rivière que dans ceux de la baie ; ce qui est en accord avec les résultats de l'enquête qui montraient une utilisation d'engrais plus importante sur le domaine agricole de Faaroa, dont les parcelles sont concentrées près de la rivière. De la même manière, les concentrations en bactéries fécales mesurées indiquent un gradient de contamination bactériologique décroissant, depuis la rivière et en direction de l'océan, en accord avec l'enquête qui souligne des problèmes d'assainissement des eaux usées des habitations (absence de réseau d'assainissement ou systèmes défectueux). Concernant les pesticides, quatre ont été retrouvés dans l'eau : l'acétochlore, l'alachlore, le diuron et l'imidaclopride. Les concentrations de ces substances sont par contre bien en dessous des normes de qualité environnementale, et sont inférieures à celles retrouvées dans d'autres environnements côtiers considérés comme anthropisés ou impactés par des activités agricoles. Dans les sédiments, quatre pesticides ont été quantifiés (l'acétochlore, l'alachlore, le DCPU et le métolachlore) dans les sites de la rivière et à son embouchure mais aucun n'a été quantifié dans le lagon ; renforçant le lien entre les activités agricoles et une contamination du sédiment par les pesticides, et mettant en évidence un gradient de concentration en pesticides depuis la vallée et en direction de l'océan. Ces résultats sont également en accord avec ceux de l'enquête qui montrent une concentration des surfaces agricoles exploitées au fond de la vallée de Faaroa, à proximité des cours d'eaux. Les concentrations en DCPU et métolachlore mesurées à Faaroa sont du même ordre de grandeur que celles retrouvées dans d'autres environnements côtiers exposés à des pressions agricoles. En revanche, les concentrations en acétochlore et alachlore sont supérieures ou égales à celles obtenues dans d'autres zones côtières agricoles. L'acétochlore, l'alachlore et le métalochlore présentent un important potentiel de bioaccumulation dans les chaînes trophiques. Ces substances pesticides, retrouvées en quantité non négligeables à Faaroa, mériteraient donc d'être étudiées de manière plus approfondie. Concernant les communautés phytoplanctoniques, d'importantes différences structurelles ont été mises en évidence, par chémotaxonomie, entre les sites de la rivière et de la baie. Les communautés phytoplanctoniques de la rivière sont caractérisées par une absence de cryptophycées et de dinophycées, mais par une forte présence de prasinophycées et de chlorophycées. Les communautés de la baie sont quant à elles essentiellement représentées par des diatomophycées et des cyanophycées. Pour la baie, on observe une diminution de la quantité relative de diatomophycées et de cryptophycées en s'éloignant de la rivière, mais une augmentation de celle des cyanophycées. De plus la corrélation positive observée entre les cyanophycées et l'alachlore, qui est le pesticide présent en plus grande quantité dans les sédiments, suggère le caractère sensible des cyanophycées. Au contraire, la corrélation positive entre les cryptophycées et l'acétochlore, suggère une certaine tolérance de ces derniers. Afin de mettre en évidence l'éventuel caractère espèce-dépendante de la sensibilité aux pesticides retrouvés lors de notre étude, mais aussi à ceux cités dans nos enquêtes mais non analysés (paraquat et glyphosate), des expérimentations en laboratoire pourraient être conduites.

Afin de préciser les niveaux d'enrichissement de te contamination mis en évidence dans cette étude et d'évaluer la variabilité saisonnière, il serait intéressant d'effectuer de nouvelles analyses à une saison différente de celle au cours de laquelle l'étude a été menée. Les analyses

réalisées dans le cadre de cette étude ont eu lieu en février-mars, durant la saison humide. Une nouvelle campagne de prélèvement pourrait être effectuée au cours de la saison sèche (entre juin et octobre). Par ailleurs, des analyses structurelles plus approfondies des communautés phytoplanctoniques pourraient être effectuées (microscopie, cytométrie en flux) afin d'évaluer de manière plus précise les relations entre les variables environnementales et la diversité des espèces constituant les différentes communautés phytoplanctoniques de la rivière et de la baie de Faaroa. Enfin, des expérimentations en microcosmes et en conditions contrôlées pourraient être proposées afin de tester le caractère espèce-dépendance et la sensibilité de différents groupes phytoplanctoniques aux pesticides retrouvés dans le milieu (acétochlore, alachlore, DCPU, métolachlore) et à ceux n'ayant pas pu être analysés pour des raisons techniques mais ayant été mis en évidence lors des enquêtes (e.g., paraquat et glyphosate).

VI. Valorisation des résultats et sensibilisation à la problématique de la contamination chimique de l'environnement

A. Réalisation d'un poster scientifique

Dans le cadre du 13e "International Coral Reef Symposium", qui aura lieu du 19 au 24 Juin 2016 à Honolulu (Hawaii), un poster basé sur les résultats de cette étude sera présenté :

Leroi, C., Gonzalez, Vaucherot, V., Vieux, C., Spinelli, S., Avezac, M., Leroi, M., Lafabrie, C., Impact of nutrient, seawage and contaminant pressures on the water quality of a French Polynesian reef lagoon (Faaroa, Raiatea island).
https://www.sgmeet.com/icrs2016/viewabstract.asp?AbstractID=28975

B. Sensibilisation des élèves du collège de Faaroa à la pollution de l'eau et mise en œuvre d'une action participative

Un atelier de sensibilisation a été animé lors de l'événement « *Fatura I Te Natura* - Protège la Nature » organisé par le collège d'Uturoa, le jeudi 11 février 2016. Les sources de contamination de l'eau et les problèmes qui en résultent ont été abordés avec 4 classes (2nd, 3ème et 4èmes) à raison de 30 minutes par atelier.

