

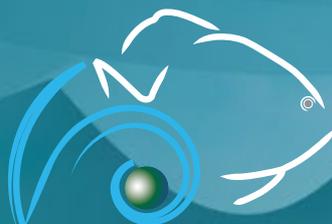


te reko pārau

Septembre 2022 - N°25



LE JOURNAL DES PROFESSIONNELS
DE LA FILIÈRE PERLICOLE



DIRECTION DES
RESSOURCES MARINES
PU FA'AHOTU MOANA







Les ancêtres Polynésiens ont toujours maintenu un lien très fusionnel avec leur environnement avec qui ils ne faisaient qu'un, ils avaient bien discerné les rythmes saisonniers d'abondance et de frugalité (Matarī'i i nī'a et Matarī'i i raro) et ce lien est encore exacerbé par la connexion intense du Fenua avec l'océan Moana. Ils ont su aussi lier l'influence de l'environnement aux organismes végétaux et animaux et notamment aux ressources marines.

C'est dans cet esprit que le programme MANA pour MANagement of Atolls a tenté d'apporter des réponses aux professionnels de la perliculture pour notamment la préservation et la prévision spatio-temporelle du collectage naturel des huîtres perlières. En effet, notre première ressource à l'exportation la Perle de culture de Tahiti n'a pu se développer autant que par la possibilité de collecter naturellement les jeunes huîtres perlières dans certains lagons du Fenua. Avec les perturbations engendrées de nos jours, par l'impact du changement climatique et celui des activités humaines, le développement d'outils de suivi et d'analyse du milieu marin est essentiel pour une meilleure gestion de la ressource et une pérennisation de la filière perlicole.

Ce programme a visé des lagons perlicoles au fonctionnement contrasté et permet d'identifier les processus qui peuvent influencer sur le collectage suivant les stocks naturels de nacres, les forçages climatiques et ce grâce à l'usage de modèles hydrodynamique. Le projet MANA (sur les atolls de Ahe, Raroia et Takaroa) et sa suite d'activités à Takapoto, Apataki et les Gambier apportent une meilleure compréhension des fonctionnements hydrodynamiques en lien avec la biologie de l'huître pour une meilleure gestion spatiale des activités perlicoles.

La combinaison de la connaissance ancestrale de notre environnement et le développement d'outils modernes détaillés dans ce numéro 25 du TE REKO PĀRAU spécial MANA, permettra nous l'espérons de nous aider à pérenniser la ressource en huître perlière et donc préserver l'activité de la filière perlicole.

Monsieur Heremoana MAAMAATUAIHUTAPU

*Ministre de la Culture, de l'Environnement,
des ressources marines, en charge de l'artisanat (MCE)*

Piha tōro'a o te fā'atere hau nō te hīro'a tumu,
te arutaimāreva e te hotu moana, e tī'ā'au i te rima'ī

PRÉSENTATION DU PROJET MANA	05 - 07
MODE D'EMPLOI DES FICHES	08 - 09
GLOSSAIRE	10 - 11

HYDRODYNAMIQUE DES LAGONS 12

La température	14 - 15
Les régimes de vents	16 - 17
Les régimes de vagues	18 - 19
Géomorphologie des couronnes d'atolls	20 - 21
La bathymétrie	22 - 23
L'oscillation australe El Niño (ENSO)	24
Mesures importantes pour l'hydrodynamique des lagons	26 - 27
Modéliser les courants	28 - 29
Les courants et leurs variations	30 - 31
Points clés de la partie hydrodynamique	32 - 33

BIOLOGIE DES HŪÎTRES PERLIÈRES 34

Stocks d'huîtres sauvages	36 - 38
Nourriture des huîtres perlières : le plancton	40 - 41
Croissance et ponte des huîtres perlières	42 - 43
Les évènements connus de mortalité	44 - 45
La dispersion larvaire	46
Points clés de la partie biologie	47

APPLICATIONS 48

Synthèse des patrons de dispersion larvaire	50 - 51
Hydrodynamique des lagons collecteurs : le cas de Mangareva	52 - 53
Comment valider les résultats des modèles ?	54 - 55
Restockage et gestion du stock d'huîtres	56
Points clés de la partie application	57

SYNTHÈSE 58

Synthèse des facteurs affectant le collectage	60 - 61
Ce qu'il faut retenir !	62

CRÉDITS ET RÉFÉRENCES 63

PRÉSENTATION DU PROJET MANA



Le collectage de naissains est une activité critique de la perliculture. Le collectage est affecté par les conditions environnementales du lagon, par l'état du stock naturel d'huîtres adultes et en élevage, et par les pratiques et décisions des perliculteurs. Le collectage est très variable dans l'espace du lagon et dans le temps, comme le montrent les variations observées par les professionnels d'une année sur l'autre ou la diminution progressive ou brutale du collectage dans certains atolls.

Le projet MANA avait pour objectif de fournir des connaissances et des outils de gestion utiles à 1) la compréhension de la variabilité du collectage, 2) la gestion des stocks d'huîtres afin de maintenir ce collectage, et 3) la planification de l'occupation des lagons perlicoles.

Le projet MANA, pour MANagement of Atolls c'est-à-dire Gestion des Atolls, s'est donc consacré principalement au développement d'outils de gestion des lagons dédiés à la perliculture dans l'Océan Pacifique Central, dont ceux de la Polynésie française et les Iles Cook. Le projet qui inclut de nombreux partenaires scientifiques en Polynésie, en Nouvelle-Calédonie et en métropole a démarré concrètement à la mi-2017, et a bénéficié d'une prolongation jusqu'en septembre 2022 en raison de la situation sanitaire liée à la Covid-19.

MANA est un projet financé par l'Agence National de la Recherche (ANR) et par les moyens navigants mis à disposition par la Commission Nationale de la Flotte Côtière (CNFC) avec l'utilisation du bateau Océanographique ALIS.

Localement la Direction des Ressources marines (DRM) a participé par des investissements en matériels de mesures, aux travaux de terrain, ou encore à l'édition de ce numéro de Te Reko Pārau.

Afin de pouvoir contribuer utilement aux objectifs, il était nécessaire de planifier toute une série d'activités et d'acquisition de données pour caractériser l'environnement des atolls choisis par la DRM en 2017, à savoir Raroia, Ahe, et Takaroa. Aux Iles Cook, le Ministry of Marine Resources (MMR) a choisi Manihiki. L'intérêt scientifique de ces 4 atolls était aussi d'offrir une palette de lagons avec différentes configurations de taille et d'ouverture sur l'océan, et de prendre en compte l'ensemble des connaissances déjà disponibles sur Ahe et Takaroa tout en incluant un atoll pour lequel quasi aucune connaissance scientifique n'était disponible, en l'occurrence Raroia.

PRÉSENTATION DU PROJET MANA

L'approche originale de MANA est d'utiliser la modélisation hydrodynamique 3D des lagons pour mieux comprendre la dispersion des larves d'huîtres, quand elles dérivent dans le lagon au gré des courants avant de se fixer sur un support naturel ou artificiel.

La modélisation hydrodynamique consiste à reproduire, avec des programmes informatiques, les courants dans un lagon en fonction de la bathymétrie, de la géomorphologie de la couronne de l'atoll, du vent, des vagues et de la marée, et d'autres facteurs climatiques régionaux. Par ailleurs, pour mieux reproduire la dispersion des larves, les modèles les plus évolués et réalistes peuvent bénéficier de l'information sur la nourriture disponible dans le lagon, sur la distribution des stocks et d'hypothèses sur la fréquence des pontes. On parle alors de modèle biophysique couplé.

MANA a donc développé pour la Polynésie française des modèles hydrodynamiques 3D sur Ahe, Takaroa et Raroia, qui sont maintenant utilisables pour les applications sur le collectage, pour optimiser l'usage de l'espace du lagon et pour analyser certaines périodes remarquables (fort collectage, mortalité, etc.). De plus, des activités de mesure de courant et d'évaluation des stocks ont aussi été conduites à Mangareva et Takapoto en 2019-2021, et ont commencé à Apataki depuis avril 2022.

Sous forme de fiches d'information classées en différents thèmes, le but de ce numéro de Te Reko Pārau est de rappeler des connaissances anciennes mais nécessaires au projet, et surtout, de présenter le type de résultats nouveaux produits par le projet MANA et sa suite, avec des exemples sur Ahe, Takaroa, Raroia, et sur Takapoto et Mangareva.

Tous les résultats ne peuvent pas être présentés ici, mais les plus importants sont illustrés. L'objectif est donc de faire partager aux professionnels de la filière perlicole quelques-uns des résultats scientifiques ou techniques principaux. La méthode choisie était de présenter les résultats de manière souvent simplifiée

mais pas pour autant simpliste. Souvent, l'information fournie est complexe, mais c'est naturel puisque le collectage l'est aussi !

L'exercice de transférer des informations scientifiques à un large public n'est pas facile, et il est probable que certains ne trouveront pas ce qu'ils attendent ici.

Toutefois, les professionnels qui ont été consultés depuis octobre 2021 avec des exemples de fiches ont été critiques, mais constructifs et encourageants, et ont permis d'essayer de trouver le bon compromis entre une information nouvelle, riche et utile, et la facilité à la lire et à la digérer.

Ci-après, avant d'aborder les fiches d'informations elles-mêmes, le lecteur trouvera quelques explications sur comment utiliser ces fiches, ainsi qu'un glossaire sur le vocabulaire technique.

1 : Logo du projet MANA



Logo du projet MANA au centre, ceinturé par le nom des sites d'études initiaux (Ahe, Takaroa, Raroia, Manihiki) et étendu depuis 2019 aux lagons de Mangareva aux Gambier et de Takapoto aux Tuamotu. Le dernier site étudié est Apataki depuis avril 2022.



2 : Partenaires initiaux du projet MANA

Le projet ANR MANA est porté par l'IRD, via l'unité de recherche ENTROPIE. L'Ifremer était initialement présent au début tant qu'unité propre (Ifremer à Nouméa) qui a ensuite rejoint ENTROPIE. Les autres unités de recherche présentes au début du projet et financées par l'ANR sont EIO (Papeete), MIO (Marseille), LOG (Lille), LOCEAN (Nouméa) et LEGOS (Nouméa). Les organismes gouvernementaux et gestionnaires sont représentés par la DRM et le MMR des Îles Cook. D'autres partenaires ont rejoint le projet, notamment le LEMAR et le LOPS avec des scientifiques travaillant depuis le lagon de Brest. La société GeoPolynésie a effectué l'acquisition des données bathymétriques des lagons de Raroia et Takume.



Remerciements : Ce numéro du Te Reko Parau a été conçu et compilé par Serge Andréfouët et Océane Bionaz de l'IRD avec le support de Vetea Liao, Cedrik Lo et Tiare Penilla Y Perella de la DRM.

Certaines fiches ont aussi fait l'objet de relectures par quelques personnes volontaires impliquées dans le projet, par une dizaine de perliculteurs présents sur différents atolls ou îles, et par différents personnels techniques de la DRM.

Maururu roa aux populations des atolls étudiés, aux différentes instances et à toutes les personnes qui ont permis de mener à bien les travaux de ce projet en Polynésie française.

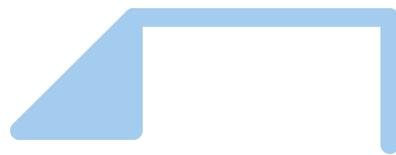
Ont principalement contribué scientifiquement au projet MANA : Andréfouët Serge (chef de Projet), André Laure, Aucan Jérôme, Basset Caline, Beliaeff Benoit, Bionaz Océane, Bruyère Oriane, Buttin Julie, Chauveau Mathilde, Chinain Mireille, Desclaux TERENCE, Dutheil Cyril, Gatti Clémence, Jullien Swen, Le Gendre Romain, Le Moullac Gilles, Lefebvre Sébastien, Liao Vetea, Lo Cédrik, Lo-Yat Alain, Menkes Christophe, Monaco Cristian, Paul Mégane, Pinazo Christel, Reisser Céline, Rodier Martine, Sangare Nathanaël, Sekeh Claire, Thomas Yoann, Van Wynsberge Simon, Varillon David, Verpoorter Charles.

Ont contribué aux opérations hyperbares dans les différents sites : Bourgeois Bertrand, Butscher John, Campanozzi-Tarahu Joseph, Follin Yann, Tertre Fabien, Trophime Thomas.

Enfin, nous remercions tout l'équipage de l'ALIS sous le commandement de Jean-François Barazer.

Ce numéro du Te Reko Pārau peut être cité ainsi : Andréfouët S., Bionaz O., Liao V. 2022. Numéro Spécial MANA. Te Reko Pārau, 25, Direction des ressources marines, Papeete. 64 pages.

Ce numéro présente les approches et les résultats principaux du projet MANA sous forme de fiches d'information synthétiques. Les résultats sont divisés en 4 thématiques principales



- 1) Hydrodynamique des lagons
- 2) Biologie des huîtres perlières
- 3) Application
- 4) Synthèse

À la fin de chaque section se trouve aussi une fiche Résumé.

Ces thèmes et fiches apparaissent dans un ordre qui se veut logique, c'est-à-dire en essayant d'ordonner les thèmes en fonction de leurs influences sur les autres thèmes. Par exemple, le régime des vents influence la dispersion des larves qui elle-même influence le choix des zones de restockage. Ainsi, la figure 1 présente les liens, indiqués par des flèches, entre les différentes fiches. Une flèche partant d'un compartiment A jusqu'à un compartiment B signifie que le compartiment A a un effet sur le B, ou encore que le compartiment B a besoin de l'information du compartiment A pour être mis en œuvre.

En caractère épais dans les cadres de la figure 1, ce sont les fiches qui donnent une information spécifique à chaque atoll tandis qu'en caractère normal, on trouve des informations plus générales, par exemple sur les méthodes utilisées.



Les fiches se veulent indépendantes. Elles peuvent donc être lues sans avoir forcément lu les autres. Par exemple, il n'est pas nécessaire de lire toutes les fiches avant celles de la "dispersion larvaire" pour comprendre la fiche "dispersion larvaire". Toutefois, ces fiches en amont fournissent des informations complémentaires. On trouvera donc aussi quelques redites d'une fiche à l'autre, pour leur permettre d'être lue de manière indépendante et autonome.

Dans la mesure du possible, nous avons essayé de limiter l'usage de mots trop techniques ou spécialisés. Certaines fiches utilisent néanmoins des termes **mis en gris clair** qui sont expliqués simplement dans le glossaire ci-après.

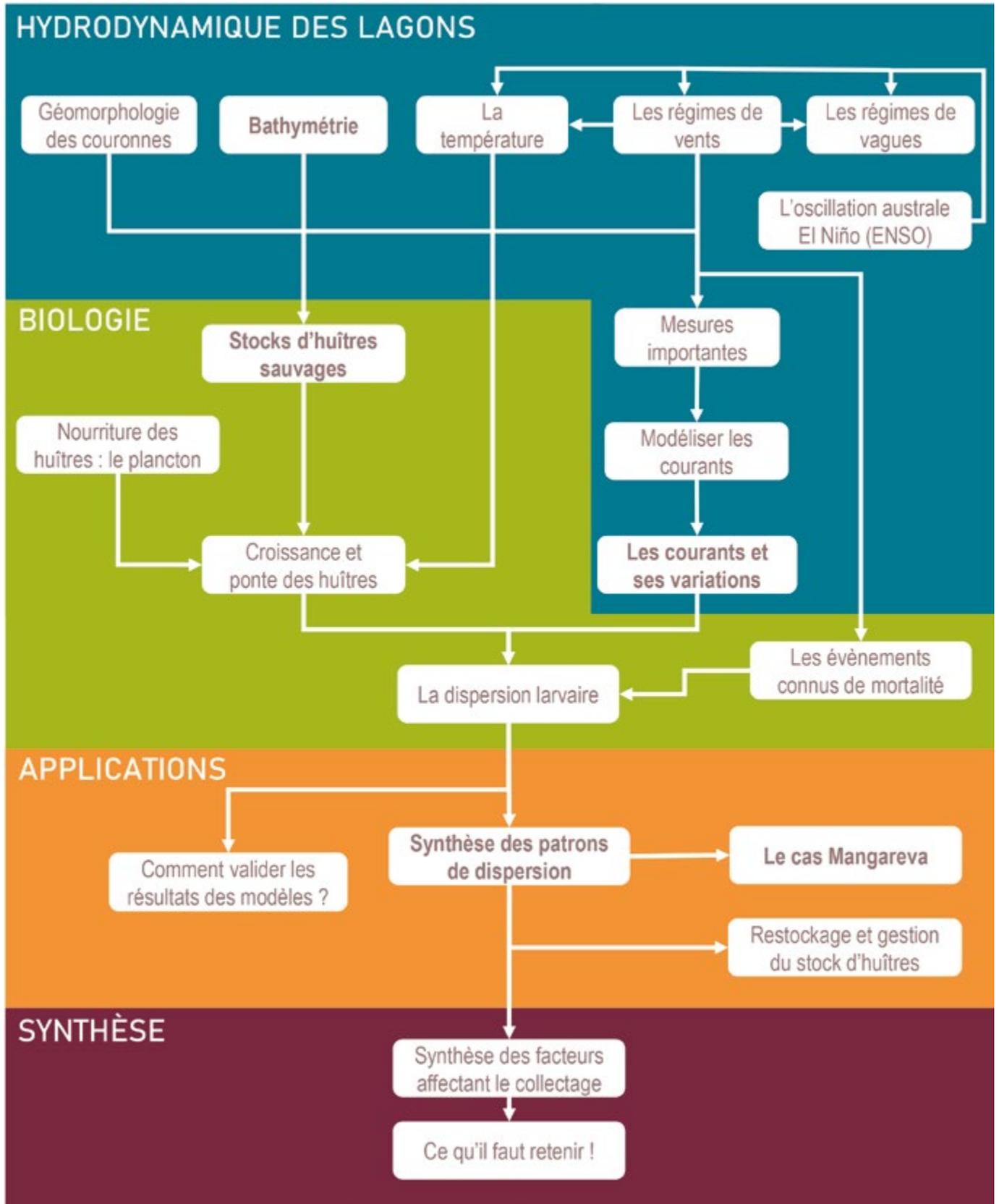


Figure 1. Structures des fiches et relations entre les différents sujets abordés dans le présent document.

ADN : l'Acide Désoxyribo Nucléique est une molécule biologique qui contient le code génétique des organismes vivants. Son analyse permet d'identifier les différentes espèces mais aussi un groupe (ou une famille) au sein d'une espèce, ou encore des individus d'une espèce. La génétique est la science qui analyse l'ADN.

Bathymétrie/bathymétrique : relatif à la profondeur de l'eau.

Benthos/benthiques : ensemble des organismes vivant sur le fond de l'océan ou des lagons.

Chronophage : qui demande du temps.

Conglomérat : (ou *papa*) plate-forme dure et fossilisées présente dans les atolls au niveau des *motu*, résultant de l'accumulation d'organismes du récif et de sédiments coralliens pendant des périodes où le niveau de l'océan était plus élevé que de nos jours.

Densité : le nombre d'individus par unité de surface (par mètre carré, ou kilomètre carré).

Déphasage : différence de temps, ou de distance, entre le sommet de deux ondes (par exemple, entre deux ondes de houles).

Détritique : qui est formé au moins partiellement de débris (coralliens).

Extrapolation : donner une valeur à quelque chose en fonction d'une tendance (par exemple : *"le temps se réchauffe, il fait 30 degrés aujourd'hui, on extrapole que demain il fera 31 degrés"*).

Flux : écoulement, qui se mesure en général en mètre cube par seconde.

Gamète : cellule reproductrice mâle ou femelle.

Hétérogénéisation : rendre les choses hétérogènes, par exemple en associant des éléments de nature différente.

Homogénéisation : rendre les choses homogènes, par exemple en associant des éléments de nature proche.

Hydrodynamisme/hydrodynamique : étude des mouvements des fluides, qu'ils soient liquides ou gazeux, et de ce qu'ils peuvent transporter.

Images/produits satellitaires : images ou cartes créées par l'analyse d'information fournie par des satellites.

Intertidal : espace côtier qui est sous l'eau à marée haute et à sec à marée basse.

Méroplancton : il est composé des larves d'espèces qui passent le début de leur vie dans le plancton.

Modèle : outil informatique permettant de reproduire et simuler la réalité.



Modélisation : représentation par des programmes informatiques d'un système naturel ou de société par un modèle, en général plus simple et plus facile à appréhender que la réalité.

Océanographique : relatif à l'étude scientifique du milieu marin.

Pathogène : qui peut causer une maladie.

Pélagique : ensemble des organismes qui ne vivent pas sur le fond mais qui nagent et flottent en pleine mer.

Physiologie/physiologiques : qui concerne l'activité d'un organisme vivant (nutrition, reproduction, etc.).

Phytoplancton : plancton végétal, composé d'organismes microscopiques capables de réaliser la photosynthèse et donc de tirer leur énergie du soleil, tout comme les plantes terrestres.

Pinacle : formation corallienne très verticale qui dépasse, atteint ou arrive tout près de la surface.

Plancton : ensemble des animaux et végétaux de très petites tailles flottant passivement ou activement dans les milieux aquatiques. Composé notamment de phytoplancton (végétal) et de zooplancton (animal).

Proxy : qui permet de représenter un paramètre plus facilement ou économiquement que le paramètre lui-même (par exemple : un bon proxy de l'activité perlicole d'un lagon est le nombre de bouées visibles sur le lagon).

Simulation : représentation d'un processus via un modèle mathématique.

Sondeur acoustique : appareil servant à mesurer la profondeur de l'eau grâce à des ondes de son.

Sondeur mono-faisceau : sondeur acoustique qui n'émet qu'une seule onde à la fois.

Sondeur multi-faisceaux : sondeur acoustique émettant plusieurs ondes à la fois, ce qui permet une plus grande couverture de l'espace à mesurer.

Statique : qui est fixe, qui n'évolue pas.

Sub-affleurant : qui est situé juste sous la surface, et donc qui n'est pas, ou presque pas, visible.

Unités géomorphologiques : une unité géomorphologique du récif est un élément du récif défini par son histoire géologique et sédimentologique, ses formes, et sa position dans l'espace du récif. Par exemple : un *kaoa* est un récif, souvent droit et perpendiculaire au rivage, formé par les coraux ou par l'accumulation de sédiments peu profonds pendant des dizaines ou centaines d'années.

Zooplancton : comprend les animaux de petite taille qui se nourrit d'autres matières vivantes.

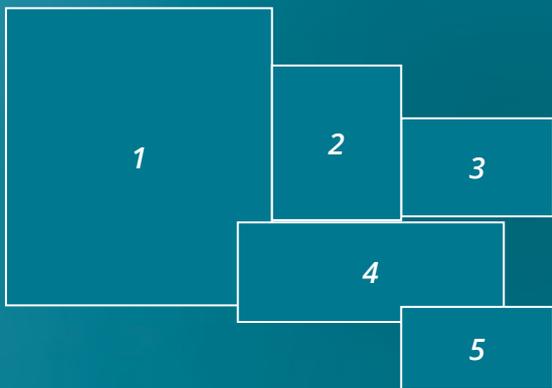


Photo 1 - Pose d'un capteur de pression sur la pente externe de Raroia, afin de mesurer la houle et les variations du niveau de la mer.

Photo 2 - Prélèvement d'eau à différentes profondeurs à Raroia.