Une journée de sensibilisation, a été organisée au collège de Faaroa, le vendredi 12 février dans le but de :

- **Sensibiliser** les enfants à la pollution de l'eau. « *Qu'est ce qu'un polluant ? Quels sont ceux que l'on peut retrouver à Faaroa ? Comment les polluants se retrouvent-ils dans l'eau ?* » Impact sur la chaine alimentaire puis sur l'homme. La présentation a été réalisée de façon ludique, en interrogeant les enfants sur ce qu'ils connaissent et en les faisant **participer de manière interactive**.
- **Responsabiliser** les enfants en les **impliquant dans l'étude** en **leur confiant la surveillance de 2 sites d'étude dans la rivière** qu'ils connaissent bien (lieux de baignade), sites sur lesquels du matériel d'analyse allait être installé pendant 2 semaines.

Ainsi les élèves habitant Faaroa se sont vu proposer la surveillance de 2 sites d'études en rivière. A la question « *Nous avons besoin de vous, est ce que vous êtes prêts à nous aider à surveiller les sites d'étude ?* » tous ont répondu présents. Une feuille de surveillance des sites, visible en **Annexe VI**, leur a été distribuée. Les 2 sites d'étude à surveiller leur ont été présentés à l'aide d'une cartographie de la baie, de photos de point de repères (ex : la cabane où l'on vend des mappés chauds) et une vidéo leur présentant le chemin à suivre pour se rendre sur le site d'étude. La feuille de surveillance a été complétée en classe, les enfants ont pu choisir quel(s) sites(s) surveiller (case à cocher) et à quelle fréquence (calendrier). Les enfants ont demandé « *Est ce qu'on peut y aller tous les jours ?* ». La mission qui leur a été confiée est de surveiller, de sensibiliser et d'avertir les personnes qu'ils croisent sur les sites qu'il s'agit de matériel pour analyser l'eau et qu'il ne faut pas toucher. En cas de dégradation constatée, un numéro leur a été laissé sur la feuille de surveillance, à côté d'une photo me représentant, afin d'être reconnu par les parents rencontrés lors des enquêtes.

Les enfants ont été très réceptifs, et se sont montré particulièrement intéressés par les problèmes de pollution de l'eau et concernés par l'étude menée sur leur *fenua*. **(Photo 1 et 2)**

Photo 1 : Les élèves de la 6ème Tipannier écrivent comment les polluants jetés dans la nature peuvent se retrouver dans l'eau puis dans notre assiette.

Photo 2 : Photo de groupe avec les élèves de 4èmes, 3èmes et CETAD habitant Faaroa.

C. Participation à un court métrage pour la sensibilisation au tri des déchets (communauté de commune Havai'i)

Un court métrage sur la sensibilisation au tri des déchets a été tourné à Raiatea au cours de la semaine du 26 janvier 2016, avec l'agence de conseil en communication Oba Com de Tahiti, et à la demande du communauté de commune Hava'i. Dans ce cadre, j'ai pu contribuer à : (i) l'écriture du scénario en y incorporant une partie qui aborde le problème de la pollution de l'eau par les produits toxiques au travers de l'exemple des métaux lourds et (ii) en participant à la conception de la vidéo sur la partie animation qui illustre l'accumulation des métaux lourds dans la chaine alimentaire. Ce court métrage est disponible sur le site internet de la commune d'Hava'i (http://www.cchavai.pf/page/video-ramassage-dechets) et sera diffusé dans les mairies, les écoles et lors des réunions publiques à Raiatea.

Bibliographie

AIDA (2016). : Directive Nitrate 91/676/EEC du 12/12/1991 http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/1053 consulté le 10 Juin 2016.

Alvarez, D. A., Petty J. D., Huckins, Jones-Lepp, T. L., Getting, D. T., Goddard, J. P. and Manahan, S. E. (2004). Development of a passive, *in situ*, integrative sampler for hydrophilic organic contaminants in aquatic environments. *Environmental Toxicology and Chemistry, 23*(7), 1640-1648.

Amara A., (2012). *Evaluation de la toxicité de pesticides sur quatre niveaux trophiques marins : micrro-algues, échinoderme, bivalves et poisson*. Thèse de doctorat, spécialité Ecotoxicologie, Brest et Tunis, 211 pages.

Arzul, G., Quiniou F. (2014). *Plancton marin et pesticides : quels liens ?* : Edition Quae.

Beliaeff, B., Bouvet, G., Fernandez, J. M., David, C., Laugier, T. (2011). *Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle Calédonie.* Programme ZONECO et Programme CNRT Le Nickel. 169 pages.

Ben Othman, H., Leboulanger, C., Le Floc'h, E., Mabroukb, H. H., Hlaili, A. S. (2012). Toxicity of benz(a)anthracene and fluoranthene to marine phytoplankton in culture: Does cell size really matter? *Journal of Hazardous Materials, 243*, 204– 211.

Bertrand, J. C., Caumette, P., Lebaron, P., Matheron, R. (2011). Ecologie microbienne - Microbiologie des milieux naturels anthropisés. PUPPA ed.

Blanck, H., Wangberg, S. A. and Molander S. (1988). Pollution-induced Community Tolerance - A new Ecotoxicological Tool. *Functionnal Testing of Aquatib Biota for estimating Hazards of chemicals*, 219-230.

Botte, E. S., Jerry, D. R., Codi King, S., Smith-Keune, C and Negri, A. P. (2012). Effects of chlorpyrifos on cholinesterase activity and stress markers in the tropical reef fish Acanthochromis polyacanthus. *Marine Pollution Bulletin, 65*, 384-393.

Chinain, M., Darius, T.H., Ung, A., Tchou Fouc, M., Revel, T., Cruchet, P., Pauillac, S. and Laurent, D. (2010a). Ciguatera risk management in French Polynesia: The case study of Raivavae Island (Australes Archipelago). *Toxicon, 56, 674-690.*

Chinain, M., Darius, T.H., Ung, A., Cruchet, C., Wang, Z., Ponton, D., Laurent, D. And Pauillac, S. (2010b). Growth and toxin production in the ciguatera-causing dinoflagellate Gambierdiscus polynesiensis (Dinophyceae) in culture. *Toxicon, 56, 739-750.*

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Naeem, S., Limburg, K., Paruelo, J.,O'Neill, R.V., Raskin, R., Sutton, P. and Van den Belt, M. . (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature, 387*, 253-260.

Dellesalle, B. (1984). *Ecologie du phytoplancton dans les lagons de Polynésie Française.* These, Ecole Pratique des Hautes Etudes.

DeLorenzo, M. E., Leatherbury, M., Weiner, J. A., Lewitus, A. J. and Fulton, M. H. (2004). Physiological factors contributing to the species-specific sensitivity of four estuarine microalgal species exposed to the herbicide atrazine. *Aquatic Ecosystem Health & Management, 7*(1), 137-146.

Ensminger, M. P., Budd, R., Kelley, K. C. and Goh, K. S. (2013). Pesticide occurrence and aquatic benchmark exceedances in urban surface waters and sediments in three urban areas of California, USA, 2008–2011. *Environmental Monitoring and Assessment, 185*, 3697-3710.

Fabricius, K. (2005). Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin, 50*, 125-146.

FAO, 2012. The state of world fisheries and aquaculture 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO Fisheries and Aquaculture Department.

Gin, K. Y. H., Zhang, S. and Lee, Y.K. (2003). Phytoplankton community structure in Singapore's coastal waters using HPLC pigment analysis and flow cytometry. *Journal of plankton reserach, 25*(12), 1507-1519.

Goffart, A. and Andral, B. (2014). Validation de l'indice composition IC dans des masses d'eau côtières méditerranéennes caractérisées par un gradient croissant d'eutrophisation. IFREMER.

Gustafson, D. J. (1989). Groundwater Ubiquity Score: A Simple Method for Assessing Pesticide Leachability *Environmental Toxicology and Chemistry, 8*, 339-357,.

Havaux, M. (1993). Rapid photosynthetic adaptation to heat stress triggered in potato leaves by moderately elevated temperatures. *Plant, Cell & Environment, 16*(4), 461-467.

Holmes R.M., Aminot A., Kerouel R., Hooker B.A., Peterson B.J., 1999. A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems. Can. J. Fish. *Aquat. Sci*. 56, 1801-1808.

Ibrahim, I. (2013). Etude de l'applicabilité des échantillonneurs passifs POCIS et Chemcatcher pour le suivi des pesticides en millieux aquatiques., Ecole Nationale Supérieure des Mines Saint Etienne.

Jameson, S. C., and Kelty, R. (2004). A review of indicators of land-based pollution stress on coral reefs. Honolulu, Hawaï : EPA/NOAA/USGA/DOI.

Jeffrey, S., Wright, S.W. and Zapata, M. (1999). Recent advances in HPLC pigment analysis of phytoplankton. *Marine and Freshwater Research, 50*, 879-896.

Jeffrey, S. W., Mantoura, R.F.C. and Wright, S.W. (1997). Phytoplankton pigments in oceanography. UNESCO, Paris.

Köck-Schulmeyer M., O., M., López de Aldaa, M. and Barcelóa, D. (2013). Development of a multiresidue method for analysis of pesticides in sediments based on isotope dilution and liquid chromatographyelectrospray-tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography, 1305*, 176– 187.

Lafabrie, C., Garrido, M., Leboulanger, C., Cecchi, P., Grégori, G., Pasqualini, V., and Pringault, O. (2013). Impact of contaminated-sediment resuspension on phytoplankton in the Biguglia lagoon (Corsica, Mediterranean Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 130*, 70-80.

Lampert, L. (2014). Chemotaxonomie pigmentaire : Initiation aux calculs appliqués au phytoplancton. IFREMER.

Leboulanger , C., Bouvy, M., Carre, C., Cecchi, P., Amalric, L., Bouchez, A., Pagano, M. and Sarazin, G. (2011). Comparison of the Effects of Two Herbicides and an Insecticide on Tropical Freshwater Plankton in Microcosms. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 61*, 599-613.