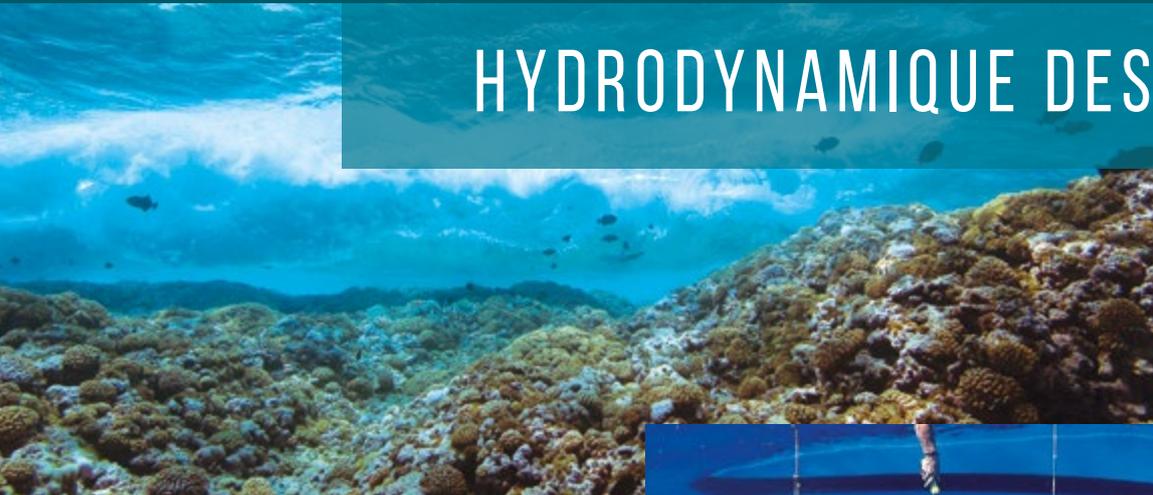
Photos 3 et 4 - Les vagues océaniques contribuent au renouvellement des eaux du lagon.

Photo 5 - Instruments utilisés pour caractériser l'environnement du lagon à différentes profondeurs (filet à plancton, bouteille de prélèvement d'eau, sonde multiparamètres).





HYDRODYNAMIQUE DES LAGONS



→ LA TEMPÉRATURE



Pourquoi s'intéresser à la température ?

La température est un facteur environnemental qui influe sur les processus **physiologiques*** des huîtres perlières *P. margaritifera* mais également sur la qualité des perles produites, notamment le lustre qui dépend de la structure des couches d'aragonite déposées et qui s'altère avec une température élevée (> 30°C). Au niveau physiologique, la température a un effet sur la maturation sexuelle, la ponte, la croissance et la mortalité des huîtres. Ces dernières possèdent un optimum thermique, c'est-à-dire une gamme de température idéale à laquelle ses fonctions biologiques seront assurées voire optimales. Ainsi, le succès de la culture d'huîtres perlières, pour le collectage et l'élevage, va dépendre des températures et plus particulièrement des variations de température.

Dans les lagons d'atolls, la température peut varier selon différents facteurs qui ont des influences différentes en surface, au fond, sur les bords ou au milieu du lagon. Le premier facteur de variation qui impacte tout le lagon est la saison. D'une saison à l'autre, les écarts peuvent atteindre 4-5°C en surface. Ensuite, l'ensoleillement ou les épisodes de pluie par exemple vont rapidement impacter la température en surface puis en profondeur. De manière générale, sur la moyenne d'une journée la différence entre la surface et le fond (à 20 m) reste toutefois faible toute l'année (< 1°C). En revanche, à 30 ou 40 m, la différence avec la surface atteint facilement 1°C.

Le vent entraîne un mélange des eaux du lagon et une **homogénéisation*** des températures. Le vent mais aussi tous les autres facteurs qui affectent l'**hydrodynamique*** d'un lagon, comme la marée et les vagues, influent également sur la température via les échanges d'eaux entre océan et lagon, et leur mélange. La géomorphologie de l'atoll et le degré d'ouverture à l'océan (en fonction de la présence de passes et *hoa*) sont donc aussi des facteurs importants puisqu'ils contrôlent ces échanges océan-lagon. Ainsi, d'un atoll à l'autre, à surface égale, la température des lagons est variable en fonction des différences d'ouverture et de profondeur. En conséquence, la reproduction, la croissance, la mortalité des *P. margaritifera* et la répartition et le succès du collectage peuvent aussi varier différemment dans l'espace de chaque lagon, et dans le temps.

Sous l'effet du changement climatique, les températures devraient augmenter dans le futur, parfois au-delà de la gamme optimale ou supportable par les huîtres, ce qui pourra impacter la culture des huîtres perlières et donc l'industrie de la perle. Ainsi, le suivi sur le long terme des températures est important.

Mesure de la température

La température de l'eau à l'échelle d'un lagon complet peut être mesurée de 2 façons différentes. La première méthode consiste à récupérer des données *in situ* (réelles sur le terrain) à l'aide de sondes de température de très grande précision (0,002°C pour l'instrument Seabird SBE56, figures 1 et 2). Ces sondes sont posées à des points et profondeurs d'intérêt et font l'acquisition automatique de données durant une période et à une fréquence (plusieurs mesures par heure par ex.) qui varient selon l'objectif de l'étude. Les données sont ensuite téléchargées sur ordinateur une fois que les sondes sont récupérées à un rythme qui dépend de l'accessibilité de l'atoll et de la capacité des instruments. Typiquement, de un à dix capteurs par lagon, et un à trois dans l'océan, sont déployés par atoll. Les limites de cette approche sont donc plutôt d'ordre logistique. Dans les atolls de Polynésie française, l'équipement, la pose, ainsi que les opérations de maintenance des capteurs peuvent représenter un coût important pour le pays notamment à cause de l'éloignement des sites perlicoles.



Figure 1. Capteur SBE56 utilisé par la DRM. Le stylo donne l'échelle.



Figure 2. Pose d'un capteur SBE56. Sur le terrain, le capteur est mis en place dans un tube PVC protecteur.

La deuxième méthode consiste à utiliser les données de température de l'eau en surface (ou SST pour *Sea Surface Temperature* en anglais) obtenues à l'aide de satellites, avec une précision de l'ordre du tiers de degré. Cette méthode permet en général de mesurer la température de la couche superficielle de l'eau, et parfois en profondeur (produit Multi-scale Ultra-High Resolution, ou MUR par ex.). En théorie, il est aussi possible d'obtenir des données depuis les années 70 : cela permet d'étudier l'évolution des températures au fil des décennies. Il y a toutefois de nombreuses limites à cette approche, à commencer par la couverture nuageuse qui empêche la prise de mesure. Un travail supplémentaire reste nécessaire pour surveiller en routine la température des lagons d'atolls.



Utilisation des données satellitaires

Pour les atolls semi-fermés de petite taille tels que Tatakoto et Takaroa, les valeurs de SST ne rendent pas compte précisément des mesures *in situ* tandis que pour des grands lagons assez ouverts comme à Raroia ou aux Gambier, la différence est faible notamment pour le produit satellitaire* MUR évoqué précédemment. La résolution spatiale des produits (en général 1 km) ne permet donc pas de travailler directement sur les petits lagons sans que des précautions soient prises pour corriger les valeurs.

Pour l'atoll de Raroia, les différences de température entre les valeurs SST de MUR et les températures *in situ* étaient plus importantes durant la saison chaude et pour la zone la plus chaude du lagon.

Quand la comparaison entre mesures *in situ* et SST est satisfaisante, l'utilisation des valeurs de SST pour comprendre l'impact de la température sur la physiologie des nacres est possible puisque les estimations par exemple de la durée de la phase larvaire et du nombre de pontes, calculées d'après des SST ou d'après des mesures *in situ*, sont très similaires. Tout en gardant en tête les limites des données satellitaires, la généralisation de l'usage des données SST est recommandée pour les sites adéquats.

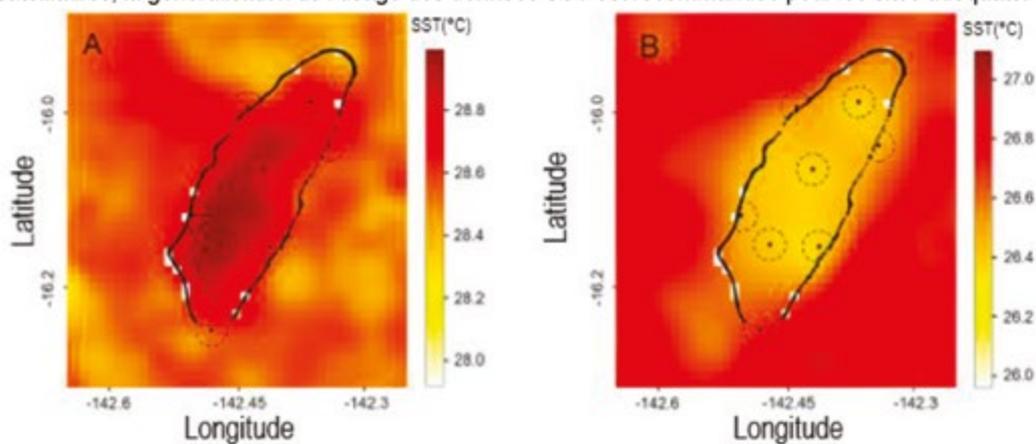


Figure 3. Valeurs de SST pour le lagon de l'atoll de Raroia et autour de l'atoll, obtenues avec un produit SST de type MUR en saison chaude à gauche (le 08/02/2019) et saison fraîche à droite (29/07/2018).

Le produit SST montre ainsi que le lagon est plus chaud que l'océan en saison chaude et plus froid que l'océan en saison froide.

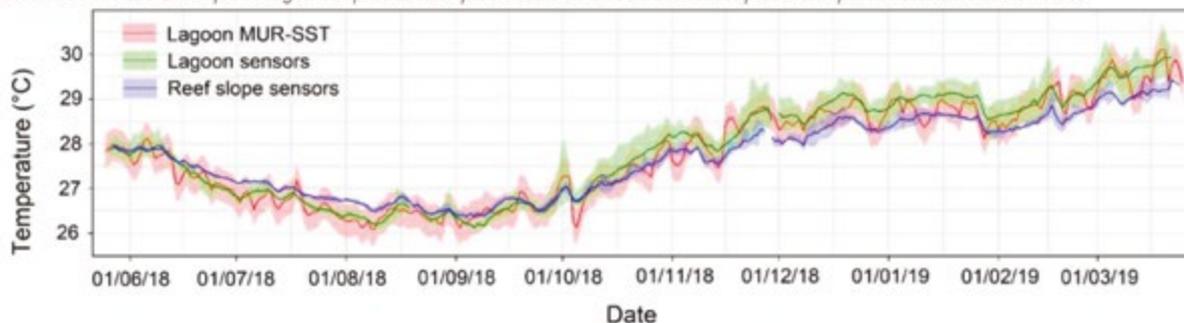


Figure 4. Série de données temporelles des températures journalières obtenues *in situ* à Raroia dans le lagon (courbe en vert) et sur la pente externe (bleu), et par le produit satellitaire MUR dans le lagon (rouge). La période de mesure va de juin 2018 à mars 2019. Ce type de données précises serait très difficile à collecter par les périculteurs eux-mêmes.

Limites et recommandations

Les données SST provenant des satellites possèdent certaines limites. Premièrement, la valeur de température obtenue représente généralement la température d'une fine couche d'eau située à l'interface entre la mer et l'air, et ne rend pas compte de la température réelle en profondeur. Or, les huîtres cultivées vivent entre la subsurface et 10 mètres de profondeur. Ces problèmes s'additionnent à l'absence de données fiables les jours nuageux.

L'utilisation de SST comme *proxy** de la température est au final considérée comme fiable pour Raroia mais des études spécifiques pour chaque lagon doivent être réalisées pour conclure sur leur possible utilisation dans les autres îles. Pour cela, il reste nécessaire de continuer l'acquisition de mesures *in situ* sur de longues périodes.

➔ LES RÉGIMES DE VENTS



Pourquoi s'intéresser aux régimes de vents ?

Le vent est l'un des principaux facteurs intervenant dans la circulation des eaux en surface et en profondeur dans les lagons. Ceci est tout particulièrement vrai pour les atolls qui ont un degré d'ouverture à l'océan faible, ce qui est le cas de la plupart des atolls producteurs de perles. Les îles Gambier sont très ouvertes sur l'océan notamment dans le Sud du lagon mais la circulation est aussi tributaire du vent. Selon l'intensité du vent, celui-ci va jouer différemment sur l'équilibre du lagon et sur les organismes. Par exemple, en cas de vent fort, la circulation en surface et en profondeur dans le lagon sera renforcée, des vagues se formeront en renforçant l'agitation au niveau des zones de collectage, d'élevage et des *karena* abritant les huîtres sauvages peu profondes. Or, l'agitation est un facteur favorisant la ponte. A l'inverse, l'absence de vent se traduira par une stratification des eaux du lagon qui ne se mélangent plus, ce qui entraîne des risques de limitation en oxygène près du fond, ou des risques de développement de **plancton*** (avec pour conséquence des eaux vertes, rouges ou noires), ce qui modifie la chaîne de nourriture dans le lagon. Ces événements favorisent la mortalité chez *Pinctada margaritifera*.

Les larves de *P. margaritifera* sont relativement peu mobiles. Elles sont, de ce fait, soumises à la circulation des eaux dans le lagon, qui est elle-même fonction du régime des vents dans les atolls. La dispersion des larves et l'endroit où au final elles pourront se fixer, y compris sur des collecteurs, sont donc dépendants du vent. De plus, le vent va également influencer la disponibilité en nourriture pour les larves et les adultes, et donc leur croissance.

Les conditions de vent sont le principal facteur permettant d'expliquer directement ou indirectement la variabilité des pontes, la distribution et la qualité de la nourriture nécessaire au développement des huîtres, et le succès (ou l'échec) du collectage dans certaines zones pour certaines périodes ou années compte-tenu des courants induits par les différents régimes de vents. Toutefois, les régimes de vents ne permettent pas à eux-seuls d'expliquer complètement ces processus.



Figure 1. Conditions de vents extrêmement calmes aux Gambier à gauche, et extrêmement forts à Ahe à droite.

Caractérisation du vent

Les différents régimes de vents sont caractérisés et étudiés de 2 façons :

Les données *in situ* sont obtenues grâce à des stations météorologiques qui sont situées à Tahiti, Bora Bora, Hiva-Oa, Mangareva, Rapa et Tubuai. D'autres îles, plus nombreuses, disposent de stations automatiques. Celles-ci possèdent plusieurs capteurs capables de mesurer des paramètres physiques et météorologiques dont la vitesse et la direction du vent (ex. figure 2).

Les données de vent peuvent être fournies par des **modèles*** météorologiques à une résolution de quelques kilomètres et plusieurs fois par jour. Ce sont des programmes informatiques dont les calculs s'appuient sur des paramètres mesurés au sol et par des satellites, et sur différents processus et interactions intervenant dans l'atmosphère et à la surface des océans, et ceci grâce à des équations complexes et des supercalculateurs. L'avantage de ce type de modèles est qu'ils permettent de fournir des données pour les années précédentes (50 à 70 ans en arrière) mais aussi de réaliser des prévisions bien que toujours incertaines localement au-delà d'une semaine. Cependant, il est possible d'avoir des prédictions des tendances sur le long terme comme c'est le cas pour les oscillations de type El Niño ou La Niña.

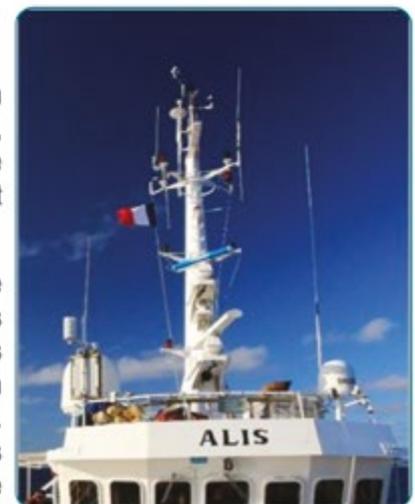


Figure 2. Station météorologique disposée sur le haut du mat du navire océanographique* ALIS.



Les régimes de vents identifiés

Les modèles météorologiques ont permis d'identifier dans le Pacifique Central Sud et donc en Polynésie française, à l'échelle journalière, 4 types de régimes de vents. Leurs caractéristiques sont détaillées ci-dessous et dans la figure 3 :

Le régime 1 (R1) est représenté par des vents forts d'Est-Sud-Est et est le plus fréquent dans le Pacifique Central Sud.

Le régime 2 (R2) correspond à des vents d'Est et de Sud-Est, et est celui qui dure le moins parmi les 4 régimes.

Le régime 3 (R3) est également défini par un vent d'Est mais a une saisonnalité (plus fréquent en été austral) et une persistance plus importante que R2.

Le régime 4 (R4) est représenté par un vent de secteur Nord-Est, il est le moins fréquent des régimes de vents.

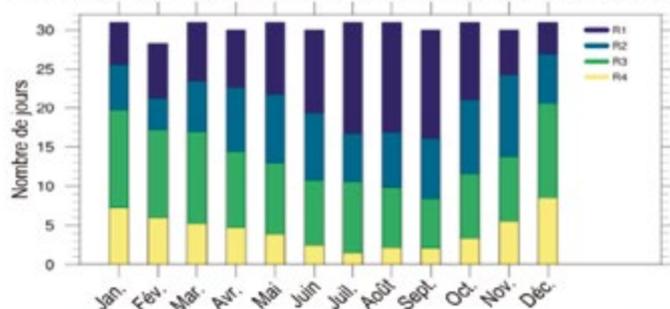
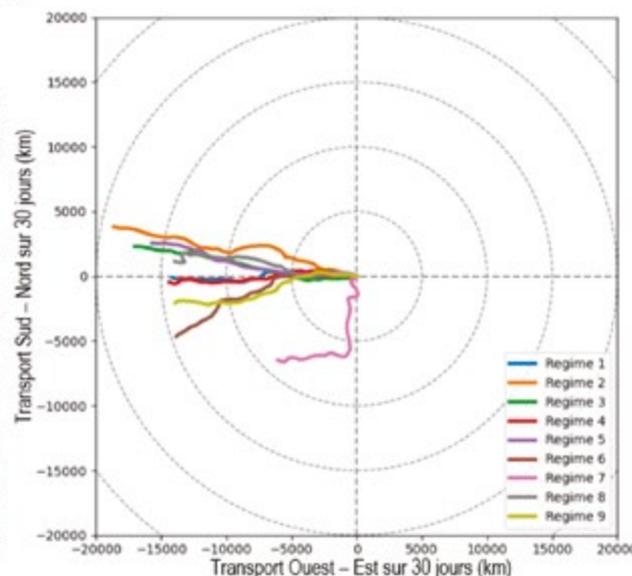


Figure 3. Présence des régimes de vents journaliers selon le mois de l'année, d'après 37 ans d'observations (1980-2016) pour la région Pacifique Central Sud. Le régime R1 est prédominant durant l'hiver austral tandis que les régimes R3 et R4 sont plus fréquents en été austral. Le régime R2 est quant à lui présent tout au long de l'année avec la même proportion. D'une île à l'autre de la Polynésie, ces tendances régionales peuvent toutefois varier.

A l'échelle de la durée de vie d'une larve d'huître perlière qui dérive dans un lagon, c'est-à-dire sur une durée au maximum d'un mois, les régimes sont différents des régimes journaliers ci-dessus. Ils sont au nombre de 9, avec des variations locales (figure 4).

Figure 4. Hodographe représentant les régimes de vents sur une période de 30 jours de l'atoll de Ahe. La figure se lit de la façon suivante : 1) la direction du vent est indiquée par la direction que prend la ligne en partant du centre. Cette direction varie au cours du temps ; 2) la vitesse des vents est représentée sur les axes. Plus la ligne s'éloigne du centre et plus le vent a été fort sur la période de 30 jours ; et 3) chaque couleur représente un régime de vent. Par exemple, le régime de vent R7 (rose) se dirige vers le Sud avant de changer d'orientation et devenir un vent d'Est, allant donc vers l'Ouest. On voit aussi que le régime R2 (orange) est relativement constant en direction et le plus intense tandis que R7 est le moins intense. En effet, la ligne R2 est bien plus longue que pour R7. Pendant les 30 jours, un élément transporté par le vent R2 aura parcouru près de 20 000 km.



Influence de l'oscillation australe El Niño (ENSO)

Les différentes phases du phénomène ENSO vont avoir une influence sur les différents régimes de vents identifiés. En période El Niño, les régimes de vents journaliers R2 et R4 présentés figure 3 seront plus fréquents tandis que R1 et R3 seront moins fréquents. Ces effets sont inversés durant la période La Niña. Lors de la phase neutre d'ENSO (pas d'El Niño ou La Niña en cours), seul R4 sera affecté avec une diminution de sa fréquence.

Les vents sont plus forts pour les îles de la Société et plus faibles dans les Tuamotu pendant une phase El Niño extrême. Pour la phase modérée, ce sont des anomalies de vent d'Est qui se produisent accompagnées d'une diminution de la vitesse de vent pour tous les atolls des Tuamotu. Ceci contribue à une baisse de la circulation dans les lagons et à leur réchauffement. Enfin, en période La Niña, on a des anomalies de vents de Nord-Est et une légère augmentation de la vitesse des vents.

Prévisions futures

Dans un contexte de changement climatique, les projections montrent que les régimes R1, R2 et R3 seront plus intenses pour les atolls du Pacifique Central Sud à l'exception des Gambier où la vitesse des vents diminue. Pour le régime R4, sa vitesse devrait augmenter partout sauf pour le Nord des Tuamotu.

→ LES RÉGIMES DE VAGUES



Pourquoi s'intéresser aux régimes de vagues océaniques ?

Les activités de collectage et d'élevage des huîtres perlières sont fortement dépendantes de la qualité et du renouvellement de l'eau du lagon. Ces derniers sont principalement liés aux régimes de marées, de vents et de vagues dans les atolls. Dans les atolls fermés sans passes, c'est essentiellement la houle qui affecte le renouvellement des eaux.

Les vagues qui déferlent sur le récif influent indirectement sur la circulation et qualité de l'eau dans le lagon. En effet, la houle qui arrive sur le récif entraîne un flux* entrant vers le lagon via des chenaux appelés *hoa* et donc un transport d'eau de l'océan au lagon. L'efficacité de ce transfert dépend des vagues mais aussi de la géomorphologie de l'atoll, c'est-à-dire du nombre et taille des *hoa*, et la hauteur et configuration des platiers récifaux vis-à-vis des différentes houles incidentes. En cas de montée d'eau dans le lagon, le surplus est évacué principalement par les passes lorsqu'elles sont présentes, ou via les *hoa* qui ne sont pas directement exposés à la houle.

Les vagues, avec les entrées d'eau océanique qu'elles génèrent, peuvent influencer la température du lagon et créer des différences au sein de ce dernier suivant la position des *hoa*. Les épisodes de fortes houles peuvent ainsi rapidement modifier les conditions du lagon et entraîner des pontes d'huîtres perlières. A l'inverse, l'absence prolongée de houle et de renouvellement peut entraîner une élévation de la température. A l'exception des zones sous l'influence d'une passe, en cas de vents nuls ou très faibles qui s'ajouteraient à des conditions de vagues nulles ou très faibles, le lagon est alors complètement statique*. Les conditions deviennent alors rapidement propices à des événements de mortalité de masse, comme les atolls de Hikueru ou Takaroa en ont connu ces 30 dernières années.

Contrairement au vent dont les régimes s'exercent de manière stable sur quelques centaines de kilomètres, les régimes de vagues sont particuliers et spécifiques à quasiment chaque atoll voire chaque portion de couronne d'atoll, notamment dans les Tuamotu. En effet, la position relative des atolls entre eux crée des secteurs protégés 'sous le vent' des houles. Ces secteurs protégés sont dépendants de la direction de la houle et de la position des autres atolls, et donc spécifiques à chaque atoll.