Leboulanger, C., Bouvy, M., Pagano, M., Dufour, R. A., Got, P., Cecchi, P. (2009). Responses of Planktonic Microorganisms from Tropical Reservoirs to Paraquat and Deltamethrin Exposure. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 56*, 39–51.

Lehane, L., Lewis, R.J. (2000). Ciguatera: recent advances but the risk remains. *International Journal of Food Microbiology, 61*, 91-125.

Lehotay, S. J., Harman-Fetcho, J. A. and McConnell, L. L. (1998). Agricultural Pesticide Residues in Oysters and Water from Two Chesapeake Bay Tributaries. *Marine Pollution Bulletin, 37*, 32-44.

Martínez, M. L., Intralawan, A., Vázquez, G., Pérez-Maqueo, O., Sutton, P. and Landgrave, R. (2007). The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economy, 63*, 254-272.

Mazzella, N., Dubernet, J.-F., and Delmas, F. (2007). Determination of kinetic and equilibrium regimes in the operation of polar organic chemical integrative samplers: Application to the passive sampling of the polar herbicides in aquatic environments. *Journal of Chromatography, 1154*(1-2), 42-51.

Nystrom, B., Bo Bjornsater, B. and Blanck, H. (1999). Effects of sulfonylurea herbicides on non-target aquatic micro-organisms Growth inhibition of micro-algae and short-term inhibition of adenine and thymidine incorporation in periphyton communities. *Aquatic Toxicology, 47*, 9-22.

Odum, E. P. (1985). Trends expected in stresser ecosystems. *BioScience, 35*(7), 419-422.

Oros, D. R., Jarman, W. M., Lowe, T., David, N., Lowe, S. and Davis, J. A. (2003). Surveillance for previously unmonitored organic contaminants in the San Francisco Estuary. *Marine Pollution Bulletin, 46*, 1102-1110.

Palma, P., Köck-Schulmeyer, M., Alvarenga, P., Ledo, L., Lopez de Alda, M. and Barcelo, D. (2015). Occurrence and potential risk of currently used pesticides in sediments of the Alqueva reservoir (Guadiana Basin). *Environmental Science and Pollution Research, 22*, 7665–7675.

Pereira, L. C., De Souza, A.O., Franco Bernardes, M.F., Pazin, M., Tasso, M.J., Pereira, P.H. and Dorta, D.J. (2015). A perspective on the potential risks of emerging contaminants to human and environmental health. *Environmental Science and Pollution Research, 18*.

Pratt, J. R. (1990). Aquatic Community Response to Stress : Prediction and Detection of Adverse Effects. *Aquatic Toxicology and Risk Assesment, 39*, 16-26.

Reix Tronquet M. (2015). Sensibilité des communautés phytoplanctoniques lagonaires aux pressions anthropiques de contamination chimique. UMR 241 EIO.

Roche, H., Salvat, B., Ramade, F. (2011). Assessment of the pesticides pollution of coral reefs communities from French Polynesia. *Rev. Écol. (Terre Vie), 66*.

Rochelle-Newall, E. J., Torréton, J.P., Mari, X., Pringault, O. (2008). Phytoplankton–bacterioplankton coupling in a subtropical South Pacific coral reef lagoon. *Aquatic Microbial Ecology, 50*, 221-229.

Salvat, B., Roche, H., Berny, P., Ramade, F. (2012). Recherches sur la contamination par les pesticides d'organismes marins des réseaux trophiques récifaux de Polynésie Française. *Rev. Écol. (Terre Vie), 67*.

Sangster, J. (1988). *Octanol Water Partition Coefficients of Simple Organic Compounds*. Montreal, Quebec, Canada.

Schindler, P. B. (1984). Detecting ecosystem responses to anthropogenic stress. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 44*, 6-25.

Target, M. L. M., Massey, J. H. and Shaw, D. R. (2014). Water quality survey of Mississippi's Upper Pearl River. *Science of the Total Environment, 481*, 564-573.

Terzopoulou, E., Voutsa, D. (2015). Active and passive sampling for the assesment of hydrophilic organic contaminants in a river basin - ecotoxicological risk assesment. *Environmental Science and Pollution Research.*

Tien, C. J., Chen, C. S. (2012). Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes. *Journal of Environmental Science and Health, 47B*, 901-912.

UNEP, 2006. Marine and coastal ecosystems and human well-being: A synthesis report based on the findings of the Millenium Ecosystem Assessment.

Verdier, F. (2011). Contribution à l'aménagement du domaine territorial de Faaroa, Inventaire et propositions pour une gestion forestière de la partie Est du domaine.: ENGRET.

Vidussi, F., Marty, J.C., and Chiavérini, J. . (2000). Phytoplankton pigment variations during the transition from spring bloom to oligotrophy in the northwestern Mediterranean sea. *Deep-Sea Research 47*, 423–445.

Vrana, B., Mills, G. A., Ian J. Allan, I. J., Dominiak, E., Svensson, K., Knutsson, J, Morrison, G. and Greenwood, R. (2005). Passive sampling techniques for monitoring pollutants in water. *Trends in Analytical Chemistry, 24*(10).

Welschmeyer, N. A. (1994). Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and pheopigments. *Limnology and oceanography, 39*(8), 1985-1992.

Yadav, I. C., Dev,i N.L., Syed, J.H., Cheng, Z., Li, J., Zhang. G. and Jones, K.C. (2014). Current status of persistent organic pesticides residues in air, water, and soil, and their possible effect on neighboring countries: a comprehensive review of India. *Science of the Total Environment, 511*, 123-137.

Zapata, M., Rodriguez, F. And Garrido, J.L. (2000). Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine containing mobile phases. *Marine Ecology Progress Series 195*, 29–45.

Annexes

<u>Annexe I</u> : Compte-rendu de la réunion publique du 20 Janvier 2016, à Faaroa, dans le cadre de la présentation de l'étude à la population.

Cette réunion s'est inscrite dans la continuité de la réunion publique du 8 Juin 2015, organisée dans le cadre du projet INTEGRE, pour la mise en place d'un plan de gestion du lagon. Lors de cette rencontre, les habitants de Faaroa ont fait part de leur inquiétude au sujet de la qualité des eaux de leur rivière mais aussi de leur baie et ont émis le souhait que des analyses de l'eau soient effectuées. Plusieurs problèmes survenus suite à des baignades ont été évoqués, comme des démangeaisons chez les pêcheurs de la baie (« *ça gratte* ») et les « bobos » qui s'infectent chez les enfants qui se baignent dans la rivière.

Les objectifs de cette 2e réunion publique étaient de présenter à la population de Faaroa : les sites sélectionnés pour les analyses (3 sites en rivières, 6 sites dans la baies et 1 site « contrôle » dans la baie), le calendrier des missions sur le terrain afin que ceux qui le souhaitaient puissent participer à l'étude, le matériel d'analyse et leur système de mise en place sur le terrain (*poito etc.*) afin de sensibiliser au respect du matériel qui sera laissé sur place pendant 3 semaines (du 15/01 au 5/02), et le déroulement et l'intérêt de l'étude.

L'impression générale laissée par la réunion a été positive. Les habitants de Faaroa se sont sentis concernés puisque environ 70 personnes ont assisté à la réunion. La présence de nombreuses personnes souligne également l'efficacité de la communication et de l'organisation de la mairie, notamment grâce à la distribution des invitations par courriers et l'affectation d'un bus pour le transport des habitants. Les enquêtes qui avaient déjà été initiées semblaient être bien accueillies puisque plusieurs personnes déjà questionnées étaient présentes à la réunion. Un grand nombre de personnes nous ont remerciés d'avoir mis en place cette étude ; le fait que cela vienne répondre à leur demande a été souligné plusieurs fois. Il s'agit de la 1ère fois où la population est partie prenante et que l'étude est participative. Il y a eu plusieurs appels à la prise de conscience, surtout de la part des personnes âgées « *Nous savons déjà qui pollue, c'est nous qui polluons* ». Les habitants ont également beaucoup parlé de ce qu'ils pensent être la source de pollution, comme l'utilisation des produits chimiques dans les *faapu* ou le poulailler de Faaroa.

Ils nous ont par ailleurs fait part de leurs inquiétudes concernant les résultats de l'étude : « o*n ne pourra pas interdire à nos enfants d'aller à la rivière* » , « s*i on se rend compte que c'est les produits qu'on utilise, qu'est ce qu'on va faire* ? », la peur que les résultats ne soient pas diffusés ou falsifiés, y aura-t-il un accompagnent après les analyses si effectivement il y a pollution. Caroline Vieux, coordinatrice du projet INTEGRE est intervenue pour rassurer la population quant au suivi de l'étude.

A la fin de la réunion les habitants ont été invités à la réunion de restitution des résultats qui aura lieu en juin, également dans le local des pompiers de Faaroa et dont la date leur sera communiquée une semaine à l'avance. Un bus sera également mis à disposition de la population, permettant de se rendre chez les pompiers.

<u>Annexe II</u> : Questionnaire « habitants ».

Questionnaire
sur l'emploi des pesticides, des engrais, l'assainissement et la gestion des déchets des **habitants** de la commune de Faaroa

Enquête n°.....

☐ exploitation Date ...../...../2016

Interlocuteur

Nom ..... Coordonnées GPS

Adresse ....

Vini ..... Nbr personnes dans le foyer .....

Pesticides

Utilisez vous des pesticides ? Si oui lesquels ? Et quelle quantité utilisez vous par an ? Quel moyen d'application utilisez vous ? Respectez vous les distances d'utilisation des pesticides par rapport à la rivière ?

	Produit utilisé	Fréquence d'achat/ Dose	Moyen d'application	Respect des distances
Herbicides				
Insecticides				
Fongicides				
Autres				

Que faites vous des emballages des pesticides ?

☐ brulés ☐ enfouis ☐ poubelle ☐ autre .....

Les rincez vous avant?

☐ oui ☐ non

1

Engrais

Utilisez vous des engrais chimiques ? Si oui, lesquels ? et quelle quantité utilisez vous par an ? Quel moyen d'application utilisez vous ? Respectez vous les distances d'utilisation des engrais chimiques par rapport à la rivière ?

Produit utilisé	Fréquence d'achat / Dose	Moyens d'application	Respect des distances

Elevage

Possédez vous un élevage ? Si oui de quels animaux ? Combien avez-vous de bêtes et l'élevage est il équipé d'un assainissement ?

Type d'animaux	Nbr de bêtes	Assainissement

Gestion des déchets

Que faites vous de l'huile de vidange de votre voiture ?.....