Mesure et modélisation de la houle océanique et des courants dans les *hoa*

Les vagues dans l'océan sont caractérisées par leur direction, leur amplitude et leur période, c'est-à-dire le temps (en secondes) entre deux vagues successives. La mesure utilisée est la hauteur de houle significative (notée H_s). Elle correspond à la moyenne des hauteurs du tiers supérieur des vagues. Ces mesures peuvent être obtenues précisément par les deux méthodes décrites ci-après.

Des capteurs de pression (ex. RBR Duet, figure 1) enregistrant à haute fréquence (chaque seconde par ex.) les données de pression (et de température) de l'eau sont posés à environ 10 mètres de profondeur sur la pente externe. Il s'agit donc d'une mesure ponctuelle, très près du récif et très fine temporellement.

Des modèles* informatiques basés, entre autres, sur les données de satellites océanographiques* permettent d'obtenir les valeurs de direction, période et de H_s et ce, depuis les années 1990. Les données de modèles sont régulières dans l'espace (tous les 5 km environ par ex.) et dans le temps (toutes les 6 heures par ex.).

Les deux types de mesures, *in situ* et modélisée, informent aussi, en tout point, sur la présence de différents trains de houle (houle du large, houle du vent local, etc.) car il est possible de séparer chaque composante.

En ce qui concerne les courants dans les *hoa*, ceux-ci sont idéalement mesurés à l'aide d'un courantomètre qui va du plus simple (qui utilise l'angle d'inclinaison de l'appareil) au plus complexe (utilise l'effet Doppler), comme illustré en figure 1.



Figure 1. Photos d'instruments de mesure utilisés pour l'étude des effets de la houle. A gauche, un capteur de pression (RBR Duet) protégé par un caisson en PVC (au milieu) pour mesurer les vagues sur la pente externe de Ahe. A droite, l'appareil bleu (Marotte HS) mesure la vitesse et direction du courant au niveau du capteur grâce à l'inclinaison de l'appareil engendrée par la force du courant. L'appareil orange sur la photo de droite est un courantomètre à effet Doppler (de type Nortek Aquadopp). Il mesure la vitesse et direction du courant en plusieurs points entre le fond et la surface. L'instrument est déployé ici dans un *hoa* de Raroia.



Les régimes de vagues identifiés

Dans le Pacifique Central Sud, 3 régimes de vagues océaniques ont été identifiés avec 20 ans de données issues de modèles.

Le régime 1 (R1) correspond à une houle de Sud-Ouest avec une amplitude moyenne relativement élevée de 3,2 m et une période de 14 s. Il est particulièrement fréquent pendant l'hiver austral.

Le régime 2 (R2) est caractérisé par des vagues de Sud-Sud-Est d'une hauteur moyenne de 2,4 m et une période de 11,5 s. Il est le plus fréquent (44,7%) et est présent toute l'année bien qu'il soit plus fréquent en hiver austral.

Le régime 3 (R3) est caractérisé au Nord par une houle de Nord-Ouest avec une amplitude moyenne de vague égale à 2 m et une période supérieure à 13 s. Au Sud, il correspond à une houle de 2,2 m de hauteur provenant du Sud-Sud-Ouest et avec une période inférieure à 13 s. On le retrouve principalement durant l'été austral.

Les caractéristiques de ces différents régimes vont être modulées suivant la position exacte du site dans le Pacifique Central mais aussi localement par la présence ou non d'atolls sur la trajectoire des houles. Il est possible de regrouper les atolls (figure 2) et les secteurs d'atolls (figure 3) en fonction des types de houle auxquels ils vont être exposés.

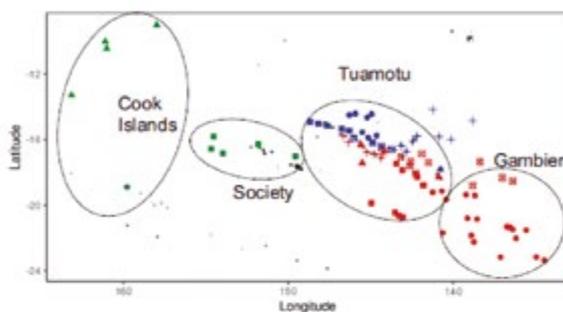


Figure 2. Les différents groupes d'îles identifiés selon leur exposition aux vagues (en fonction de la hauteur de vague, leur période et direction). La carte montre par exemple que les îles et atolls à l'Ouest (en vert) sont exposés différemment que les atolls des Tuamotu Ouest (en bleu). Au sein de chaque groupe de couleur, il existe des différences aussi, par ex. les carrés verts de la Société sont soumis à des régimes différents des triangles et ronds verts au niveau des Iles Cook.

Le premier groupe (vert) est plus exposé aux régimes R1 et R3, le Sud-Est des Tuamotu et les Gambier sont eux, plus exposés aux régimes R1 et R2, et aux vagues d'alizés. Le Nord des Tuamotu est le moins exposé à la houle mais il subit le régime R3 et les vagues des alizés.

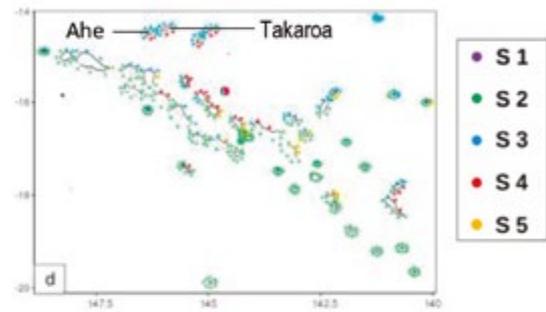


Figure 3. Si on regarde le détail des régimes de vagues, autour de chaque atoll des Tuamotu il existe cinq groupes (S1-S5) de couronnes exposées différemment pour chaque atoll. Notamment, les secteurs Sud des atolls grands à moyens sont souvent différents des secteurs Nord, au contraire des petits atolls du Sud-Est. Par ailleurs, les atolls du Nord, qui sont protégés par les atolls du Sud, ont aussi des types de secteurs particuliers (en rouge).

Les groupes de couronnes S1 et S2 ont des caractéristiques proches excepté que S1 a une valeur de H_s plus faible et une exposition plus tournée vers le Sud. S3 et S4 représentent des couronnes exposées au Nord-Est et pour lesquelles les houles ont des valeurs de la période et de H_s les plus faibles. Le groupe S5 est soumis à des houles intermédiaires avec une orientation Est à Sud-Est.

Les courants dans les *hoa* : cas de Raroia

A Raroia, un atoll avec une grande passe pour lequel des mesures de vagues et du niveau de la mer ont été réalisées en 2018-2019 sur le côté océanique et dans le lagon, les résultats montrent que dans les *hoa*, les flux d'eau étaient majoritairement dirigés vers le lagon. Les courants étaient d'intensité faible avec des vitesses pouvant atteindre entre 0,5 à 0,9 m/s (Figure 4). Ce courant est dépendant des conditions de houle sur la pente externe mais aussi des différences de niveaux entre l'océan et le lagon, qui s'expliquent notamment par l'effet de la marée. En effet, l'amplitude de la marée est atténuée par un facteur de 2 et un décalage de 3 à 4 heures est observé entre l'océan et le lagon. La marée explique ainsi 60-70% les variations de niveau d'eau du lagon.

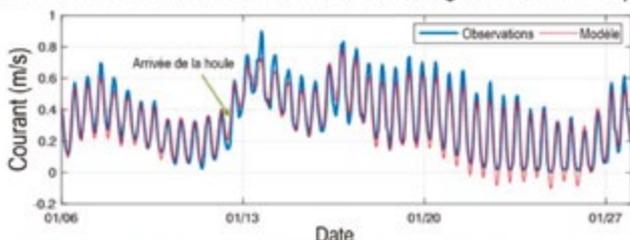


Figure 4. Vitesse du courant observée (en bleu) et modélisée (en rouge) dans un hoa du Nord-Ouest de l'atoll de Raroia entre le 6 et le 27 janvier.

L'influence de la marée sur la vitesse du courant est représentée par des oscillations rapides (toutes les 6 heures environ) sur la figure. L'effet de la houle est représenté par des variations plus importantes de l'amplitude de la marée et de vitesse de courant. Par exemple, l'augmentation de la vitesse observée le 13 janvier correspond à l'arrivée d'une houle forte qui ensuite, s'atténue progressivement.

Les modèles (en rouge) permettent d'estimer des vitesses de courant dans les *hoa* proches de celles observées.

➔ GÉOMORPHOLOGIE DES COURONNES D'ATOLLS



Pourquoi étudier la géomorphologie des couronnes d'atolls ?

La géomorphologie correspond à l'étude et la caractérisation des structures récifales qui composent un atoll. Les atolls peuvent être décomposés en 3 systèmes écologiques : le lagon, la couronne récifale et la pente externe océanique.

La géomorphologie des couronnes d'atolls permet, et ce particulièrement dans le contexte du fonctionnement des lagons, de caractériser leur degré d'ouverture et leur exposition à la houle. Le degré d'ouverture des couronnes d'atolls (présence d'une passe, nombre et largeur de *hoa*) peut faciliter sur le court-terme (échelle horaire et journalière) les échanges d'eau entre l'océan et le lagon ou au contraire les limiter. La connaissance de la géomorphologie des atolls permet d'estimer les flux* et le temps de séjour de l'eau dans les lagons. Pour les atolls très fermés (Taiaro ou Niau par ex.), les processus sont différents, le temps de résidence et le renouvellement de l'eau sont déterminés par l'écoulement des eaux souterraines (processus très lent), l'évaporation et les précipitations. Combinée à l'étude des courants et d'autres facteurs hydrodynamiques* (houle, vent) la géomorphologie des couronnes d'atolls permet de quantifier le temps de renouvellement de l'eau, qui lui-même impacte le fonctionnement biologique des lagons d'atolls, et pour comparer le fonctionnement de différents atolls.

Ce temps de renouvellement contrôle divers processus biologiques dans les lagons notamment la quantité de plancton*. Ce dernier est la nourriture des huîtres perlières et est important pour leur croissance et cycle de vie. Il est donc important d'améliorer les connaissances sur le renouvellement de l'eau pour comprendre les variations observées dans les populations de *P. margaritifera* telles que les variations de densité* d'huîtres dans le lagon, les variations de collectage au fil du temps et dans l'espace du lagon, ou encore pour expliquer des événements de mortalité restreints à une zone.

Description de la géomorphologie des couronnes

La géomorphologie des couronnes d'atolls peut être caractérisée et cartographiée soit à l'aide d'imageries satellitaires* à haute résolution, soit grâce à des photos aériennes. Les couronnes sont classées selon 3 niveaux. Le premier consiste à les séparer simplement selon qu'elles correspondent à des zones 'végétalisées', 'intertidales', 'submergées' ou 'émergées'. Ensuite, le 2^{ème} niveau de classification est composé d'unités géomorphologiques* et se base sur la forme et l'emplacement de ces derniers (ex. 'platier extérieur côté océan', 'platier intérieur côté lagon' ou 'hoa', figure 1). Enfin, le dernier niveau de description correspond aux unités géomorphologiques détaillées finement. On a, par exemple, le *conglomérat** récifal, les flèches de *hoa*, les dunes sédimentaires ou encore la crête à algues rouges mais bien d'autres existent (plusieurs dizaines). Toutefois, pour caractériser l'ouverture à l'océan d'une couronne d'atoll, le 1^{er} niveau de description suffit.



Figure 1. Exemples d'unités géomorphologiques du niveau 2 de description des couronnes d'atolls.

Les types de couronnes

La cartographie des couronnes d'atolls au 1^{er} niveau de description a permis de mettre en évidence la présence de 9 types de couronnes d'atolls en Polynésie française d'après leur composition en zones 'végétalisées', 'intertidales', 'submergées' ou 'émergées'. Ces types sont nommés simplement de 1 à 9. Les caractéristiques d'ouverture à l'océan et d'exposition à la houle de chaque type sont présentées dans le tableau ci-dessous et des exemples sont présentés à la page suivante.

Tableau 1. Degré d'ouverture et exposition à la houle des types de couronnes d'atolls

Type	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Degré d'ouverture (%)	0,02	0,40	0,40	0,67	0,40	0,40	0,40	0,02	0,02
Exposition à la houle	Nord	Nord-ouest	Sud	Sud	Sud-est	Sud	Sud	Nord	Est

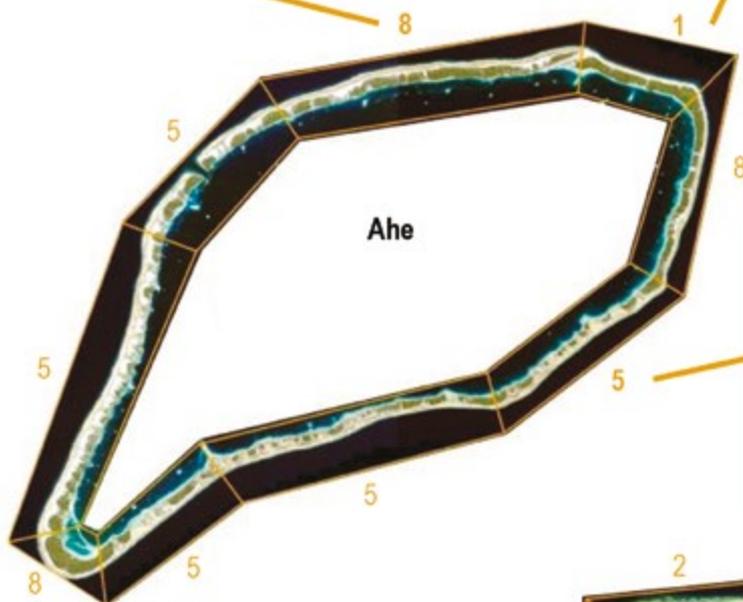


Exemples de variations de types de couronnes : le cas de Ahe et Hikueru

Ici, nous illustrons comment les types de couronnes peuvent varier autour du périmètre d'un atoll. L'illustration est faite pour deux atolls qui sont très différents d'un point de vue composition en types de couronnes et ouverture sur l'océan. D'autres analyses montrent aussi que souvent, les types de couronnes sont liés à des expositions particulières (Tableau 1), notamment par rapport à la houle et aux vagues de vent, voire aux cyclones même si ceux-ci sont rares.

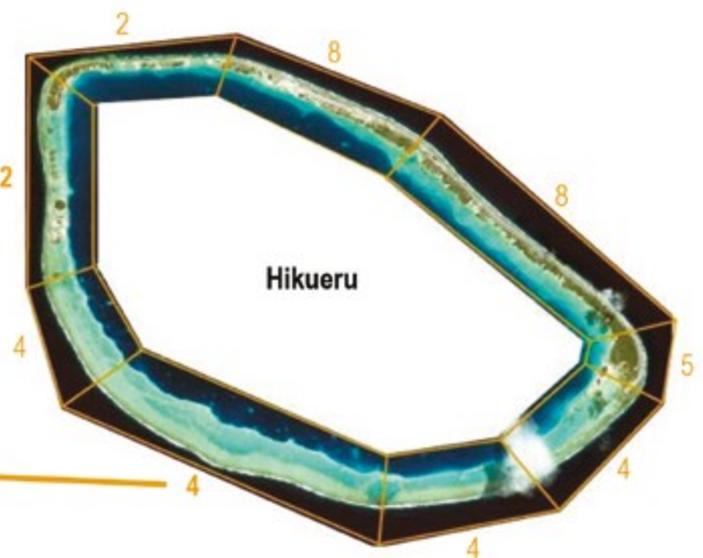
Les couronnes de type 8 sont très peu ouvertes sur l'océan limitant ainsi les échanges d'eau au niveau de ces zones. Elles sont souvent sur des secteurs exposés Nord, Est ou Ouest. La végétation et les étendues détritiques* et de conglomérat se partagent l'espace terrestre.

Les couronnes de type 1, tout comme 8, ont un degré d'ouverture faible à nul, il y a peu d'échanges entre l'océan et le lagon. Elles sont le plus souvent de secteur Nord et sont très végétalisées.



Les couronnes de type 5 ont un degré d'ouverture intermédiaire (20-40% de leur linéaire) qui est dû à la présence de nombreux *hoa*. Ces derniers permettent des flux d'eau importants. L'espace est équilibré entre *hoa* et platier, végétation, sédiments et conglomérats, et zone intertidale. On les rencontre dans toutes les directions d'exposition.

Les couronnes de type 2 présentent peu de parties émergées mais principalement des zones submergées. De ce fait, elles sont très ouvertes sur l'océan (> 40% de leur linéaire) et sont souvent sur des secteurs exposés à une houle de Nord-Ouest.



La particularité des couronnes de type 4 est qu'elles présentent quasi uniquement des parties submergées et donc un degré d'ouverture à l'océan important (> 70% de leur linéaire). Ces zones sont majoritairement rencontrées sur des secteurs exposés aux houles du Sud.

Figure 2. Types de couronnes (description dans les encadrés) présents à Ahe et Hikueru. La couronne récifale des atolls a été séparée en plusieurs segments dont chaque segment représente un type de couronne mais aussi un secteur d'exposition particulier (Est, Ouest, Nord, Sud, etc.). Tous les types de couronnes (1 à 9) ne sont pas présents sur un même atoll mais un type peut se trouver sur plusieurs atolls différents. Par exemple à Ahe, seules les couronnes de type 1, 5 et 8 sont présentes. Les couronnes 8 sont présentes à Ahe et Hikueru.

→ LA BATHYMÉTRIE



Pourquoi s'intéresser à la bathymétrie ?

La **bathymétrie*** est l'étude de la profondeur et des reliefs du fond marin. Son utilité et ses applications sont variées. La connaissance de la bathymétrie d'un lagon est une information essentielle pour la navigation, pour son exploitation, et pour caractériser le milieu. De nombreux paramètres varient en fonction de la profondeur. C'est le cas par exemple de l'intensité lumineuse, de la température, de la disponibilité en nutriments provenant du fond, ou encore de l'agitation due aux effets du vent. Ces éléments sont tous des facteurs qui influencent directement ou indirectement la présence ou non d'huîtres perlières *Pinctada margaritifera*, et leur développement aux divers stades de leur évolution : larvaire, juvénile et adulte. Ainsi, la distribution et la **densité*** du stock naturel d'huîtres perlières dépendent de la profondeur dans de nombreux atolls.

La connaissance de la profondeur est également directement utile à la gestion et à l'organisation des activités perlicoles puisque les contraintes, coûts et efforts à fournir seront différents selon la profondeur à laquelle les différents matériels doivent être posés. Aussi, la bathymétrie permet de calculer le volume qui est une information utile à la définition des plafonds écologiques définissant le niveau maximum d'exploitation du lagon. La bathymétrie, couplée à des données de comptage à différentes profondeurs permet d'estimer et d'évaluer le stock d'huîtres présent dans un lagon. D'un point de vue suivi et surveillance des lagons, la bathymétrie peut être utilisée pour la **modélisation*** des processus **hydrodynamiques*** (ex. courants) qui régissent le fonctionnement d'un lagon d'atoll. Enfin, la planification du recensement et de l'enlèvement des déchets perlicoles est aussi grandement dépendante de la connaissance de la bathymétrie.

Mesure de la bathymétrie

La profondeur des lagons peut être mesurée de 2 façons différentes. La méthode la plus précise est l'utilisation de **sondeurs acoustiques*** à partir de petites embarcations. L'appareil émet une onde sonar qui est réfléchiée par le fond. La profondeur est ensuite déduite à partir du décalage de temps entre l'émission et la réception des ondes. Ce type de mesures est effectué avec des **sondeurs mono-faisceau***, et de plus en plus avec des **sondeurs multifaisceaux*** qui permettent une couverture complète et précise. Toutefois, les très petits fonds (< 3 m en pratique) ne sont pas cartographiables avec cette technique.

Une autre méthode consiste à analyser des **images satellitaires***. Cette méthode se base sur le lien qu'il y a entre la couleur de l'eau observée sur l'image satellite et la profondeur. Les mesures sont cependant limitées à une profondeur de 20-25 m et entachées d'erreurs. Les images satellitaires peuvent toutefois être utilisées efficacement pour identifier les **pinacles*** (*karena*) **sub-affleurants*** ou massifs récifaux.



Figure 1. Un sondeur multifaisceaux consiste en une tête – le transducteur (à droite) – en bas d'un mât qui est lui-même fixé sur une petite embarcation (en haut à gauche), et d'une centrale d'acquisition (en bas à gauche). L'ensemble est piloté avec un ordinateur portable muni d'un logiciel de suivi d'acquisition en temps réel (non montré ici). Le modèle* illustré est un système Norbit iWBMS qui a été utilisé en Polynésie française par la société GéoPolynésie pour l'acquisition des données de Raroia, Takume, Takapoto et Mopelia.

Caractéristiques de quelques atolls

Les caractéristiques principales calculées à l'aide des sondeurs et images satellitaires pour les différents lagons d'atolls étudiés sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 1. Caractéristiques principales des atolls étudiés

Atoll	Superficie (km ²)	Volume (km ³)	Profondeur max (m)	Profondeur moyenne (m)	Nombre de pinacles
Raroia	367,95	11,86	68	32,2	1434
Ahe	144,63	5,82	71	40,6	141
Takaroa	85,96	2,22	48	25,8	246
Takapoto	78,64	1,95	43	24,8	194
Takume	40,98	0,83	58	20,4	56
Mopelia	28,92	0,75	41	26,0	11



Les cas particuliers de certains atolls étudiés

Sur les atolls pericorés étudiés récemment, les profondeurs maximales vont de 41 (Mopelia) à 71 m (Ahe). Les profondeurs moyennes sont comprises entre 20,4 (Takume) et 40,6 m (Ahe). Les lagons des atolls de Takaroa, Takapoto, Takume et Mopelia ont une profondeur moyenne comprise entre 20 et 30 m.

L'atoll de Raroia, qui est le plus grand étudié ici, n'est pas le plus profond. La taille des lagons n'est pas toujours liée à leur profondeur maximale ou moyenne. Le nombre de pinacles varie aussi selon les atolls avec la plus faible valeur pour Mopelia (11) et la plus élevée pour Raroia (1 434 ou 1 618 si on inclut les *karena* situés dans moins de 20 mètres de profondeur). Les raisons de ces différences ne sont pas explicables facilement.

Pour quelques atolls, les zones les plus profondes correspondent souvent à des puits circulaires situés au centre de dépressions parfois appelées *koko*.