Que faites vous de la batterie lorsque celle-ci est usée ?.....

Que faites vous des piles usées ?.....

Que faites vous de vos déchets ménagers ?

☐ poubelle ☐ brulés ☐ enfouis ☐ point d'apport

Assainissement

Votre maison possède t'elle un assainissement ? ☐ oui ☐ non

Si oui , de quel type : ☐ fosse + drain ☐ fosse+ puisard

Ou âge de la maison .....

Avez-vous des problèmes avec la fosse ? ☐ oui ☐ non

Si oui, de quels types : ☐ débordement ☐ odeur

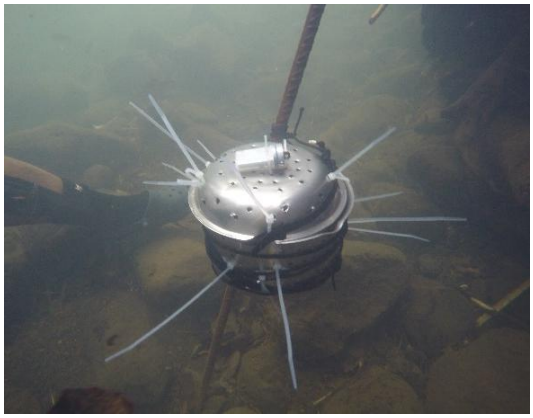
☐ toilette bouchée ☐ autre .....

Un service de vidange vous intéresse t-il ? ☐ oui ☐ non

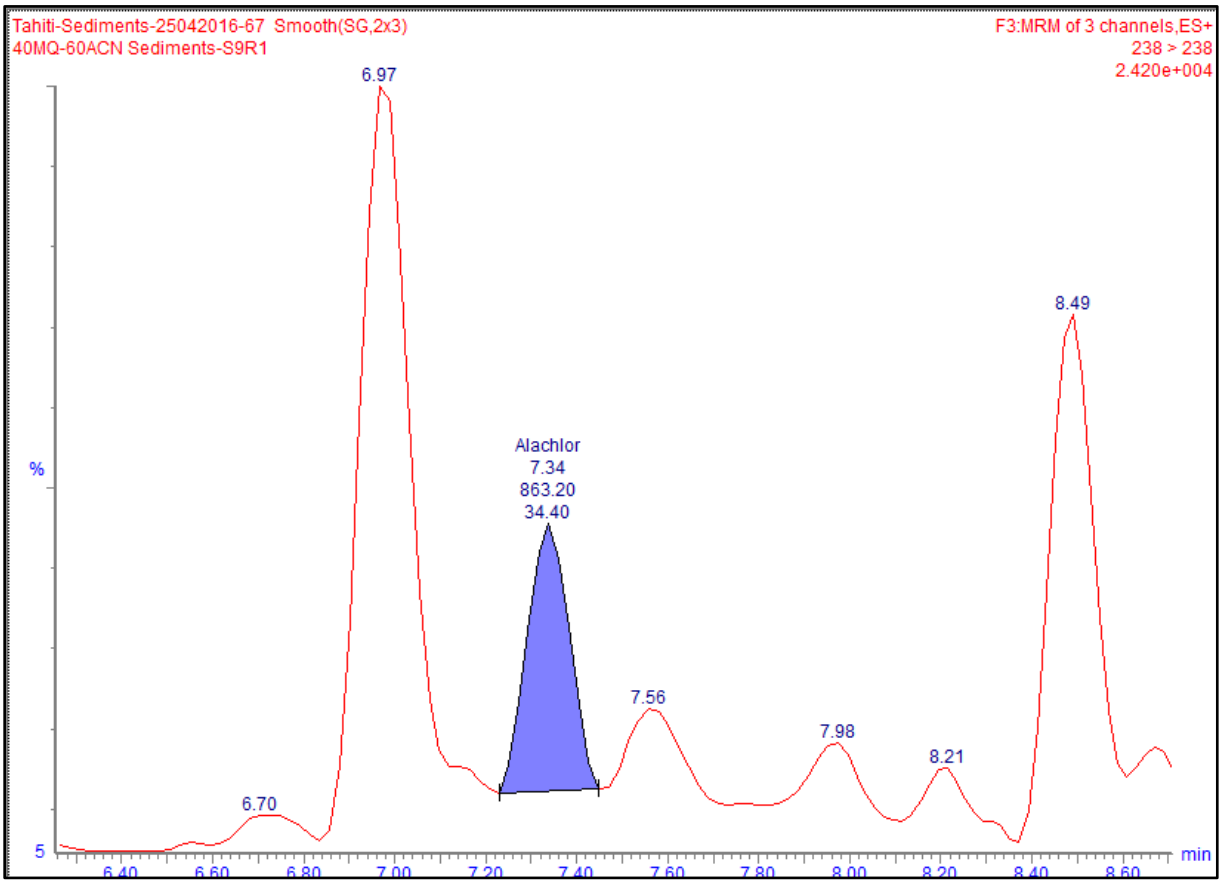
Si oui, combien seriez vous prêt à payer ? .....