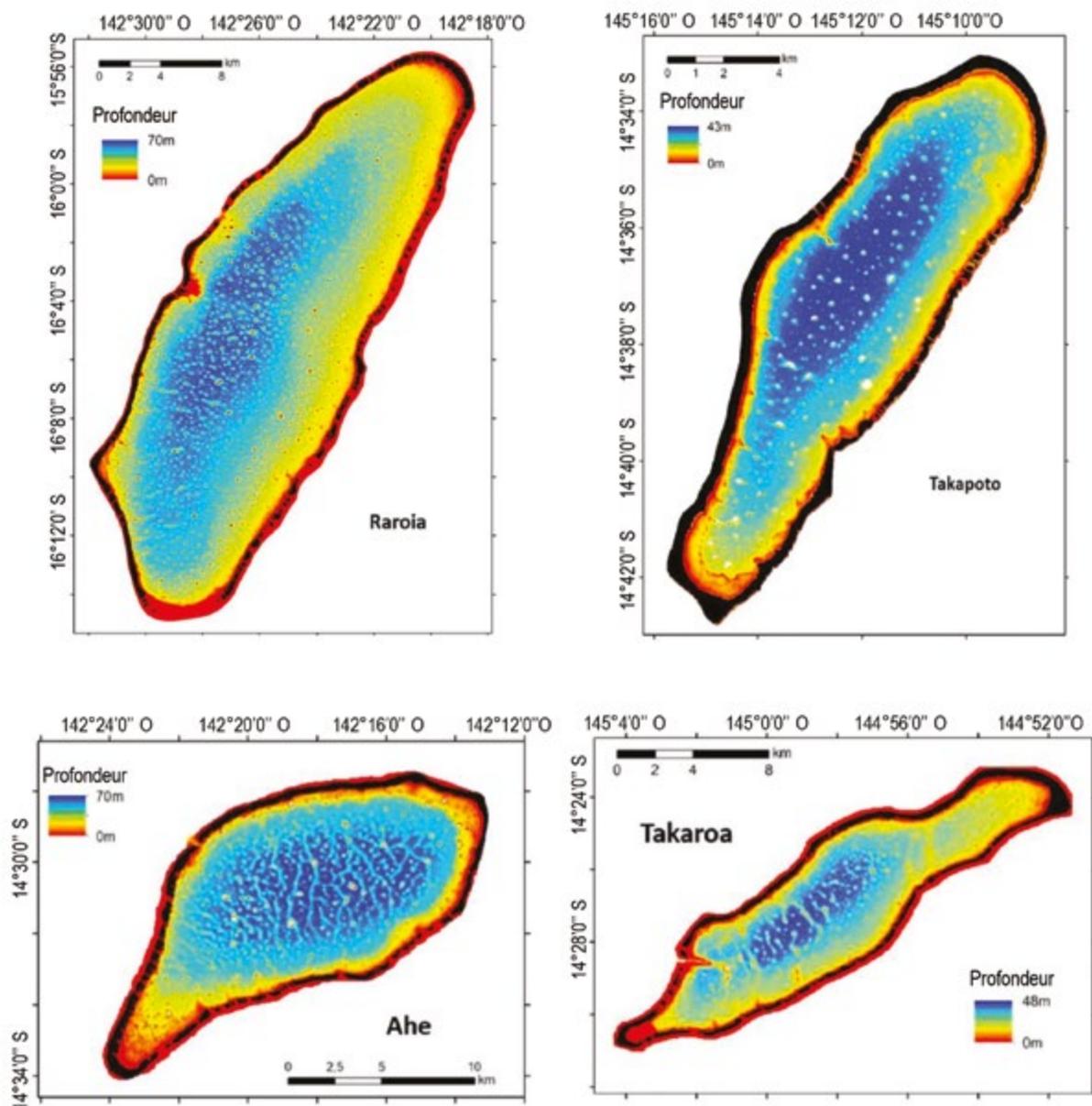


Figure 2. Cartes bathymétriques présentant la profondeur des lagons de certains atolls étudiés (Raroia, Takapoto, Ahe et Takaroa). Raroia et Takapoto ont été cartographiés au sondeur multifaisceaux (à 1 mètre de résolution), Ahe et Takaroa au sondeur mono-faisceau (à 50 mètres de résolution).

➔ L'OSCILLATION AUSTRALE EL NIÑO



Qu'est-ce que l'oscillation australe El Niño (ou ENSO) ?

Le climat mondial, dont celui de l'océan Pacifique, est sujet à des variations climatiques interannuelles. Chaque année peut être différente de la précédente. La principale cause de ces variations est l'oscillation australe El Niño. Ce phénomène correspond à l'apparition de 2 phases climatiques principales, dites El Niño et La Niña respectivement. Ce sont des épisodes qui, en pratique, se répètent tous les 3 à 7 ans environ. Ces événements touchent l'ensemble de l'océan Pacifique et évoluent souvent sur une période de 8 mois à 2 ans.

Dans le Pacifique, en situation normale, les vents d'Est qui sont dominants poussent les eaux chaudes en surface de la côte américaine vers les côtes asiatiques et australiennes. Les eaux chaudes s'accumulent alors à l'Ouest. L'eau s'évapore et se condense formant ainsi des nuages qui entraînent des précipitations relativement abondantes dans les tropiques, en Asie, Papouasie, etc. Les eaux océaniques, poussées par les vents d'Est, plongent aux limites du Pacifique Ouest, puis reviennent en profondeur dans le Pacifique Est en se refroidissant, entraînant enfin une remontée de nutriments (on parle alors d'upwelling) à l'Est du bassin Pacifique. Cette circulation normale explique le régime saisonnier des pluies dans la région, de la température de l'eau ou encore de la productivité des océans.

Pendant un épisode El Niño, les alizés s'affaiblissent, voire s'inversent avec des vents qui soufflent alors plus souvent d'Ouest en Est. Les eaux chaudes se redistribuent ainsi plus vers le Pacifique Central et Est et les upwelling sur la côte américaine disparaissent. A l'inverse d'une année normale, les précipitations vont alors augmenter en Amérique du Sud et la sécheresse sévit à l'Ouest du bassin Pacifique.

A l'inverse, les épisodes La Niña correspondent à une intensification des alizés et vents d'Est provoquant une augmentation de la température de la mer, des cyclones et des précipitations dans l'Ouest du bassin Pacifique, et de plus grandes sécheresses dans l'Est.

Les conséquences sur la Polynésie

Lors des épisodes El Niño, les courants marins de surface vont beaucoup plus vers l'Est. Ces derniers étendent des eaux plus chaudes jusqu'à l'Est du Pacifique. La baisse des vents et de la couverture nuageuse et les eaux plus chaudes constituent un stress pour les organismes vivant dans les lagons près de la surface, comme les huîtres en élevage. Les eaux plus chaudes dans le Pacifique Central augmentent aussi le risque de cyclones en période El Niño, y compris dans la zone Société-Tuamotu-Gambier. A l'inverse, le risque cyclonique décroît en période La Niña. Les cyclones de 1982-1983 sont expliqués par un phénomène El Niño particulièrement fort. Les années 1982-1983, 1997-1998 et 2014-2016 sont considérées comme celles où les épisodes El Niño ont été les plus forts à ce jour.

Le déplacement des masses d'eaux en période El Niño a aussi pour conséquence d'entraîner une remontée de la thermocline (limite entre les eaux chaudes de surface et les eaux froides en profondeur) améliorant ainsi la productivité primaire et l'abondance de plancton* océanique dans cette zone.

Les implications pour la perliculture

Le phénomène ENSO peut fortement impacter l'industrie perlière. En effet, les variations d'intensité et de direction du vent influencent la dispersion des larves d'huîtres perlières dans un lagon. Le mélange des eaux qui permet l'apport de nutriments est aussi affecté. Enfin, un océan plus productif peut aussi apporter un changement de type de plancton même dans les lagons avec les échanges par la passe et les *hoa*.

Pendant un épisode El Niño, le changement de température va avoir des effets directs sur la durée de la phase larvaire, la croissance des huîtres et le nombre de pontes. Dans une certaine limite, un accroissement de la température peut être bénéfique (augmentation des pontes ou meilleur développement larvaire par ex.), mais au-delà d'une certaine température (> 32°C), les animaux peuvent être très stressés, voire mourir massivement. Le changement de conditions affecte aussi tout l'environnement et peut se traduire par une efflorescence de plancton moins consommé par les huîtres.

L'oscillation australe El Niño est donc un phénomène climatique qui peut influencer à la fois négativement et positivement le succès du collectage et de la production perlicole.

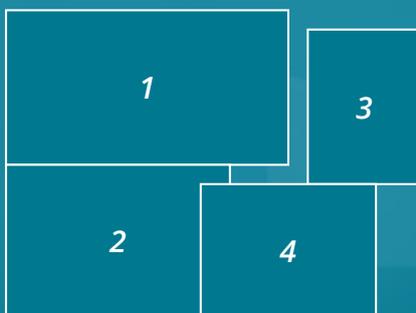


Photo 1 - Le navire océanographique ALIS a été utilisé pour plusieurs campagnes de mesures dans les lagons perlicoles.

Photo 2 - Un laboratoire humide permet des analyses diverses d'échantillons d'eau ou d'animaux et leurs préservations.

Photo 3 - Son équipement permet le déploiement de sondes multiparamètres.

Photo 4 - Il permet aussi la plongée en scaphandre autonome (annexes, compresseur, etc.).

→ MESURES IMPORTANTES POUR L'HYDRODYNAMIQUE DES LAGONS



Les principaux processus hydrodynamiques à caractériser dans un atoll

Pour comprendre comment est régi l'**hydrodynamique*** d'un lagon et son influence sur la periculture, il faut caractériser la dynamique et les interactions entre : 1) le niveau du lagon et de l'océan ; 2) les courants dans le lagon, les *hoa* et les passes ; et 3) la température.

En pratique, il faut d'abord mesurer sur le terrain ces trois paramètres pour calibrer et valider ensuite un **modèle*** hydrodynamique du lagon qui permettra ensuite de faire des **simulations*** en fonction des conditions de marée, de vent et de houle.

Pour définir la stratégie de mesure, qui est à optimiser pour chaque atoll, les appareils de mesure disponibles à la DRM sont positionnés à des points stratégiques afin d'obtenir des mesures les plus complémentaires et les plus longues possibles.

La houle et la marée sont les 2 facteurs qui influent le plus sur les échanges d'eau entre l'océan et le lagon notamment via les *hoa* et les passes. Donc, des capteurs de pression (RBR *duet*) sont positionnés sur la pente externe de l'atoll dans 10 m de profondeur afin de mesurer côté océan la marée, la houle (sa hauteur, période et direction) et la température. On prend soin d'avoir des instruments sur différents secteurs d'exposition à la houle (Nord, Sud, Est, Ouest). Ensuite, pour mesurer l'effet de la houle et de la marée sur la vitesse des courants dans les *hoa*, des courantomètres sont positionnés dans les *hoa* en face des capteurs de pression océaniques. Les courantomètres utilisés sont soit des Marotte HS qui mesurent en un point unique la vitesse du courant grâce à l'inclinaison du capteur engendrée par le courant ; ou soit des ADCP, de type Aquadopp (marque Nortek), qui peuvent mesurer depuis le fond les courants sur la verticale dans la colonne d'eau à des intervalles de profondeur réguliers.

Pour mesurer les courants dans la passe et leurs effets sur le lagon, deux autres ADCP (marque Teledyne, opérationnels jusqu'à 30 m de fond) sont utilisés ; un au centre de la passe permet d'étudier le courant dans celle-ci ; un deuxième, un peu plus loin dans le lagon mais face à la passe permet d'étudier l'influence de ce courant de passe sur le lagon.

D'autres ADCP (Teledyne), utilisables dans 50 m de profondeur, permettent d'étudier la circulation dans le lagon sous l'effet cette fois des vents, en se mettant hors de l'influence directe de la passe. Ils sont positionnés près des bords de lagon pour caractériser les courants plongeants ou ceux qui remontent à la surface sur ces bords de lagon, en fonction du vent.

Enfin, pour étudier les niveaux du lagon, qui varient aussi en fonction de la marée, des vagues et du vent, d'autres capteurs de pression RBR *duet* sont mouillés à différents endroits du lagon, dans 8 m de profondeur. Ceci permet de caractériser les différences intra-lagon (dans un même lagon) qui pourraient exister, du Nord au Sud et d'Est en Ouest, et aussi de mesurer le retard et l'atténuation de la marée entre océan et lagon, et à l'intérieur du lagon.

Pour le suivi de la température, chacun des instruments cités ci-dessus mesure aussi la température, et des capteurs dédiés de type Seabird SBE56 sont déployés en complément des capteurs RBR, à des profondeurs situées entre 40 m et la surface.



Figure 1. Instruments de mesure utilisés pour étudier l'hydrodynamique du lagon. Les trois premiers instruments sont les courantomètres qui servent à mesurer les courants. De gauche à droite, on a les deux instruments petits fonds avec l'ADCP Aquadopp (A) et le marotte HS (B). L'ADCP Teledyne (à l'horizontale sur la photo) illustre les courantomètres profileurs profonds (C). Plus à droite, le RBR *duet* (D) permet de mesurer la pression de l'eau. Enfin, le SBE56 (E) est un capteur de température. Ces instruments nécessitent un entretien régulier (changement de batterie, nettoyage) et leur déploiement sur des sites éloignés comme les atolls perlicoles est une entreprise coûteuse et parfois logistiquement complexe, notamment pour les instruments profonds.



Les sites d'échantillonnage : exemple de Raroia

L'atoll de Raroia a été pris comme exemple ci-dessous pour illustrer le choix des sites de mesure, en fonction des processus décrits précédemment qui influent tous sur la perliculture. Par exemple, selon leur intensité, le mouvement des masses d'eau entraîne un mélange plus ou moins prononcé des eaux et donc une **homogénéisation*** des températures. Ce paramètre peut impacter les huîtres perlières *P. margaritifera* à tous ses stades de vie (larves, naissains, adultes). C'est pour cela qu'à Raroia, la température a été mesurée en 10 points avec des capteurs SBE56 dédiés, à différentes profondeurs, 2 et 20 mètres de fond. Ce réseau est complété par tous les autres appareils (RBR, ADCP, Marotte) qui eux aussi fournissent une information de température sur leurs lieux de mouillage.

Au final, la pose de longue durée d'instruments précis mesurant à haute fréquence permet l'étude fine des courants du lagon en séparant les variations saisonnières, journalières ou très rapides de l'ordre de l'heure à la minute. Ceci est important pour notamment comprendre les variations du succès de collectage dans un lagon. Chaque lagon étant particulier, il est nécessaire et utile d'étudier de manière intégrée, comme décrit ci-dessus, différents lagons d'atolls. A ce jour Ahe, Takaroa, Raroia et le lagon des Gambier ont été instrumentés. Le prochain devrait être Apataki.



Figure 2. Emplacement du matériel qui a permis de mesurer de manière continue entre août et décembre 2018 et à haute fréquence (parfois toutes les secondes) les **processus hydrodynamiques*** de l'atoll de Raroia.

Le type d'appareil (forme du symbole) utilisé dépend du type de données à récolter (température, pression pour le niveau de la mer et les marées, courants dans les hoa, la passe et dans le lagon).

Les appareils sont posés à différentes profondeurs (représentées par des variations de couleur) et à des emplacements qui varient selon le processus étudié.

➔ MODÉLISER LES COURANTS



Qu'est-ce que la modélisation hydrodynamique et pourquoi y faire appel ?

La **modélisation* hydrodynamique*** a pour objectif de reproduire ou prédire les courants dans les lagons d'atolls pericolas à l'aide d'outils informatiques. Un **modèle*** hydrodynamique fournit une simplification réaliste de processus complexes que l'on cherche à expliquer et reproduire.

Cet outil permet de prédire des événements futurs et de reproduire une situation moyenne, comme pendant un régime de vent donné, mais aussi de réaliser des **simulations*** sur des périodes très précises, en fonction des conditions environnementales réelles (par exemple houle et vent, etc.). Il est également possible d'étudier et quantifier l'effet de chaque paramètre environnemental intégré dans le modèle sur la dynamique du lagon. Cet outil permet donc d'étudier à la demande la sensibilité de chaque paramètre (courant, niveau du lagon, température, etc.) à différentes conditions. Par exemple, l'outil permet d'étudier la dispersion des larves d'huîtres perlières soumises aux courants lagonaires qui sont eux-mêmes variables en fonction des différents régimes de vent, des conditions de houle ou de marée.

Puisque les conditions environnementales, la **bathymétrie*** et la géomorphologie diffèrent entre les atolls, des données de terrain spécifiques à chaque atoll sont nécessaires pour adapter et valider le modèle. Il est ainsi nécessaire de collecter des mesures en continu de nuit ou de jour à haute fréquence et sur une longue durée afin de mieux contraindre le modèle et améliorer la compréhension du fonctionnement de l'atoll.

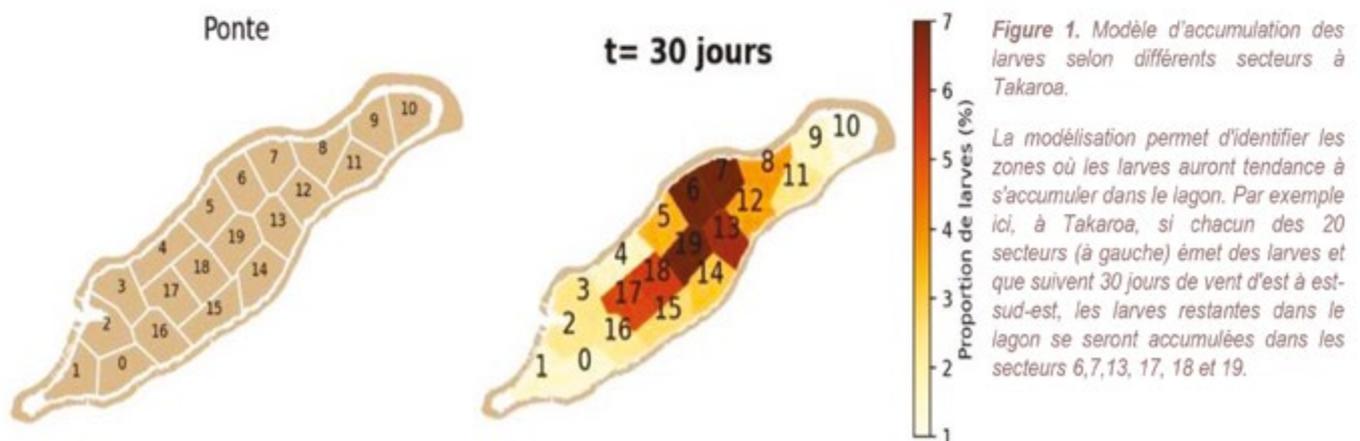
Caractéristique générale du modèle utilisé pour la perliculture

Le modèle utilisé ici est l'outil MARS3D (*Model for Applications at Regional Scale – 3 Dimensions*) développé par l'Ifremer et dédié à la modélisation **océanographique*** côtière. La résolution spatiale du modèle que l'on utilise pour les atolls pericolas est typiquement de 75 m, c'est-à-dire qu'il peut fournir par exemple la vitesse et direction des courants tous les 75 m dans le lagon. Sur l'axe vertical, les courants sont modélisés sur 50 niveaux bathymétriques différents (appelés couches sigma) répartis entre le fond et la surface.

Les différents paramètres à intégrer dans le modèle sont présentés page suivante.

Les applications du modèle pour la perliculture

Durant leur phase de dispersion, les larves de nacres sont passives et sont ainsi soumises aux courants. La modélisation des courants dans les lagons permet donc d'étudier et de prédire la dispersion des larves d'huîtres à partir de l'évènement supposé de ponte jusqu'au moment où elles sont prêtes à se fixer sur un substrat (figure 1). Suivant le lieu de ponte, on peut ainsi prédire les zones où se retrouveront les larves et donc les zones les plus propices au collectage. La connaissance des zones d'accumulation en fin de dispersion larvaire permet théoriquement de déterminer les emplacements à favoriser pour la pose des collecteurs afin d'optimiser la collecte des naissains. Par ailleurs, avec les modèles, il est aussi possible d'essayer de comprendre les processus et paramètres qui ont pu influencer sur la collecte des naissains pour une période particulière, abondante en naissains par exemple ou au contraire peu productive en naissains. Enfin, ce type d'analyse permet aussi de choisir des zones préférentielles de restockage.





Modules intégrés dans les modèles hydrodynamiques

Chaque module présenté ci-dessous est nécessaire au modèle hydrodynamique d'un lagon d'atoll. Chaque module a fait l'objet de recherches scientifiques afin d'être intégré dans le modèle MARS3D et de permettre les simulations de la circulation hydrodynamique sur les 4 sites étudiés pour le moment (Ahe, Takaroa et Raroia aux Tuamotu ; et les Gambier). Chaque module décrit aussi les facteurs de forçage du modèle hydrodynamique, forçage qui est souvent spécifique à chaque atoll (bathymétrie, géomorphologie, marée, climat et mesures de terrain). Pour plus de détails sur ces paramètres, se référer aux fiches dédiées.

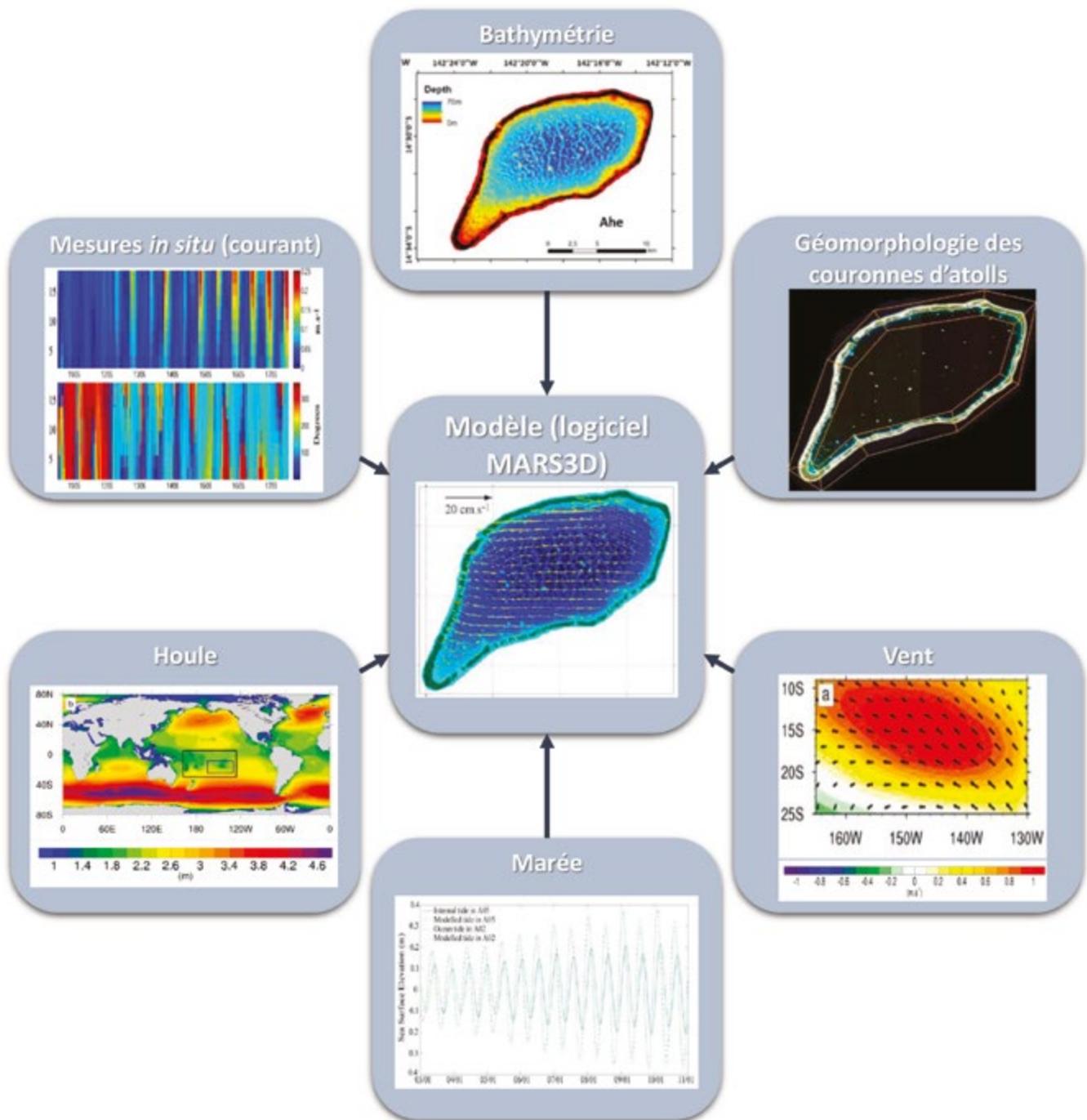


Figure 2. Schéma représentant l'architecture d'un modèle hydrodynamique, avec les modules regroupant les types de données nécessaires au modèle.

LES COURANTS ET LEURS VARIATIONS



Les structures de courants cartographiées par la modélisation hydrodynamique

Les modèles* hydrodynamiques* permettent de reproduire les courants dans le lagon en fonction des conditions de marée, de vent et de houle. Les conditions sont toujours changeantes, mais on peut les représenter par des lignes moyennes qui résument les directions et les vitesses des courants à une profondeur donnée. Les résultats sont présentés sous forme de cartes.

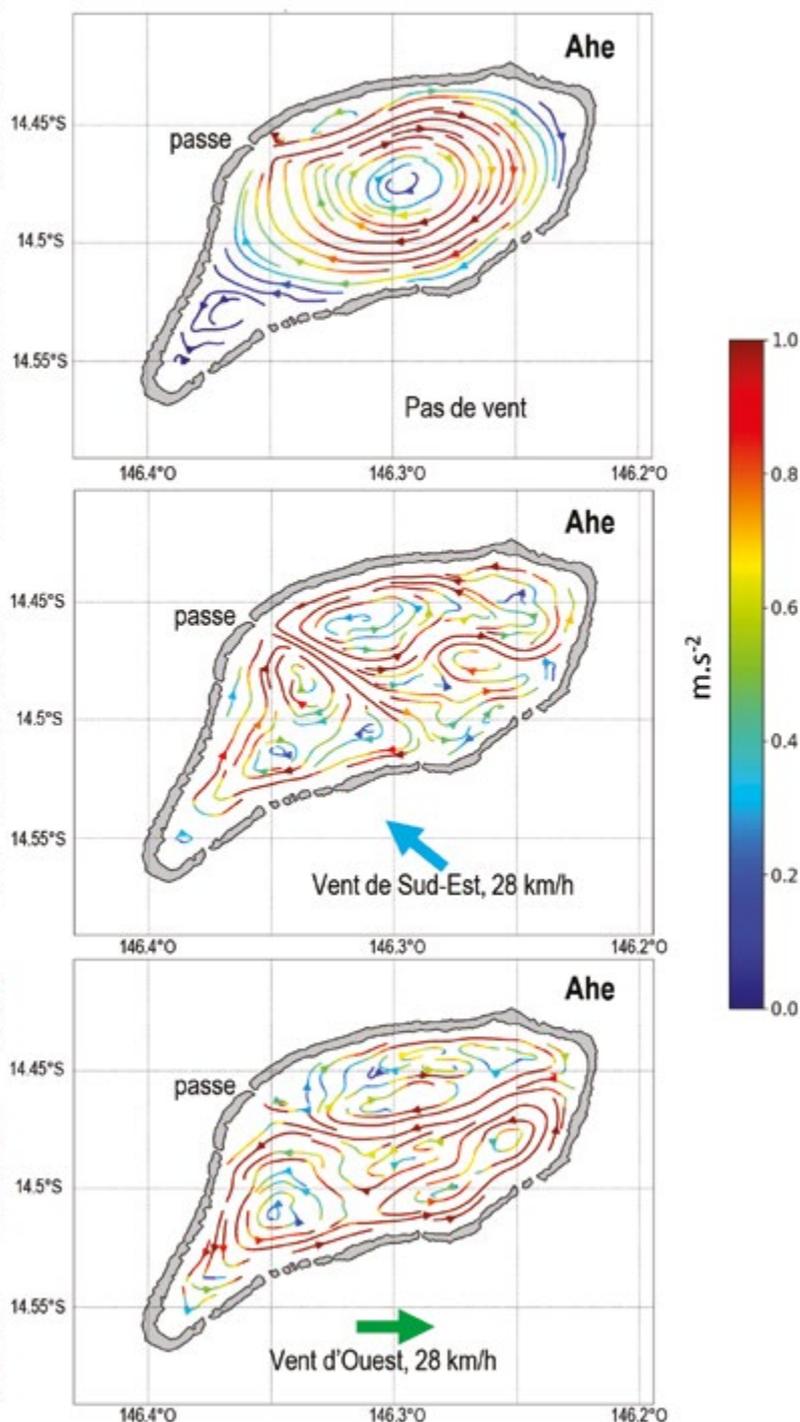
Sur les figures 1, 2 et 3 à gauche, les unités correspondent à des accélérations de courant, et sont corrigés des effets de la marée. On voit donc les lignes de courant mais sans les effets oscillants de la marée à court terme. Ici, les courants représentés sont la moyenne sur l'ensemble des profondeurs. Certains effets de fond, ou de surface, ou de mi-profondeur ne sont donc pas forcément visibles ici, mais cette information est disponible par ailleurs et peut être consultée ou cartographiée.

Les modèles prennent en compte la marée, le vent et la houle pour simuler les courants, mais ils peuvent aussi les isoler ou les intégrer, ce qui permet de mieux comprendre leurs effets individuels sur la circulation des eaux dans le lagon. On comprend mieux avec les modèles la complexité des structures de courants, leur variabilité et leur cause. Cette complexité est alors à relier aux variations des résultats de collectage au cours du temps ou à d'autres processus intéressant la perliculture.

Figure 1. Structures de courants de l'atoll de Ahe. Dans le premier cas où seule la marée influence le lagon via la passe et les hoa, les courants à long terme s'organisent en un grand tourbillon, qui isole la partie Sud-Ouest du lagon.

Dès que le vent souffle, par exemple de secteur Sud-Est (flèche bleue), comme au centre, les structures changent rapidement et 2 grandes cellules apparaissent, séparées par l'effet de la passe. Des contre-courants et plus petites cellules de circulation – expliquées aussi par les variations de bathymétrie* – sont aussi présents dans le Sud-Est.

Par vent d'Ouest (flèche verte), comme dans la figure du bas, les structures ont évolué et se sont déformées, avec des variations de vitesse par rapport à la situation en condition de vent de Sud-Est et les vitesses des courants sont plus importantes sur les bords Sud et Ouest du lagon.



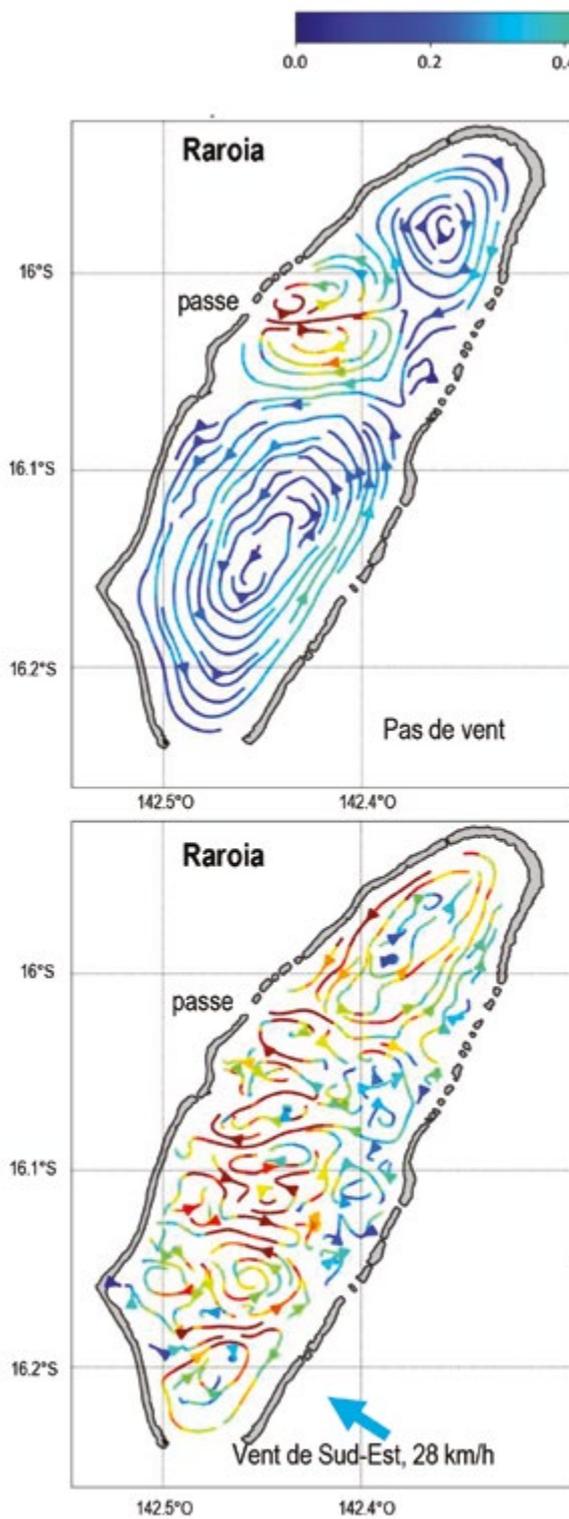


Figure 2. Structures de courants de l'atoll de Raroia, en l'absence de vent (en haut), avec 3 grandes cellules, et par vent de Sud-Est (en bas). Dès que le vent souffle, la complexité des structures augmente rapidement dans ce lagon, aussi en raison de sa bathymétrie, caractérisée par plus de 1600 pinacles*.

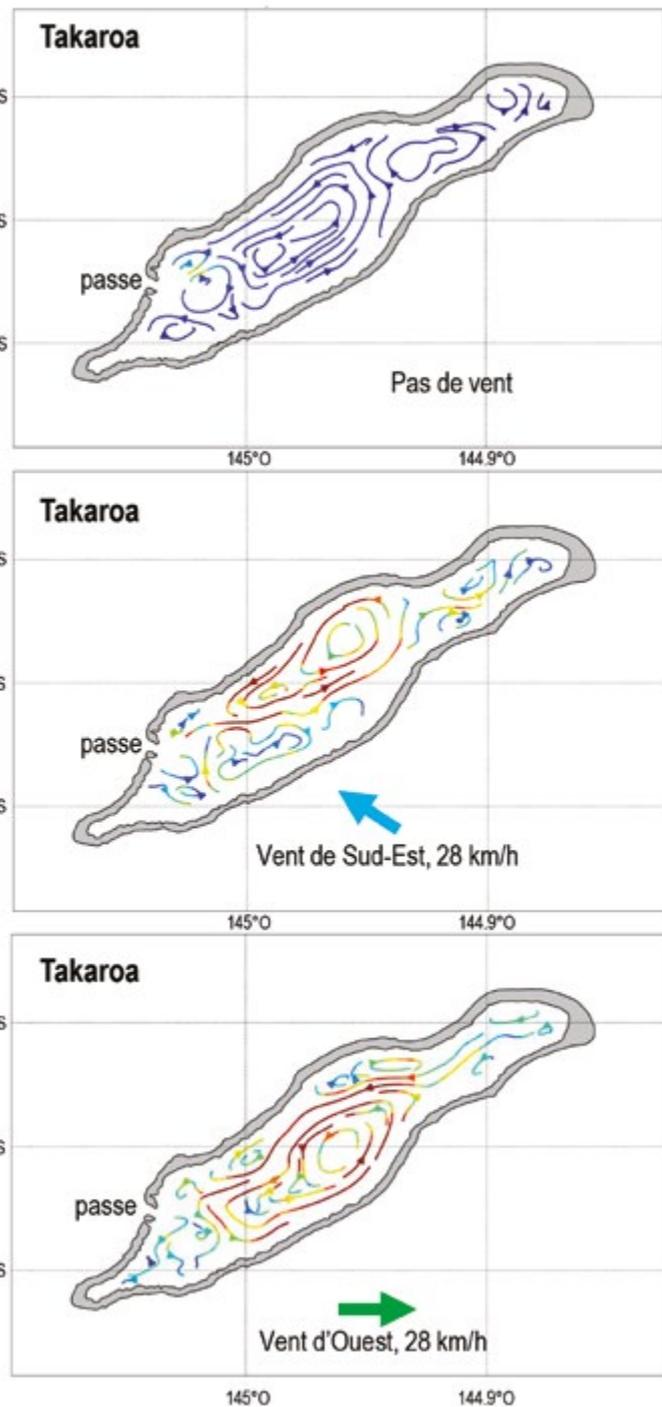


Figure 3. Structures de courants de l'atoll de Takaroa. En l'absence de vent (en haut), 1 grande cellule centrale et plusieurs périphériques dont une au Sud de la passe se forment. Par vent de Sud-Est (au centre), les courants sont plus dynamiques et 2 grandes cellules se forment. Par vent d'Ouest (en bas), 1 grande cellule centrale est à nouveau apparente mais les courants sont plus dynamiques. Une petite cellule est présente dans le Nord.

→ POINTS CLÉS DE LA PARTIE HYDRODYNAMIQUE



Géomorphologie des couronnes d'atolls

La géomorphologie est l'étude et la caractérisation des structures récifales d'un atoll. Elle permet de définir l'ouverture des couronnes d'atolls. Il existe 9 grands types de couronnes d'atolls constitués de *motu*, *hoa* et récifs barrières.

Les 9 types de couronnes d'atolls ne sont pas tous observés sur un même atoll, et un type de couronne peut être présent sur plusieurs atolls différents. Un atoll peut aussi être composé d'un unique type de couronne.

La géomorphologie d'un atoll est principalement caractérisée grâce à des **images satellitaires***.

La géomorphologie des couronnes d'atolls et leur ouverture peuvent indirectement impacter la quantité de nourriture disponible dans les lagons, ce qui impacte la capacité d'un lagon à accueillir un grand nombre d'huîtres perlières, le succès du collectage, mais aussi les mortalités observées dans certaines zones du lagon.

La température

La température influe sur la qualité des perles produites et sur les processus **physiologiques*** des huîtres perlières tels que la maturation sexuelle, la ponte, la croissance et la mortalité.

La température du lagon varie selon la saison, l'intensité du vent et de la houle, la marée, l'ensoleillement et les épisodes de pluie, et la géomorphologie de l'atoll. Elle varie selon les zones du lagon mais aussi en profondeur dans les grands lagons profonds suivant les courants.

Les mesures sont réalisées grâce à des capteurs de température posés dans le lagon ou par des satellites qui fournissent la température de l'eau en surface. La possibilité d'utiliser des satellites pour suivre en temps quasi-réel la température dans les lagons dépend des atolls.

Les régimes de vents

Le vent est le principal facteur intervenant dans la circulation des eaux dans le lagon, tout particulièrement pour les atolls peu ouverts comme le sont la plupart des atolls perlicoles.

La circulation des eaux lagonaires dépend de l'intensité et de la direction du vent. Plus le vent est fort, plus le mélange des eaux est assuré engendrant la circulation des eaux. A l'inverse, un vent faible entraîne la stagnation des eaux ce qui a pour effet d'impacter la chaîne de nourriture dans le lagon ainsi que d'entraîner des différences de température entre la surface et le fond. Le vent peut ainsi affecter directement ou indirectement les organismes marins (larves, juvéniles ou adultes), leur biologie, la dispersion des larves et la disponibilité en nourriture.

Le vent est mesuré à l'aide de stations météorologiques ou encore par le biais de **modèles*** météorologiques.

A l'échelle journalière, 4 régimes de vents principaux ont été identifiés dans le Pacifique central. Leur fréquence varie selon le mois de l'année mais aussi selon les îles. A l'échelle d'un mois, 9 régimes de vents ont été identifiés. Ces derniers varient par île en intensité et en direction.

Le phénomène El Niño impacte la fréquence et l'intensité des régimes de vents journaliers dans la région Pacifique. Le changement climatique altèrera aussi, mais dans une faible mesure, les régimes de vents dans les Tuamotu Gambier.

Les régimes de vagues

La connaissance des régimes de vagues et de la géomorphologie des couronnes d'atolls permet d'étudier les **flux*** d'eau entre l'océan et le lagon, flux qui permettent le renouvellement des eaux du lagon, notamment pour les atolls sans passe.

Les principales causes de la variation du niveau de l'eau dans un lagon d'atoll sont la marée et les vagues. Leurs influences respectives dépendent du degré d'ouverture de l'atoll, de la position des ouvertures et du régime de houle que subit l'atoll.

Les flux d'eau affectent la qualité mais également la température de l'eau du lagon.

Les régimes de vagues dans l'océan sont étudiés grâce à des capteurs de pression ou avec des modèles informatiques.

A l'échelle du Pacifique Central, 3 grands régimes de vagues ont été identifiés. Ces derniers ont toutefois une influence variable selon le mois et suivant l'île ou l'atoll. Le régime de vague varie aussi grandement tout autour des îles ou atolls suivant leur degré de protection (présence d'autres îles ou atolls autour).



La bathymétrie

La **bathymétrie*** est l'étude de la profondeur et des reliefs du fond marin. Elle est utile à la navigation, à l'exploitation des fonds marins et à la caractérisation du milieu.

L'intensité lumineuse, la température, la disponibilité en nourriture et l'agitation du lagon varient selon la profondeur. Ces paramètres influent sur les différents stades de l'huître perlière et peuvent être reliés aux **densités*** du stock d'huîtres et des larves par exemple.

La bathymétrie est nécessaire pour étudier et modéliser les processus **hydrodynamiques*** d'un lagon.

La bathymétrie est mesurée à l'aide de **sondeurs acoustiques*** ou avec des images satellites en zones peu profondes.

La cartographie de la bathymétrie des atolls de Raroia, Ahe, Takaroa, Takapoto, Takume et Mopelia a été réalisée. Les profondeurs maximales varient entre 41 m (Mopelia) et 71 m (Ahe) avec des profondeurs moyennes comprises entre 20,4 m et 40,6 m.

Le nombre de *karēna* varie entre les atolls, la plus faible valeur étant Mopelia (11) et la plus élevée Raroia (1618).

L'oscillation australe El Niño (ENSO)

Le phénomène El Niño est la principale cause de variations climatiques interannuelles dans le Pacifique. Il correspond à l'apparition de 2 épisodes, El Niño et La Niña, qui se répètent tous les 3 à 7 ans et durent environ 8 mois à 2 ans.

Les variations de climat liées à ENSO impactent la dispersion des larves, la croissance et la reproduction des adultes ainsi que la disponibilité en nutriments et le type de **plancton*** présent dans les lagons. L'augmentation des températures, suite à un épisode El Niño, peut avoir des effets positifs sur ces paramètres mais au-delà d'un certain seuil, elle cause rapidement des mortalités massives.

Mesures importantes pour l'hydrodynamique des lagons

Les instruments de mesure (de température, de pression, des courants) sont placés dans des zones du lagon de manière à obtenir les mesures les plus complémentaires possibles pour la compréhension de l'ensemble des processus hydrodynamiques affectant un lagon. Des périodes de mesure de plusieurs mois sont nécessaires comme effectuées à Raroia, Mangareva et Takapoto depuis 2018.

Les instruments utilisés permettent de mesurer les échanges d'eau entre l'océan et le lagon grâce aux mesures des courants dans les *hoa*, les passes et le lagon qui évoluent en fonction de la marée, des houles incidentes et du vent.

Modéliser les courants

La **modélisation*** hydrodynamique est un outil informatique permettant de reproduire ou prédire les courants, de simuler la dispersion des larves et d'évaluer les zones où les larves auront tendance à s'accumuler en fonction de conditions climatiques précises.

Le modèle utilisé est l'outil MARS3D. Celui-ci intègre les données de bathymétrie, de courant, de houle, de vent, de marée et la géomorphologie des couronnes d'atolls. Des mesures de terrain sont nécessaires pour calibrer et valider les modèles.

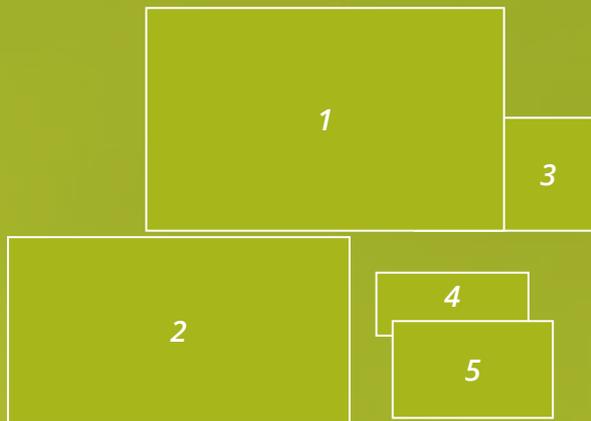
Des **simulations*** de la dispersion larvaire ont permis de caractériser les zones d'accumulation de larves en fonction des régimes de vents et de la position des géniteurs sauvages pour Ahe, Takaroa et Raroia.

Les courants et ses variations

Les modèles hydrodynamiques de Ahe, Takaroa et Raroia ont permis de calculer les structures types de courant que l'on peut retrouver en fonction de la marée, du vent et de la houle, ou de leurs régimes.

Les courants varient avec les vents, et pour un même vent, la complexité des structures de courant dépend de la taille, de la forme et de la bathymétrie de l'atoll, et de l'action de la passe. Ainsi, alors que Takaroa est assez stable pour des vents assez différents, Raroia montre une grande complexité. Ahe est l'atoll dont la passe est la plus structurante.

Le vent accélère la vitesse des courants. Les périodes sans vent ni houle, mais avec influence de la marée, montrent des lagons structurés par des grandes cellules tournant à très faible vitesse.



Photos 1 et 2 - Inventaire des stocks d'huîtres sauvages et mesures des tailles à Raroia et Takapoto.

*Photo 3 - Juvénile de *Pinctada margaritifera* sur collecteur à Takaraoa.*

Photo 4 - Ferme perlière aux Gambier.

Photo 5 - Communauté peu profonde d'huîtres perlières et de bénitiers à Takapoto.





BIOLOGIE DES HUÎTRES PERLIÈRES



BIOLOGIE DES HUÎTRES PERLIÈRES

→ STOCKS D'HUÎTRES SAUVAGES



Pourquoi s'intéresser aux stocks d'huîtres sauvages ?

Le stock d'huîtres perlières au sein d'un lagon pericole est composé de deux types de population, les huîtres sauvages et celles en élevage. La population en élevage est 10 à 20 fois plus importante dans les fermes pericoles qu'en milieu sauvage. Ces 2 populations contribuent probablement aux larves captées sur les collecteurs des fermes mais certainement de façon différente. En effet, les huîtres sont d'abord de sexe mâle en-dessous d'un certain âge (2 ans ou 8 cm) puis elles deviennent femelles au-delà de ce seuil. Dans les fermes, les individus sont plus petits, ainsi la proportion de mâle est plus importante tandis que dans la population sauvage c'est souvent l'inverse. La population d'huîtres sauvages est donc très importante pour la reproduction du fait de la présence plus importante de nacres femelles. Rappelons que le prélèvement d'huîtres sauvages sur un support naturel est interdit par l'Art. LP. 106 de la loi du pays 2017-16 du 18 juillet 2017.

Lorsque l'on fait une évaluation des stocks, les éléments qui sont mesurés sont le nombre d'huîtres et la taille des individus. Ces mesures permettent de calculer les **densités*** sur un type d'habitat (fond sableux, rocheux, coraux) ou par tranche de profondeur, et de réaliser une estimation du nombre d'huîtres perlières dans un lagon si l'on connaît la surface des habitats et la profondeur des lagons. Il est aussi théoriquement possible de convertir les mesures de la coquille des individus en âge, mais la taille des huîtres est parfois liée à leur âge de manière différente suivant les lagons ou au sein d'un lagon. L'âge permet d'estimer le sexe des individus.