2

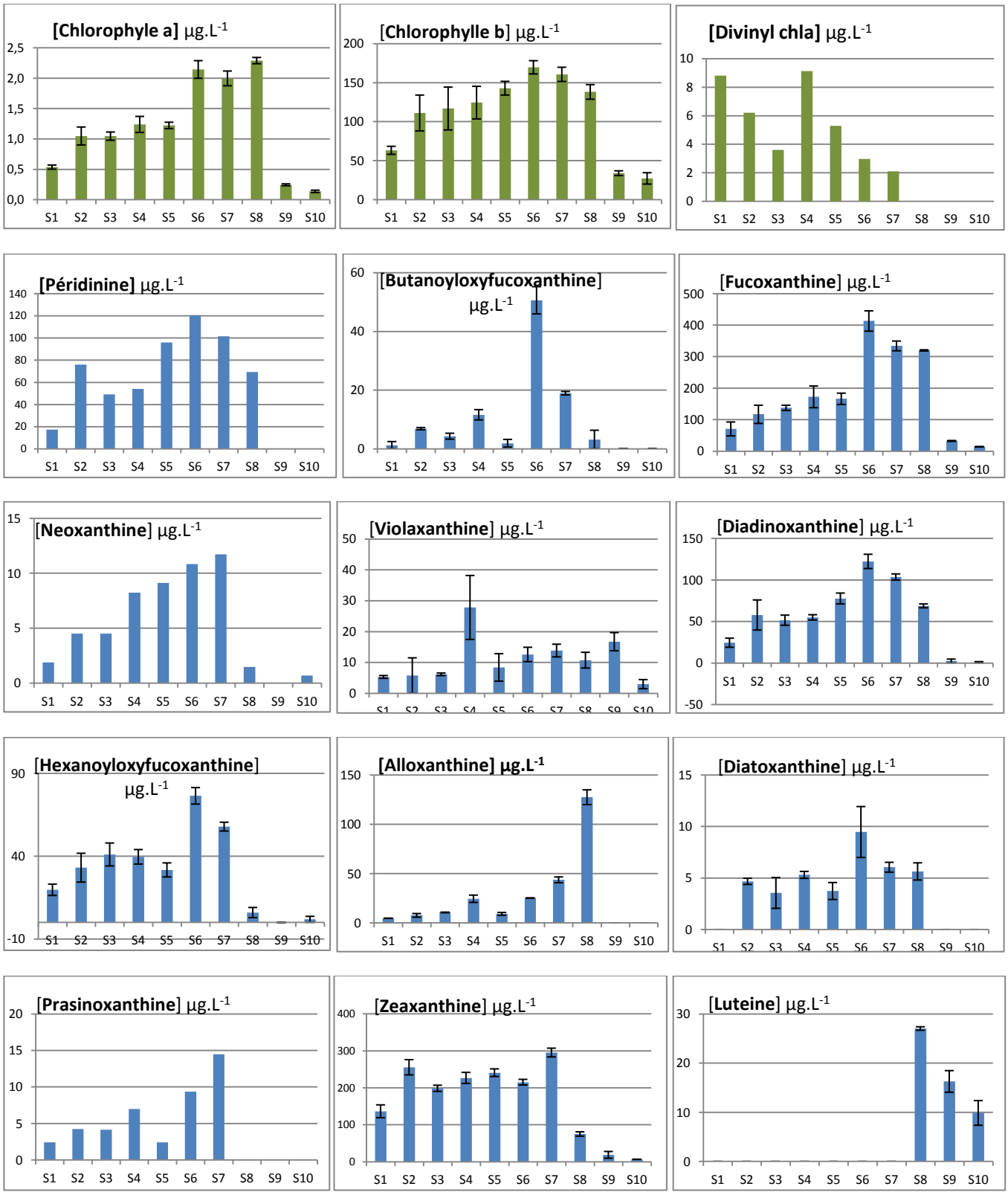
<u>Annexe III</u> : Déploiement des POCIS sur le terrain.



<u>Annexe IV</u> : Exemple de chromatogramme obtenu par HPLC, pour l'alachlore dans les sédiments du site S9.



<u>Annexe V</u> : Concentration des 15 pigments diagnostics analysés dans les 10 sites.



<u>Annexe VI</u> : Tableau de corrélation de Pearson sur l'ensemble des données physico-chimiques et biologique des 10 sites de Faaroa.