L'étude des stocks informe donc sur la capacité de reproduction des huîtres du lagon et peut aboutir à des recommandations pour améliorer les stocks telles que la réintroduction d'huîtres dans le milieu par les periculteurs.

Protocole d'estimation des stocks d'huîtres sauvages

Le protocole d'estimation des stocks demande plusieurs étapes. Dans un premier temps, des plongées exploratoires (environ 3) sont réalisées afin d'avoir une prévisualisation de la densité des stocks et de leur profondeur. Ceci permet de décider de la stratégie finale de comptage en plongée. Par exemple sur Raroia, 4 plongeurs réalisaient des comptages à différentes profondeurs (30, 20, 10 et 5 m) pendant 5 minutes à vitesse lente et constante, le long d'une trajectoire prise au hasard dans les fonds de lagon ou le long des flancs des *karena*. La taille des individus de *P. margaritifera* est également mesurée à une précision d'un centimètre environ. Les habitats situés dans moins d'un mètre de profondeur sont étudiés en palmes, masque et tuba.

Une fois les données de comptage acquises (typiquement entre 40 et 70 sites par atoll), la densité des huîtres perlières est calculée en fonction des types d'habitats ou des tranches de profondeur puis une **extrapolation*** à tout le lagon est réalisée afin de calculer le stock total, en utilisant par exemple la carte **bathymétrique***.

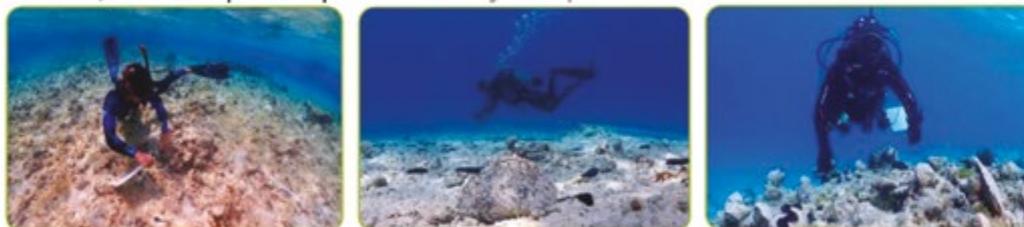


Figure 1. Photos réalisées lors d'une mission de comptage des huîtres sauvages dans le lagon de Takapoto.

Historique des stocks d'huîtres perlières dans certains atolls étudiés

Avant les années 60, la pêche de nacres à Ahe a été estimée à un maximum d'environ 100 tonnes, quoique souvent inférieure à 50 tonnes par an. En 1960, le stock était en déclin mais suite à l'arrêt de la pêche, celui-ci se rétablit sans doute puisque le collectage à Ahe a été très productif à partir des années 80. Pour Ahe, la première évaluation des stocks sauvages dans le cadre de la periculture a été réalisée récemment en 2013.

A Takapoto, plusieurs études d'évaluation des stocks d'huîtres perlières ont été réalisées entre 1982 et 1995, puis en 2021. En 1982, le stock a été estimé à 5,5 millions d'individus. En 1985-1986, le stock subit une mortalité massive mais aucune étude n'a été réalisée suite à cet événement. En 1990, le stock a été évalué à $10,1 \pm 1,7$ millions d'individus puis à $4,3 \pm 0,67$ millions d'individus en 1995. Au cours de ces études, les plus fortes densités enregistrées étaient entre 30 et 40 mètres de profondeur. Les résultats de 2021 sont en cours d'analyse mais ils montrent déjà un changement important dans les densités par gamme de profondeur, les plus fortes densités étant comme à Ahe ou Raroia dans les fonds de 0-10 mètres.



Résultats récents sur Ahe, Mangareva, Raroia et Takapoto

D'après les estimations de stocks sauvages réalisées à Ahe en 2013 (figure 4), à Raroia en 2018 (figure 2), à Mangareva en 2019-2020 (figure 4) et à Takapoto en 2021 (figure 2), on trouve les densités moyennes de nacres les plus faibles à Raroia et les plus élevées à Takapoto. A Takapoto, Raroia et Ahe, les densités de nacres sont plus importantes dans la partie Sud-Ouest du lagon. Aux Gambier, les individus se concentrent principalement au centre du lagon. A Ahe, les mesures ont permis de rendre compte d'une forte hétérogénéité géographique de la densité et de la taille des nacres. Deux secteurs se différencient :

- La partie Nord-Est : zone profonde où les densités sont faibles mais avec des huîtres plus âgées et plus grandes. La taille moyenne est de 17 cm.
- La partie Sud-Ouest : zone peu profonde où les densités atteignent des valeurs élevées (8,42 pour 100 m² en moyenne) mais les individus sont plus petits (12-13 cm).

A titre d'exemple, pour Ahe, l'analyse des données de cet atoll permet de mettre en évidence une proportion plus importante de femelles dans la partie principale du lagon (36%) que dans le secteur Sud-Ouest (19%). Les populations sauvages du Sud-Ouest sont de plus petite taille et donc majoritairement mâles à l'inverse du Nord où elles sont plus grandes (figure 3). Au total, le stock de Ahe est composé d'environ 30% de femelles et 70% de mâles. Le déséquilibre du sex-ratio entre populations ou au sein d'une population ne favorise pas la fécondation et la reproduction de l'espèce.

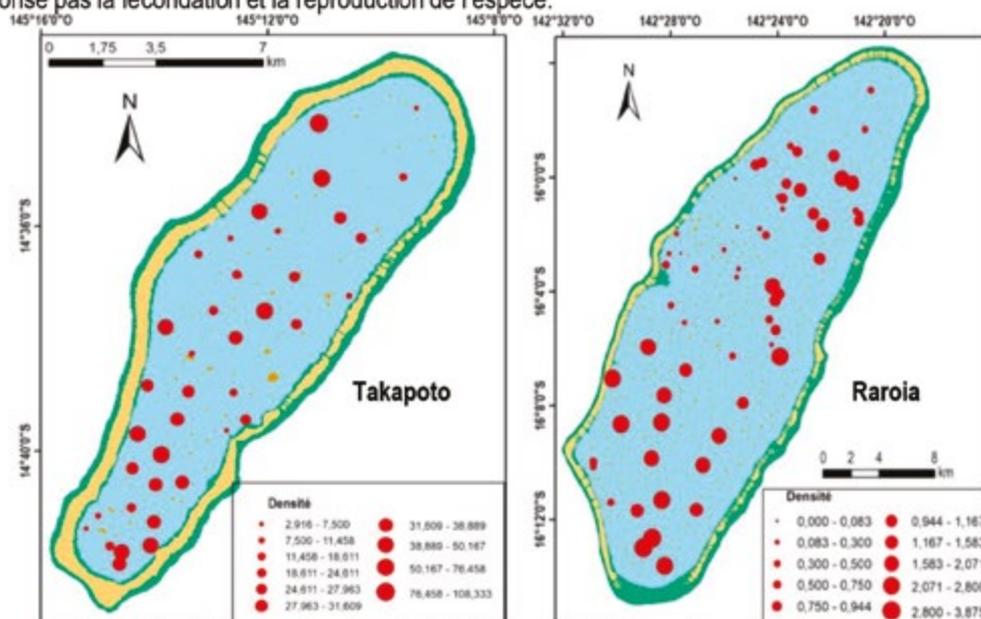


Figure 2. Variation spatiale des densités d'huîtres perlières (nombre d'individus sur 100 m²) mesurées entre 0 et 10 m de profondeur aux stations étudiées à Raroia et Takapoto. Les couleurs représentent les unités géomorphologiques* principales de l'atoll ou de l'île. Les échelles de densité diffèrent selon les sites.

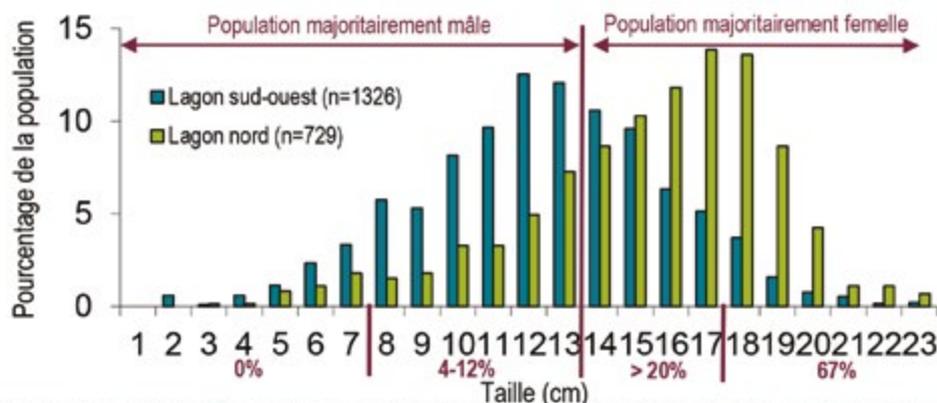


Figure 3. Structure de taille de la population d'huîtres sauvages de Ahe dans les secteurs Nord (vert) et Sud-Ouest (bleu) du lagon. Sous le graphique, en texte violet, est indiqué le pourcentage de femelles dans la population selon les classes de taille. Par exemple, à partir de 13-14 cm, la proportion de femelles dépasse les 20%.

BIOLOGIE DES HUÎTRES PERLIÈRES

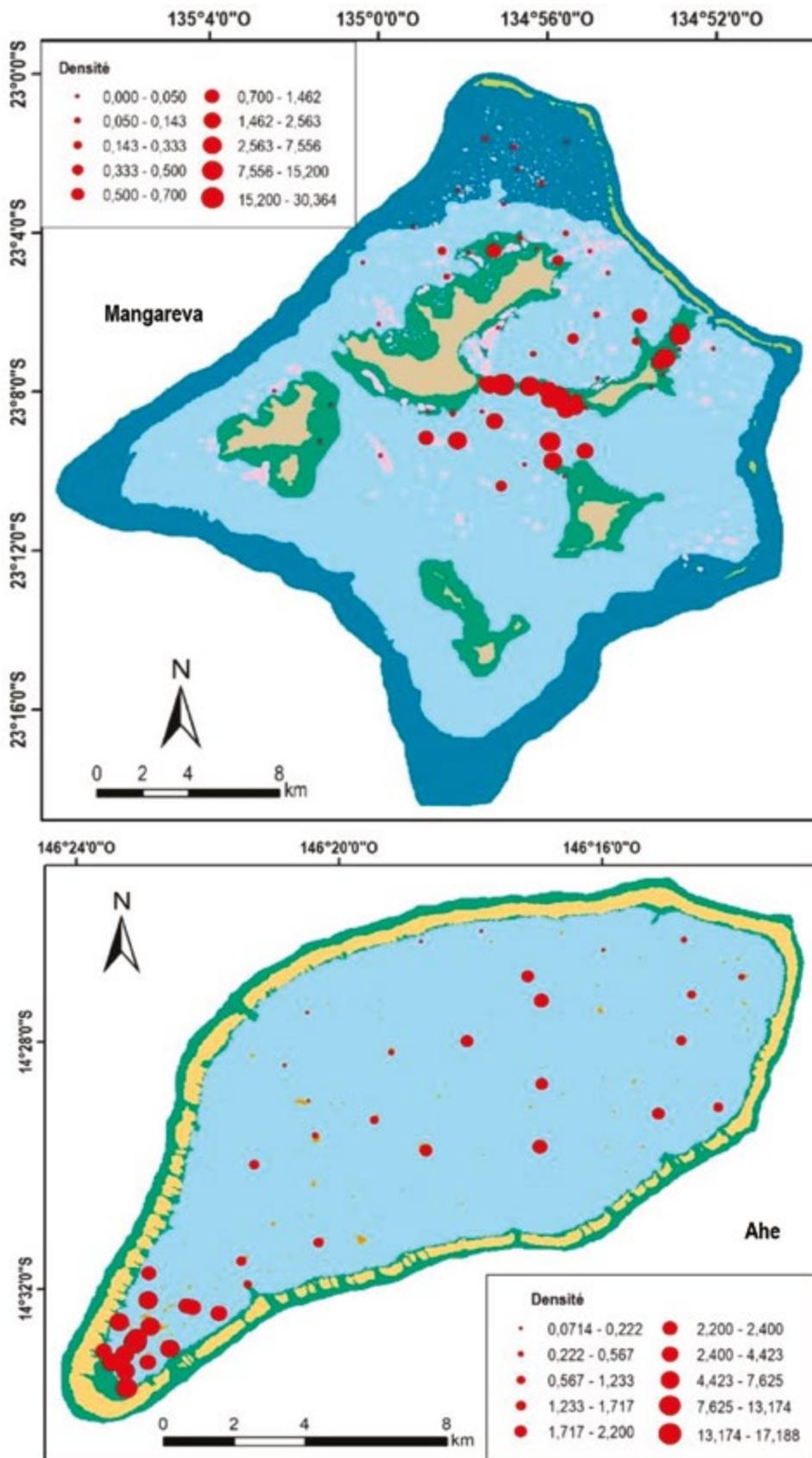
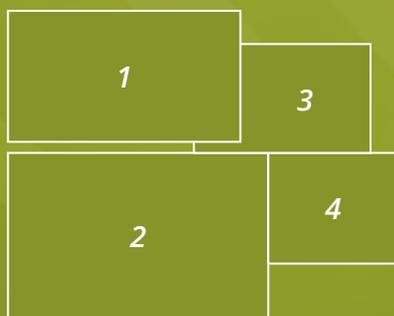


Figure 4. Variation spatiale des densités d'huîtres perlières (nombre d'individus sur 100 m²) mesurées entre 0 et 10 m de profondeur aux stations étudiées à Mangareva (en haut) et Ahe (en bas). Les couleurs représentent les unités géomorphologiques principales de l'atoll ou de l'île. Les échelles de densité diffèrent selon les sites.

Pour Ahe, le lagon Sud-Ouest évoqué en figure 3 correspond aussi à la zone où il y a une plus forte densité du stock.



Huîtres perlières dans leurs habitats naturels de fond de lagon et de karena à :

Photo 1 - Raroia.

Photo 2 - Gambier.

Photo 3 - Ahe.

Photo 4 - Takapoto.

BIOLOGIE DES HUÎTRES PERLIÈRES

➔ NOURRITURE DES HUÎTRES PERLIÈRES : LE PLANCTON



Généralités sur le plancton

Lors des études réalisées dans le cadre du projet MANA, peu de recherches se sont consacrées spécifiquement au **réseau trophique** dans les lagons et à l'alimentation des huîtres perlières, dont le **plancton*** est un élément essentiel. Ainsi, les informations de cette fiche sont issues principalement de projets antérieurs, dont les fiches du projet « Professionnalisation et pérennisation de la perliculture », financé par le Fonds Européen de Développement (FED), qui s'est déroulé de 2007 à 2010 principalement sur l'atoll de Ahe (Te Reko Pārau numéro 10 de 2011). Les informations présentées sont simplifiées et nécessaires pour étudier la croissance des huîtres et la modéliser dans le cadre du projet MANA. Ici, nous présentons les principaux organismes qui composent le régime alimentaire des huîtres perlières ou qui l'influencent, et des éléments de la chaîne alimentaire (c'est-à-dire : qui mange qui?).

Le plancton est l'ensemble des petits organismes vivants dans la colonne d'eau aussi bien dans les eaux douces, saumâtres et salées. Il se divise en 2 catégories principales, le **phytoplancton*** et le **zooplancton***. Ces 2 groupes d'organismes sont classés selon leur taille (tableau 1). Le phytoplancton correspond au plancton végétal, il est autotrophe, ce qui veut dire qu'il est capable de réaliser la photosynthèse (production d'oxygène à partir de la lumière). Le zooplancton est le plancton animal, il est hétérotrophe et se nourrit donc de matières vivantes, végétales ou animales. Un autre compartiment planctonique important est le bactérioplancton (< 2 µm). Celui-ci consomme la matière organique libérée par le plancton (déchets, organismes morts, etc.), ce qui permet un recyclage constant et la réutilisation de cette matière organique dans la chaîne alimentaire des lagons.

Tableau 1. Classification du plancton selon leur taille. Un micromètre (µm) correspond à 0,001 mm. Toutes les classes de tailles ne sont pas présentées ici.

Taille	0,2 – 2 µm	2 – 20 µm	20 – 200 µm	> 0,2 mm
Phytoplancton	Picophytoplancton	Nanophytoplancton	Microphytoplancton	
Zooplancton		Nanozooplancton	Microzooplancton	Mésozooplancton

Le phytoplancton, nourriture principale des huîtres (mais pas uniquement)

Le phytoplancton est la source principale de nourriture des huîtres. Parmi les classes de taille qui composent ce groupe, ce sont majoritairement le nano et le microphytoplancton, c'est-à-dire les organismes dont la taille est comprise entre 2 et 200 µm (soit 0,002 et 0,2 mm), qui sont ingérés par les huîtres perlières. Toutefois, le picoplancton < 2 µm (incluant donc le bactérioplancton et le picophytoplancton) est typiquement celui qui est dominant dans les lagons d'atolls et celui-ci peut aussi être consommé directement par les huîtres (quoique bien moins efficacement) ou par l'intermédiaire du nanozooplancton et microzooplancton. La forte capacité de filtration de l'huître lui permet de compenser les faibles concentrations en nano et microphytoplancton.

Le régime alimentaire des huîtres perlières est donc principalement composé de nano et microphytoplancton. Elles ont toutefois un régime alimentaire varié qui inclut aussi certains groupes du zooplancton, notamment les nanoflagellés (nanozooplancton), mais aussi les 'ciliés' (microzooplancton), ou encore les 'nauplii' (mésozooplancton). La consommation par les huîtres de ce zooplancton est aussi un lien entre le picoplancton et les huîtres perlières. C'est pourquoi l'ensemble de ces compartiments (phyto, zoo et bactérioplancton) est généralement étudié pour caractériser les sources de nourriture des huîtres.

Dans le lagon de Ahe, 31 espèces de nano et microphytoplancton ont été trouvées. Elles se répartissent dans plusieurs groupes : i) les chlorophycées : algues vertes ; ii) les coccolitophores : microalgues qui possèdent une couche de plaques de calcite ; iii) les dinofycées (ou dinoflagellés) : organismes possédant 2 flagelles pour se déplacer ; iv) les bacilliarophycées (ou diatomées) : organismes enveloppés dans une paroi siliceuse ; v) les euglénophycées ; et vi) les prasinophycées.

L'abondance du phytoplancton peut être estimée par les concentrations de chlorophylle a dont les valeurs varient entre 0,05 et 0,3 µg Chl a.l⁻¹ dans les lagons perlicoles. Les concentrations des différents groupes varient fortement en fonction de la saison, de l'endroit du lagon et des conditions environnementales associées. Ainsi, on a observé des variations temporelles et spatiales importantes des concentrations en phytoplancton dans le lagon de Ahe avec un doublement des proportions de ces organismes. Ces variations sont principalement dues à l'effet du vent (direction et intensité). En effet, ce dernier est le moteur principal de la circulation **hydrodynamique***. Par exemple, lorsque le vent de secteur Est à Sud-Est souffle sur Ahe, les eaux plus fraîches du fond du lagon remontent entraînant avec elles des nutriments et minéraux favorisant la croissance du phytoplancton.



Autres informations sur la chaîne trophique dans les lagons

Le zooplancton est intéressant à étudier car une grande partie entre en compétition avec les huîtres pour la nourriture et peut aussi consommer les larves d'huîtres. Le zooplancton englobe plusieurs classes de taille, du nanozooplancton (2-20 μm) au mésozooplancton (> 0,2 mm). C'est un groupe très diversifié, on y retrouve des organismes pluricellulaires comme des larves de mollusques et d'autres groupes d'organismes.

Les organismes faisant partie du mésozooplancton peuvent être filtreurs (souvent) ou prédateurs. Dans le premier cas, ils filtrent les petites particules qui entrent également dans le régime alimentaire des larves, des juvéniles et des adultes d'huîtres perlières. C'est cela qui en fait un compétiteur des huîtres pour la nourriture. Dans le second cas, les organismes consomment des larves de poissons ou de mollusques, dont les huîtres (figure 1). De ce fait, ils peuvent contrôler et faire varier l'abondance des larves d'huîtres perlières, et influencer probablement indirectement sur le collectage.

Les expériences à Ahe ont montré une forte proportion de nanoflagellés (nanozooplancton) qui contribuent à l'alimentation des huîtres. Cependant, les diatomées et dinoflagellés sont aussi présents et si les conditions environnementales deviennent idéales alors il peut y avoir un développement rapide de ces populations jusqu'à atteindre des concentrations similaires à celles des nanoflagellés. Dans ce cas, les dinoflagellés et diatomées constituent un apport alimentaire non négligeable pour les huîtres. D'autres organismes nano et microplanctoniques peuvent également se développer en fonction des conditions et faire partie de l'alimentation de *P. margaritifera*, ou au contraire prendre la place des organismes dont se nourrissent les huîtres, ce qui peut impacter leur physiologie* et entraîner des mortalités.

La figure 1 synthétise la relation alimentaire entre les différents compartiments présentés ci-dessus.

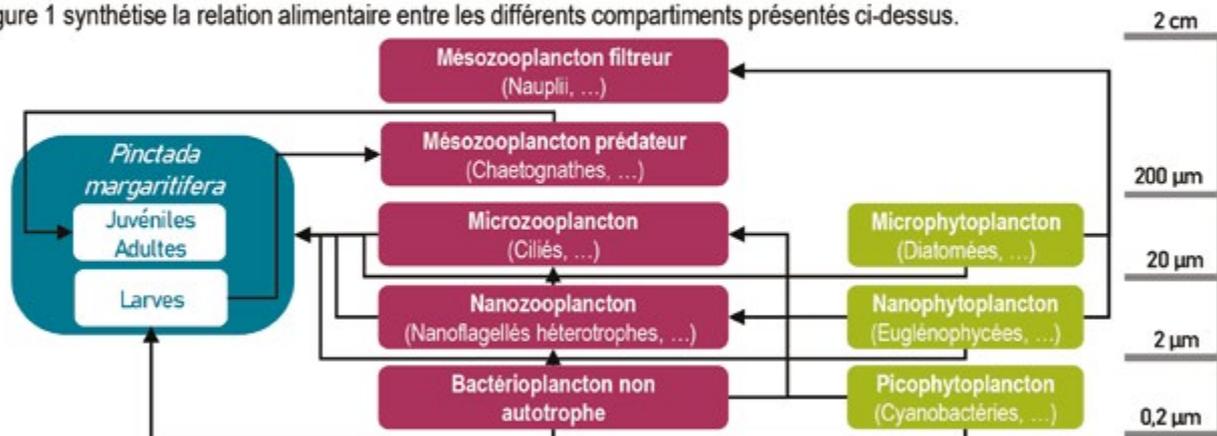


Figure 1. Schéma des relations trophiques entre les différents compartiments planctoniques et les huîtres perlières. Les flèches indiquent les relations proies-prédateurs (par exemple les larves d'huîtres sont consommées par le mésozooplancton prédateur). Les classes de taille des différents compartiments sont indiquées à droite.

Les mesures

Pour mesurer la concentration en phytoplancton, la technique la plus utilisée est la mesure de la chlorophylle dans les échantillons d'eau de lagon. La chlorophylle est le pigment principal qui permet au phytoplancton de réaliser la photosynthèse. Ainsi, la mesure de la chlorophylle (exprimée en microgrammes par litre) est souvent utilisée pour estimer la concentration de phytoplancton. Cette méthode est fiable, rapide et peu coûteuse. Il est aussi possible de séparer la composante inférieure ou supérieure à 2 μm (0,002 mm), ce qui permet d'estimer la part consommable par les huîtres pour chacune des fractions.

Le taux de renouvellement du phytoplancton est mesuré grâce à des mesures dites de « production » qui permettent également d'estimer le besoin en nutriments (carbone, azote, phosphate, etc.) du phytoplancton.

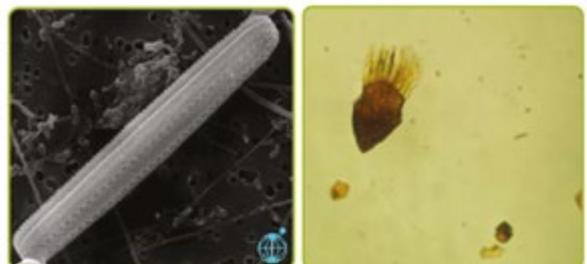


Figure 2. Images montrant des organismes du phytoplancton (*Thalassionema nitzschioides*, à gauche) et un cilié (*Strombidium* spp., à droite). Ces groupes de plancton, avec les nanoflagellés et les dinoflagellés, constituent le régime alimentaire principal des huîtres.

BIOLOGIE DES HUÎTRES PERLIÈRES

➔ CROISSANCE ET PONTE DES HUÎTRES PERLIÈRES



Reproduction

L'huître perlière *P. margaritifera* est un hermaphrodite protandre c'est-à-dire qu'elle est au début de sa vie mâle, avant de développer des gonades femelles vers environ 2 ans puis les huîtres changent de sexe. Toutefois, l'apparition d'un stress environnemental (température, nourriture, etc.) ou humain (pollution, manipulation) peut entraîner un passage de l'état femelle à mâle. La maturité sexuelle est atteinte entre la première et la deuxième année de développement lorsque les huîtres ont atteint une taille d'environ 4 cm. Néanmoins, le développement des organes sexuels (les gonades) est nettement plus important lors de la seconde année. Après une ponte, la formation des **gamètes*** est rapide et dure 1 mois si les conditions sont bonnes, puis les individus les libèrent dans le milieu. La quantité de gamètes émise à chaque événement de ponte est comprise entre 40 et 50 millions d'ovules (femelles) et 400 à 5 000 millions de spermatozoïdes (mâles).



Figure 1. Photos de nacres juvéniles sur le sommet d'un karena (à gauche) et de nacres adultes situées en profondeur (à droite).

Cycle de vie de *Pinctada margaritifera*

Comme la plupart des invertébrés **benthiques*** marins, l'huître perlière présente 2 phases de développement, une qui est dans l'eau (**pélagique***) et l'autre qui est fixée sur le fond (**benthique**).

Après libération des gamètes, la fécondation se fait dans le milieu environnant. Les œufs se segmentent ensuite afin de donner des larves trochophores. Au bout de 24 heures, celles-ci développent une « pré-coquille » (ou prodissoconche) et atteignent le stade larve-D.

Les larves se métamorphosent ensuite en larves véligères par l'apparition d'un organe appelé **vélum*** leur permettant de se nourrir par filtration et de se mouvoir dans la colonne d'eau. Le mouvement de nage des larves est uniquement vertical et leur déplacement horizontal se fait au gré des courants.

Après une dizaine de jours de développement, on obtient des larves umbonées qui mesurent environ 0,14 mm. Celles-ci développent un organe sensoriel appelé « œil » et un pied permettant de se déplacer sur le substrat, elles sont dites pédivéligères et ont atteint une taille de 0,23 mm.

En fin de vie pélagique, (après 20 à 30 jours suivant les conditions), les larves se fixent à un substrat dur tel que des algues corallines, des débris ou sur les collecteurs à l'aide de filaments du byssus qu'elles sécrètent. C'est le stade dit « post-larve ». A ce stade, une nouvelle coquille (dissoconque) se

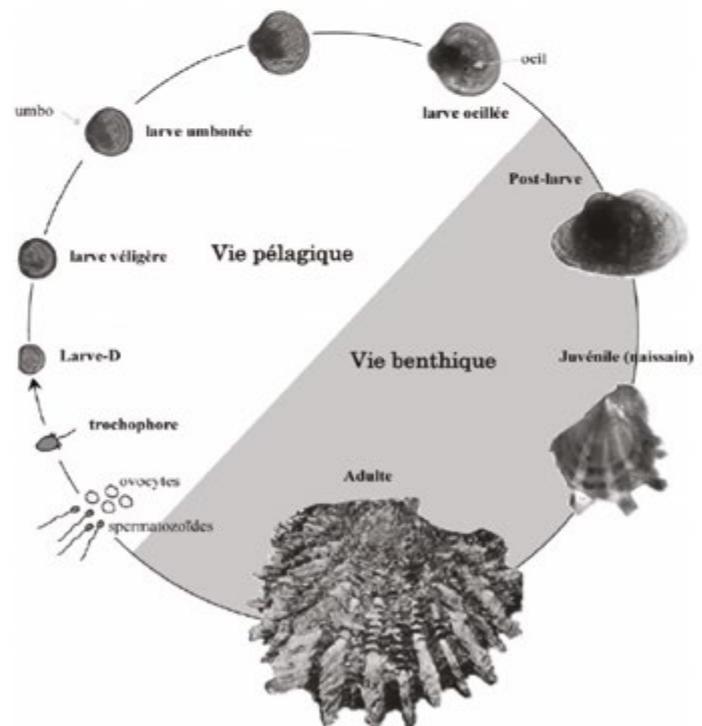


Figure 2. Cycle de vie de l'huître perlière *Pinctada margaritifera*.

forme et des branchies remplacent le vélum. On atteint le stade juvénile (naissain) où l'huître croît et se développe rapidement pour atteindre le stade adulte après 1 an avec des tailles comprises entre 4 et 5 cm.



Modèle bioénergétique (DEB)

Les modèles* de budget énergétique dynamique (DEB pour *Dynamic Energy Budget*) permettent d'étudier à l'échelle d'un individu l'effet de l'environnement sur son organisme. Ce type de modèle quantifie le plus simplement possible, tout en restant réaliste, les flux* d'énergie liés à la survie, à la croissance et à la reproduction en fonction des fluctuations environnementales (voir figure 3).

Ainsi pour l'huître perlière, ce modèle permet de déterminer le potentiel de reproduction d'un individu en fonction des paramètres environnementaux tels que la température et la quantité de nourriture. On peut par exemple déterminer la vitesse de croissance d'une nacre, le nombre de pontes qu'elle pourra faire et la durée de la phase pélagique des larves. Des données de terrain sont toutefois nécessaires, idéalement, pour valider ces calculs.

Pour représenter la quantité de nourriture, l'information utilisée est la concentration en chlorophylle a (qui approxime la quantité de phytoplancton* en tant que source de nourriture). Cependant, cet indicateur ne permet pas la distinction entre les différentes classes de taille de phytoplancton notamment celles qui sont consommées ou non par *P. margaritifera*.

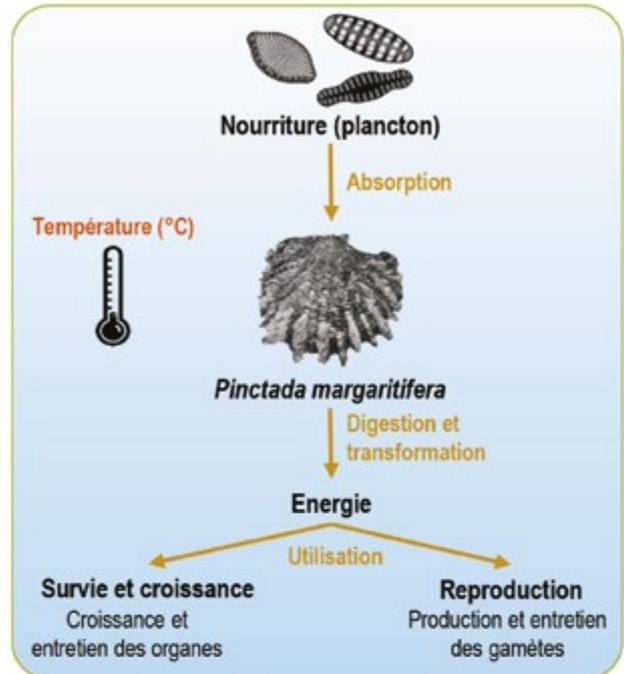


Figure 3. Principe du modèle DEB.

Effets de la température et de la nourriture sur le développement des huîtres

Le modèle DEB a permis de simuler les effets de la température et de la concentration en nourriture sur la physiologie* et le développement des huîtres perlières, avec les conditions rencontrées en Polynésie française (Tableau 1).

De manière générale, les performances physiologiques sont plus faibles lorsque la quantité de nourriture disponible est faible. Par exemple, pour des températures de 28°C, le nombre de pontes est divisé par 2 lorsque les concentrations en nourriture passent de 0,6 à 0,2 µg Chla.l⁻¹. Et inversement, les performances sont meilleures quand les conditions s'améliorent.

De même, lorsque les températures sont plus élevées, le développement des huîtres est également amélioré. Par exemple, pour une concentration en nourriture de 0,2 µg Chla.l⁻¹, la croissance des huîtres est accélérée quand la température augmente puisque le temps nécessaire pour avoir une taille commerciale est de 25 mois à 24°C contre 15 mois à 30°C. Mais au-delà d'une température de 33°C environ, les performances se dégradent très fortement : i) augmentant la durée de la phase larvaire ; ii) empêchant la ponte et ; iii) ralentissant la croissance des huîtres (résultats non montrés ici).

Tableau 1. Effets de la température (en degré Celsius) et de la concentration en nourriture (µg Chla.l⁻¹) sur la durée de la phase larvaire pélagique, le nombre de pontes et le temps nécessaire aux huîtres pour atteindre une taille commerciale. Des concentrations de 0,2 à 0,6 µg Chla.l⁻¹ sont typiques de celles rencontrées dans les atolls perlicoles.

Température (°C)	24		26		28		30	
Concentration en nourriture (µg Chl a.l ⁻¹)	0,2	0,6	0,2	0,6	0,2	0,6	0,2	0,6
Durée de la phase pélagique (en jours)	50	20	40	20	20	10	10	5
Nombre de pontes	4	10	6	10	6	12	8	12
Temps pour atteindre une taille commerciale (en mois)	25	15	20	15	20	10	15	10

→ LES ÉVÈNEMENTS CONNUS DE MORTALITÉ



Les évènements de mortalité de masse et le vaiiā

En Polynésie française, 12 évènements de mortalité (tableau 1) ont été reportés depuis 1985 bien qu'il soit probable qu'il y en ait eu davantage. Les organismes touchés par ces phénomènes varient. On peut aussi distinguer les mortalités massives qui impactent tout le lagon d'un atoll et les évènements partiels qui affectent une seule zone ou une partie du lagon. Certains atolls, du fait de leur géomorphologie et de leur taille, semblent plus touchés que d'autres par ces évènements. Aucune étude n'a pu être réalisée pendant ces phénomènes car ces derniers ont été signalés tardivement par les populations. Les diagnostics sur ce qui s'est passé exactement sont donc difficiles à réaliser.

Les évènements de mortalité de masse les plus connus sont ceux de Takapoto en 1985, de Hikueru en 1994 et Takarua en 2014. Ces épisodes ont été caractérisés par une coloration verte des eaux, aussi appelés *vaiiā* en pa'umotu. Ces mortalités sont la conséquence indirecte de conditions environnementales particulières. Pour les autres phénomènes, les mortalités observées peuvent être directement causées par des températures élevées. C'est par exemple le cas pendant des épisodes El Niño, comme à Reao en 2016.

Tableau 1. Evènements de mortalité en Polynésie française sur la période 1985-2014.

Atoll	Date	Organismes affectés
Takapoto*	1985	Poissons et benthos*
Hikueru*	1994	Poissons et benthos
Manihi	1994	Huîtres perlières
Manihi	1997	Huîtres perlières
Manihi	1998	Benthos, huîtres perlières
Takapoto	1998	Huîtres perlières
Takarua	2000	Huîtres perlières
Takarua	2001	Bénitiers
Fangatau	2004	Bénitiers
Tatakoto*	2009	Bénitiers
Ahe	2012	Huîtres perlières
Takarua*	2014	Huîtres perlières
Reao	2016	Bénitiers

* Evènements de mortalité considérée massive

Les principaux sites impactés sont les atolls fermés ou semi-fermés comme Takapoto et Takarua, respectivement. Même les atolls ouverts (avec une passe) comme Takarua, peuvent être touchés puisque les zones éloignées de la passe peuvent être stagnantes. On a observé peu de mortalité dans les atolls très ouverts, excepté s'ils sont de petite taille, comme Hikueru.

Le vaiiā

Le *vaiiā* a fortement impacté l'industrie de la perle. Il est causé par la prolifération importante de **phytoplancton*** (algues microscopiques 100 à 200 fois plus petites qu'1 mm) ce qui donne la coloration verte ou jaune du lagon. La durée de ce phénomène est variable (quelques jours à plusieurs mois). Ce phénomène est peu connu mais la prolifération des algues semble être liée aux conditions climatiques générales aux alentours de l'atoll et dans le lagon.

Lorsque les conditions de vents et de houles sont calmes pendant une longue période, les eaux ne se renouvellent et ne circulent plus, favorisant le dépôt des sédiments et une séparation des couches profondes du lagon de la couche de surface, avec des températures plus élevées en surface. On parle alors de stratification du lagon. Les couches isolées se retrouvent rapidement dépourvues d'oxygène (figure 1A), ce qui peut entraîner directement des mortalités.

Par ailleurs, si cette période de calme est suivie par une phase de houles et de vents forts, le mélange des eaux est rétabli homogénéisant les températures dans la colonne d'eau et favorisant la remise en suspension des nutriments piégés dans la colonne d'eau et les sédiments (figure 1B). Ces nutriments deviennent disponibles pour le phytoplancton présent qui alors, se développe rapidement (figure 1C). Cette « efflorescence » n'est pas favorable aux organismes filtreurs comme les huîtres, d'autant plus si le **plancton*** qui s'est développé est toxique, mais ce n'est pas forcément le cas. En grande quantité, le phytoplancton crée un environnement peu propice au développement des huîtres, parfois sur le long terme comme cela a été le cas à Takarua après 2014.

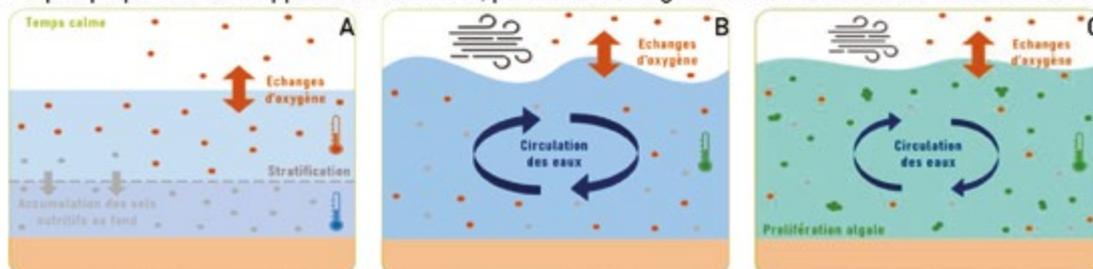


Figure 1. Déroulement et mécanismes probables d'un vaiiā et sa succession d'évènements. Les points oranges représentent l'oxygène, en gris ce sont les sels nutritifs et enfin en vert, le plancton. Dans la figure C, l'eau est colorée en bleu-vert pour illustrer la couleur du vaiiā.



Les facteurs aggravants

Les facteurs environnementaux peuvent influencer sur le déroulement d'événements aboutissant à des mortalités. Pour les quelques épisodes connus de mortalité, on a noté des combinaisons de conditions environnementales spécifiques, avec une hiérarchie et avec des facteurs que l'on peut appeler aggravants (figure 1).

Le 1er facteur déterminant est la présence de vent très faible (< 5 km/h), ce qui en pratique diminue le mélange des masses d'eau et entraîne la stratification expliquée précédemment.

La 2ème condition nécessaire est une température élevée supérieure à 27,4°C.

Enfin, si ces éléments sont accompagnés d'une houle très faible voire inexistante (hauteur de vague significative $\leq 1,034$ m) alors les conditions semblent réunies pour qu'il y ait des risques de mortalité dans le cas d'atolls semi-fermés à semi-ouverts.

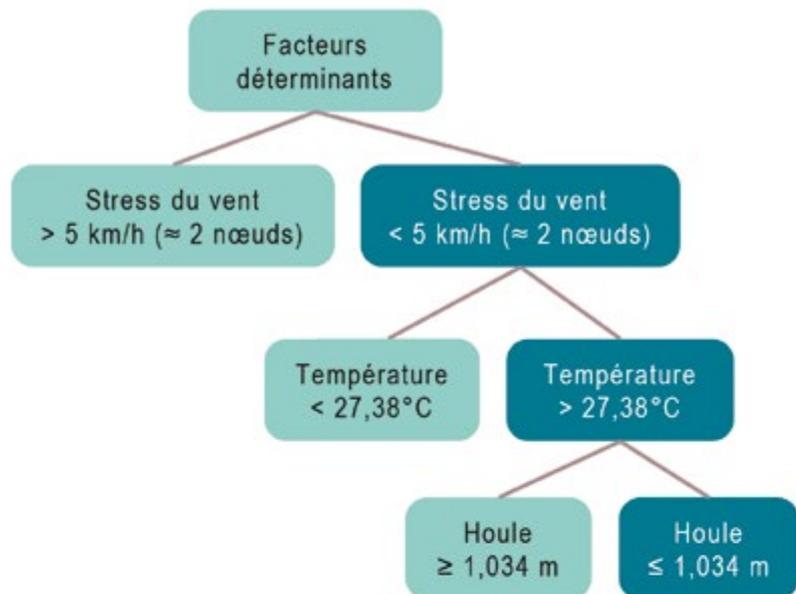


Figure 2. Arbre de décision séparant les conditions climatiques susceptibles d'entraîner un événement de mortalité massive (bleu foncé) ou pas (bleu clair). Ces conditions doivent être observées sur au moins une semaine. La valeur de la houle est donnée en hauteur de vague significative.

Conséquences sur la perliculture

Suite aux épisodes de mortalité observés depuis bientôt 40 ans, notamment à Takapoto et à Takarua, la filière perlicole a été fortement impactée. Pour Takapoto par exemple, ce n'est que 27 ans après les événements de 85 – soit en 2012 – que la collecte de naissains et les stocks d'huîtres perlières sont revenus à des valeurs normales.

A Takarua où un *vaitia* s'est déroulé récemment (2014), la perliculture reste encore affectée par l'épisode en 2022. Les individus de *P. margaritifera* peuvent se reproduire et croître, cependant leur taux de croissance est inférieur à ce qu'il devrait être (jusqu'à 2 fois moins) malgré des conditions environnementales et des concentrations en nourriture (plancton) propices à leur développement. Une des explications serait que les espèces planctoniques dont se nourrit *P. margaritifera* ne sont pas revenues en quantités ou qualités suffisantes.



Figure 3. Photos de nacrines mortes.

BIOLOGIE DES HUÎTRES PERLIÈRES

→ LA DISPERSION LARVAIRE

La phase larvaire de l'huître perlière

Après fécondation des **gamètes*** dans le milieu, les œufs évoluent pour former des larves qui vont se développer dans le lagon. La durée de la phase larvaire **pélagique*** varie entre 15 et 30 jours en fonction des conditions environnementales (température et nourriture).

Pendant cette période, les larves vont se disperser dans le lagon sous l'action des courants et de leur nage. Ensuite, les larves vont chercher un support pour se fixer : soit sur un support naturel (corail mort, dalle corallienne), soit sur un collecteur.



Figure 1. Image montrant un individu de *Pinctada margaritifera* au stade post-larve (en vert et entouré sur l'image) fixé sur un collecteur.

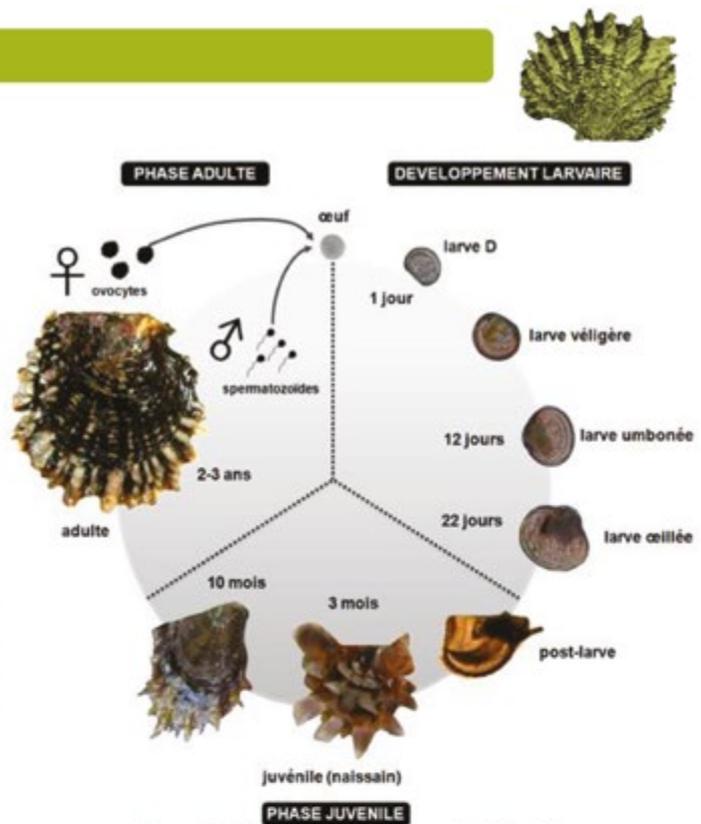


Figure 2. Cycle de vie de l'huître perlière *Pinctada margaritifera*.

Pourquoi s'intéresser à la dispersion larvaire ?

Le succès du collectage de naissains de nacres varie selon l'atoll mais aussi au sein d'un même lagon. Cette variabilité a des conséquences économiques et écologiques. Par exemple, dans les atolls où le collectage est faible, les perliculteurs importent des nacres d'autres îles. Ce transfert représente un coût important pour les perliculteurs et il peut entraîner la dispersion de **pathogènes*** et d'autres espèces invasives dans le lagon.

Pour expliquer la variabilité du succès de collectage selon les zones du lagon mais aussi pour prédire les zones de meilleur potentiel suivant les conditions environnementales (quand on peut les connaître à l'avance), il est nécessaire d'étudier la dispersion larvaire ainsi que les effets des facteurs environnementaux (concentration en nourriture, température) sur cette dernière.

Le succès du collectage résulte du recrutement des naissains sur les collecteurs. Ce succès dépend de nombreux facteurs malheureusement extrêmement difficiles à connaître en temps réel ou à l'avance. Les principaux éléments influant sur le succès du collectage sont la quantité de larves, leur développement, les facteurs de fixation, et d'autres facteurs qui interviennent après fixation sur le substrat. La quantité de larves dans le lagon dépend du stock de géniteurs chez les huîtres sauvages et d'élevage, et du nombre de pontes. La vitesse du développement larvaire, elle, dépend des paramètres environnementaux et de la disponibilité en nourriture. Ces éléments varient dans l'espace et dans le temps. Enfin, le transport d'une zone à une autre des larves de *P. margaritifera* est dépendant des courants dans le lagon. Le développement des larves ainsi que l'endroit où elles se fixeront sont donc liés à ce transport et à la dispersion qu'il induit, *modulo* tous les autres facteurs.