Variables	Temp	Lum	Salinité	NH4+	NO2	NO3	Si(OH)4	PO4	Aceto	Ala	DCPU	Metola	E. coli	Entéro	Dino	Diato	Prymne	Crypto	Cyano	Prasi + Chlo
Temp	**1**	0,442	**0,973**	-0,670	**-0,828**	**-0,858**	**-0,930**	**-0,867**	-0,548	**-0,887**	-0,577	-0,608	-0,635	-0,665	0,693	0,457	**0,771**	-0,027	**0,920**	0,649
Lum	0,442	**1**	0,292	0,053	-0,210	-0,083	-0,227	-0,677	0,225	-0,624	-0,277	0,201	-0,060	-0,190	0,424	0,358	0,049	0,496	0,230	0,428
Salinité	**0,973**	0,292	**1**	-0,751	**-0,777**	**-0,915**	**-0,981**	-0,760	-0,706	**-0,798**	-0,545	-0,729	-0,675	-0,672	0,574	0,293	0,752	-0,238	**0,899**	0,487
NH4+	-0,670	0,053	-0,751	**1**	0,707	**0,919**	0,702	0,330	0,674	0,625	**0,820**	**0,966**	**0,956**	**0,923**	-0,367	-0,097	-0,565	0,322	-0,664	-0,220
NO2	**-0,828**	-0,210	**-0,777**	0,707	**1**	**0,841**	0,701	0,733	0,398	**0,791**	0,686	0,630	0,726	0,740	**-0,811**	-0,594	**-0,781**	-0,107	**-0,897**	-0,754
NO3	**-0,858**	-0,083	**-0,915**	**0,919**	**0,841**	**1**	**0,882**	0,580	**0,767**	0,702	0,674	**0,907**	**0,836**	**0,807**	-0,530	-0,206	-0,711	0,341	**-0,856**	-0,403
Si(OH)4	**-0,930**	-0,227	**-0,981**	0,702	0,701	**0,882**	**1**	0,710	0,764	0,707	0,433	0,702	0,601	0,578	-0,451	-0,145	-0,671	0,346	**-0,853**	-0,368
PO4	**-0,867**	-0,677	-0,760	0,330	0,733	0,580	0,710	**1**	0,158	**0,857**	0,428	0,209	0,372	0,443	-0,667	-0,543	-0,535	-0,325	-0,760	-0,707
Aceto	-0,548	0,225	-0,706	0,674	0,398	**0,767**	0,764	0,158	**1**	0,201	0,182	**0,816**	0,489	0,386	-0,113	0,229	-0,511	**0,835**	-0,524	0,068
Ala	**-0,887**	-0,624	**-0,798**	0,625	**0,791**	0,702	0,707	**0,857**	0,201	**1**	**0,796**	0,466	0,711	**0,789**	-0,711	-0,579	-0,616	-0,340	**-0,765**	-0,696
DCPU	-0,577	-0,277	-0,545	**0,820**	0,686	0,674	0,433	0,428	0,182	**0,796**	**1**	0,664	**0,934**	**0,975**	-0,484	-0,377	-0,435	-0,231	-0,510	-0,414
Metola	-0,608	0,201	-0,729	**0,966**	0,630	**0,907**	0,702	0,209	**0,816**	0,466	0,664	**1**	**0,874**	**0,806**	-0,293	-0,004	-0,590	0,531	-0,619	-0,114
E. coli	-0,635	-0,060	-0,675	**0,956**	0,726	**0,836**	0,601	0,372	0,489	0,711	**0,934**	**0,874**	**1**	**0,985**	-0,412	-0,220	-0,528	0,101	-0,590	-0,281
Entéro	-0,665	-0,190	-0,672	**0,923**	0,740	**0,807**	0,578	0,443	0,386	**0,789**	**0,975**	**0,806**	**0,985**	**1**	-0,483	-0,307	-0,524	-0,036	-0,610	-0,377
Dino	0,693	0,424	0,574	-0,367	**-0,811**	-0,530	-0,451	-0,667	-0,113	-0,711	-0,484	-0,293	-0,412	-0,483	**1**	**0,857**	**0,805**	0,336	**0,786**	**0,921**
Diato	0,457	0,358	0,293	-0,097	-0,594	-0,206	-0,145	-0,543	0,229	-0,579	-0,377	-0,004	-0,220	-0,307	**0,857**	**1**	0,703	0,625	0,495	**0,916**
Prymne	**0,771**	0,049	0,752	-0,565	**-0,781**	-0,711	-0,671	-0,535	-0,511	-0,616	-0,435	-0,590	-0,528	-0,524	**0,805**	0,703	**1**	-0,060	**0,818**	0,744
Crypto	-0,027	0,496	-0,238	0,322	-0,107	0,341	0,346	-0,325	**0,835**	-0,340	-0,231	0,531	0,101	-0,036	0,336	0,625	-0,060	**1**	-0,053	0,534
Cyano	**0,920**	0,230	**0,899**	-0,664	**-0,897**	**-0,856**	**-0,853**	-0,760	-0,524	**-0,765**	-0,510	-0,619	-0,590	-0,610	**0,786**	0,495	**0,818**	-0,053	**1**	0,716
Prasi + Chlo	0,649	0,428	0,487	-0,220	-0,754	-0,403	-0,368	-0,707	0,068	-0,696	-0,414	-0,114	-0,281	-0,377	**0,921**	**0,916**	0,744	0,534	0,716	**1**

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,01

<u>Annexe VII</u> : Fiche de surveillance des sites distribuée aux enfants (recto et verso).

Nom : ..... Prénom : ..... Classe : .....

<u>Site à surveiller</u> :

❑ Baignade

❑ Pont

Si tu constate une dégradation du matériel ou que tu as croisé des personnes autour du matériel, appelle moi

Mon Vini : **Charlotte 87 77 10 67**

Coche les jours où tu peux surveiller :

février 2016

01 lundi	02 mardi	03 mercredi	04 jeudi	05 vendredi	06 samedi	07 dimanche
08 lundi	09 mardi	10 mercredi	11 jeudi	12 vendredi	13 samedi	14 dimanche
15 lundi	16 mardi **Pose du matériel**	17 mercredi	18 jeudi	19 vendredi	20 samedi	21 dimanche
22 lundi	23 mardi	24 mercredi	25 jeudi	26 vendredi	27 samedi	28 dimanche

Charlotte: 87 77 10 67