Modélisation de la dispersion larvaire

Afin de simuler au mieux la dispersion larvaire, plusieurs **modèles*** sont utilisés et parfois couplés entre eux. Tout d'abord, un modèle **hydrodynamique*** permet de modéliser les courants dans le lagon et donc le transport des larves. Un modèle de budget énergétique (DEB) est parfois également utilisé pour simuler la croissance de chaque larve en fonction de la température et de la quantité de nourriture qu'elle rencontre lors de sa dérive, si tout cela peut être estimé. Dans certains cas, si les données de stock de nacres sont disponibles, il est possible d'intégrer la structure de la population, son sex-ratio, et sa fertilité dans la **modélisation***.



→ POINTS CLÉS DE LA PARTIE BIOLOGIE



Nourriture des huîtres perlières : le plancton

L'étude de la chaîne alimentaire dans les lagons pericoles depuis 30 ans a montré que les larves, juvéniles et adultes des huîtres perlières se nourrissent de différents groupes et tailles de **phytoplancton*** et de **zooplancton***, qui ne sont généralement pas limitants dans les lagons. L'huître a toutefois des compétiteurs parmi le zooplancton puisqu'ils se nourrissent des mêmes organismes que consomment les huîtres voire des larves. Par ailleurs, les changements environnementaux peuvent faire varier les assemblages de **plancton***. Ceci explique que les populations d'huîtres peuvent alterner entre des périodes plus ou moins favorables affectant leur développement et la survie des larves et juvéniles.

Croissance et ponte des huîtres perlières

Des **modèles*** dits « de budget énergétique dynamique » sont utilisés pour étudier les effets de l'environnement (température et quantité de nourriture) sur la **physiologie*** et le développement des huîtres perlières. Ce type de modèle permet d'estimer la vitesse de croissance d'une huître, le nombre annuel de pontes et la durée de la phase **pélagique*** des larves, qui sont tous des paramètres très difficiles à suivre dans le milieu.

Les performances physiologiques des huîtres (croissance, nombre de pontes, durée de la phase larvaire) sont généralement corrélées avec la quantité de nourriture, estimée par la concentration en chlorophylle a dans l'eau.

Lorsque les températures augmentent, le développement des huîtres est également amélioré. Cependant, au-delà de 33°C environ, les performances se dégradent rapidement.

Stocks d'huîtres sauvages

Les stocks d'huîtres sauvages et en élevage contribuent a priori tous deux aux larves captées sur les collecteurs. La connaissance des stocks ainsi que la structure de taille des populations permet d'étudier la capacité de reproduction des huîtres perlières dans le lagon. De plus, elle peut aboutir à des recommandations de gestion dans le but d'améliorer les stocks, notamment avec du restockage.

Pour faire une estimation des stocks, la **densité*** des nacres est mesurée ainsi que la taille de chaque individu. Les mesures sont réalisées en plongée et en palmes, masque, tuba, à différentes profondeurs (entre 40 m et la surface). Le nombre de stations dépend de la surface de l'atoll.

Parmi les îles et atolls étudiés, Takapoto possède les plus grandes densités de nacres.

A Takapoto, Raroia et Ahe, on observe des différences de la densité de nacres au sein des lagons avec des densités plus importantes dans la partie Sud-Ouest du lagon que dans la partie Nord-Est.

Aux Gambier, les huîtres se concentrent dans la partie centrale du lagon.

Dispersion larvaire

Les larves d'huîtres perlières sont soumises aux courants qui sont eux-mêmes dépendants du vent, de la marée et de la houle. Par ailleurs, l'**hydrodynamique*** d'un lagon dépend aussi de la géomorphologie des couronnes d'atolls et de sa **bathymétrie***.

L'étude de la dispersion larvaire se fait grâce à la **modélisation***. Un modèle hydrodynamique qui permet de simuler les courants dans le lagon est utilisé pour simuler la dispersion des larves. Selon les données disponibles (température, quantité en nourriture), un modèle DEB peut être utilisé pour intégrer aux **simulations*** la croissance des larves.

La simulation de la dispersion des larves d'huîtres permet d'expliquer la variabilité du succès du collectage sur les différentes zones d'un lagon en fonction des conditions environnementales. D'autres facteurs influent toutefois sur le collectage comme la quantité de larves, leur développement, les facteurs de fixation et ceux intervenant après la fixation des larves.

Les évènements connus de mortalité

Plusieurs évènements de mortalité ont été reportés depuis 1985. Il semblerait que la cause soit la combinaison de plusieurs facteurs aggravants tels qu'un vent faible, une température élevée et une houle faible voire nulle se prolongeant de manière inhabituelle, au-delà d'une semaine. Ces conditions sont favorables à l'apparition de zones sans oxygène et au développement de micro-algues qui affectent la chaîne alimentaire et la physiologie des nacres.

Lors de ces évènements, des eaux vertes ont été observées. Ce phénomène est appelé *vaitia* en pa'umotu.

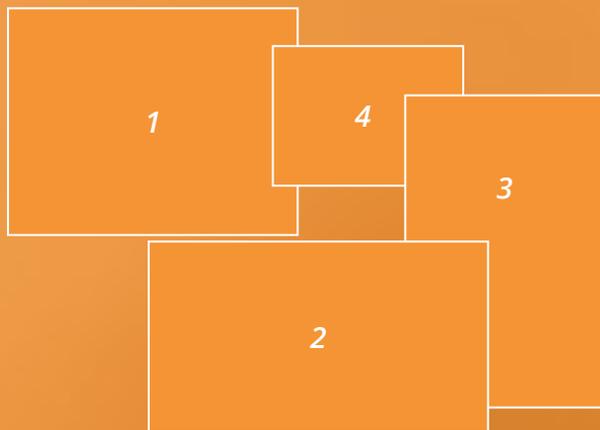
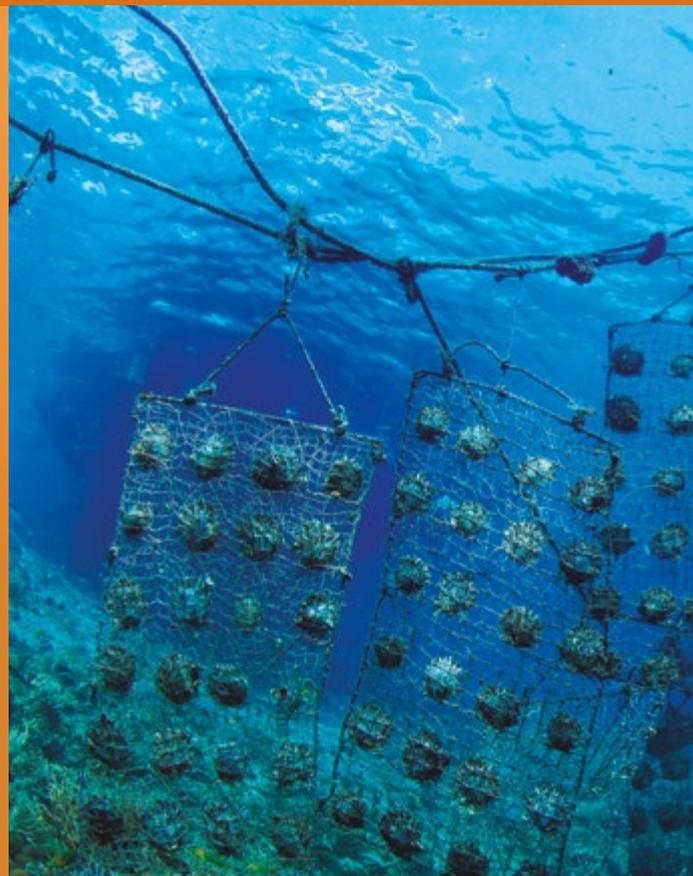


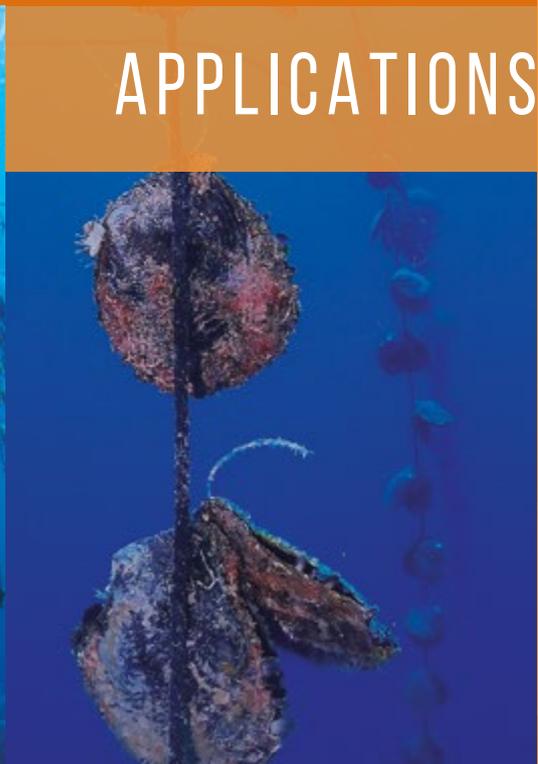
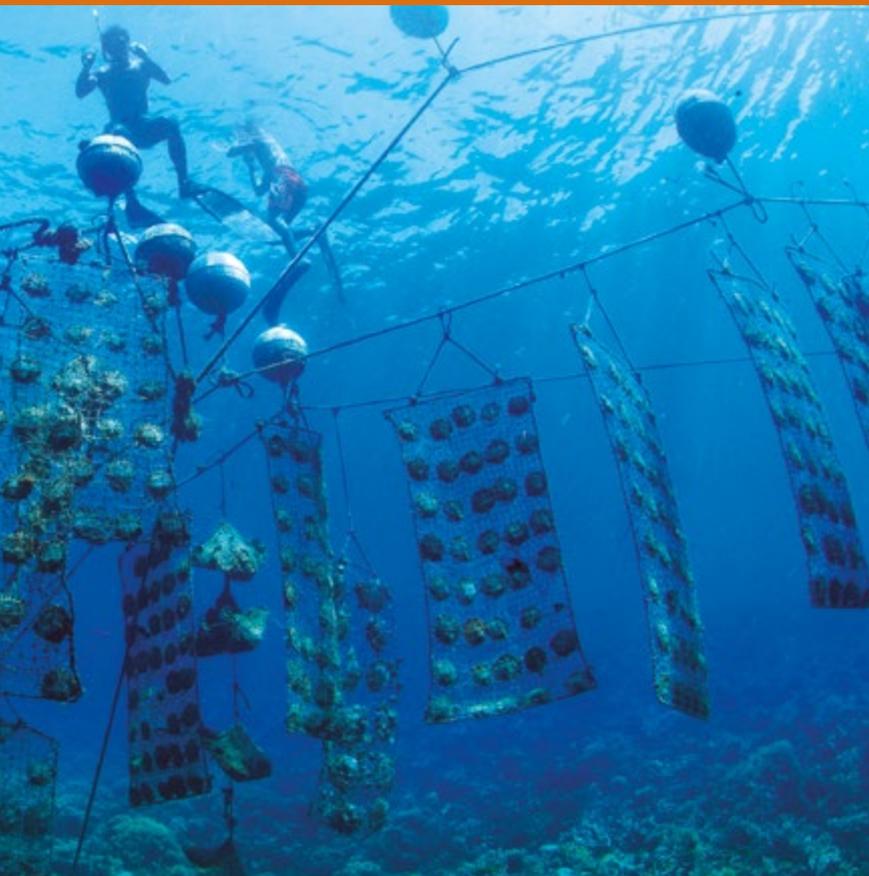
Photo 1 - Collectage à Ahe.

Photo 2 - Attente de la greffe aux Gambier.

Photo 3 - Elevage et grossissement.

Photo 4 - Après la récolte et recyclage des coquilles.





APPLICATIONS

SYNTHÈSE DES PATRONS DE DISPERSION LARVAIRE



Description générale

L'objectif ici est d'étudier comment les larves d'huîtres perlières se dispersent dans un lagon pericole selon le régime de vent lors de la ponte. Pour ce faire, le lagon étudié est divisé en plusieurs secteurs de superficies égales. Les données de stocks d'huîtres sauvages, lorsqu'elles sont disponibles, sont utilisées pour moduler la quantité de gamètes* – et donc de larves – libérés dans ces différents secteurs. Ces éléments sont ensuite couplés aux paramètres de vent pour simuler la dispersion des larves et tenter ainsi de déterminer les zones où les larves auront tendance à s'accumuler ou pas.

Trois atolls ont été étudiés pour cette étude : Ahe, Takaroa et Raroia. Les régimes de vents sur 30 jours identifiés étant très similaires entre ces atolls, seul l'hodographe de Takaroa est montré ici en figure 1. Ce type de figure se lit de la façon suivante : 1) la direction du vent est indiquée par la direction que prend la ligne en partant du centre. Cette direction varie au cours du temps ; 2) la vitesse des vents est représentée sur les axes. Plus la ligne s'éloigne du centre et plus le vent a été fort sur la période de 30 jours ; et 3) chaque couleur représente un régime de vent.

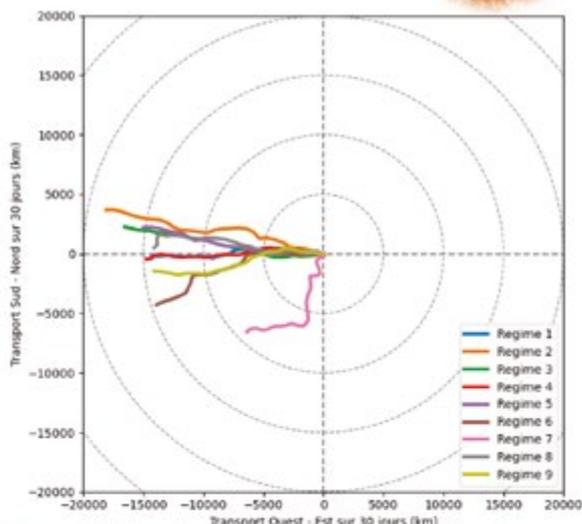


Figure 1. Hodographe représentant les régimes de vents sur une période de 30 jours. Ceux-ci sont typiques de l'atoll de Takaroa et ont été identifiés après une analyse de 37 ans de données de vent.

Le cas de Ahe

Selon le régime qui souffle après l'évènement de ponte et selon la période de vie larvaire et de dispersion considérée (15 ou 30 jours), les résultats de dispersion sont différents (figure 2). Par exemple, pour des vents d'Est-Sud-Est (régime 2), la proportion de larves est plus importante au centre et Nord du lagon, zone propice au collectage (indiquée en marron foncé), tandis qu'elle est plus élevée au centre pour des régimes d'Est-Nord-Est (régime 6). A 30 jours, les quantités diminuent fortement sur certains secteurs et les larves semblent se concentrer principalement sur la partie centrale du lagon.

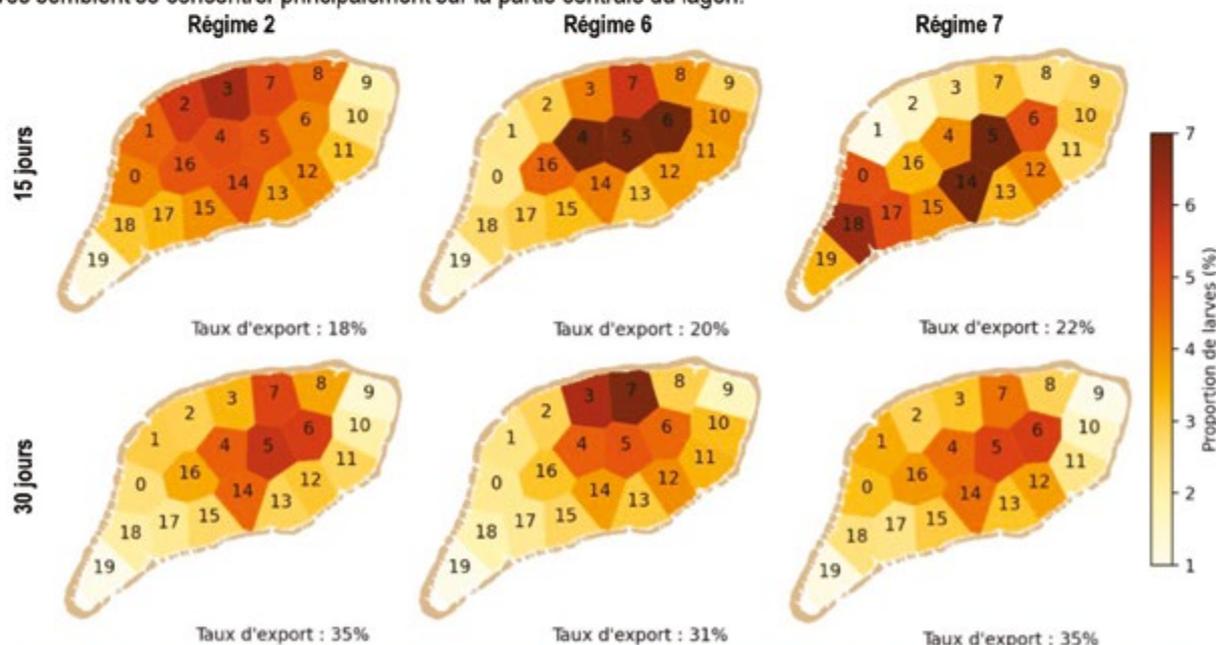


Figure 2. Exemples de cartes de simulation* montrant la proportion de larves retrouvées dans les différents secteurs du lagon de Ahe après 15 et 30 jours de dispersion selon les régimes de vents 2, 6 et 7. Plus la couleur est foncée, plus la quantité de larves est importante. Le taux d'export, c'est-à-dire la proportion de larves qui sortent du lagon ou qui sont perdues au bout de 15 ou 30 jours, apparaît en bas de chaque figure.



Le cas de Takaroa

Pour les régimes de vents 2 et 6, les plus grandes proportions de larves sont retrouvées au centre du lagon, principalement aux secteurs 6 et 7. Le régime 7 entraîne un patron un peu différent avec une concentration élevée de larves principalement sur les secteurs 17, 18 et 19. La durée (15 ou 30 jours) considérée ne semble pas entraîner de différences significatives.

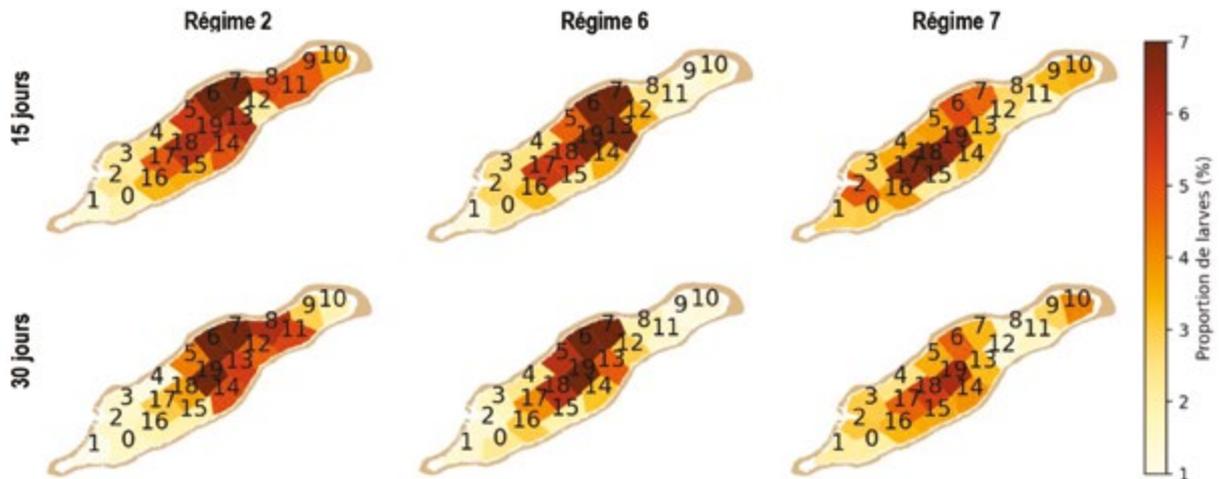


Figure 3. Exemples de cartes de simulation montrant la proportion de larves retrouvées dans les différents secteurs du lagon de Takaroa après 15 et 30 jours de dispersion selon les régimes de vents 2, 6 et 7. Plus la couleur est foncée, plus la quantité de larves est importante.

Le cas de Raroia

Les vents d'Est-Sud-Est (régime 2) entraînent une dispersion des larves plutôt homogène, surtout au bout de 30 jours. Pour les régimes 6 et 7, les larves ont tendance à se concentrer dans la partie Sud-Ouest du lagon. Cette tendance est plus marquée à 15 jours qu'à 30 jours.

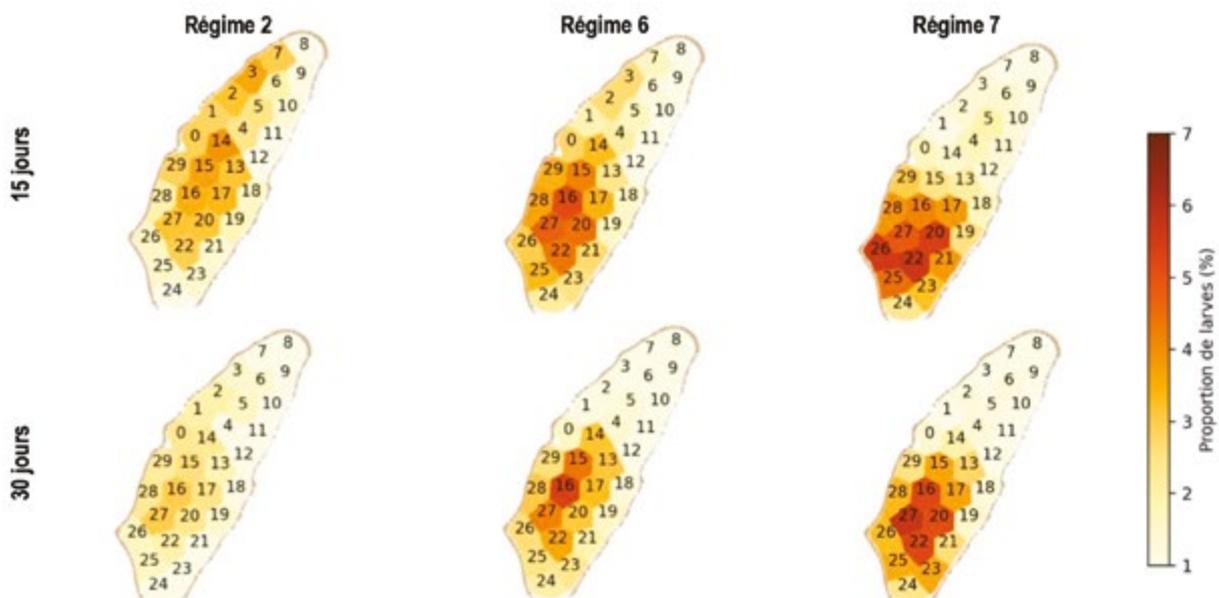
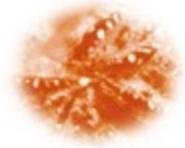


Figure 4. Exemples de cartes de simulation montrant la proportion de larves retrouvées dans les différents secteurs du lagon de Raroia après 15 et 30 jours de dispersion selon les régimes de vents 2, 6 et 7. Plus la couleur est foncée, plus la quantité de larves est importante.

→ HYDRODYNAMIQUE DES LAGONS COLLECTEURS : LE CAS DE MANGAREVA



Sites d'échantillonnage à Mangareva

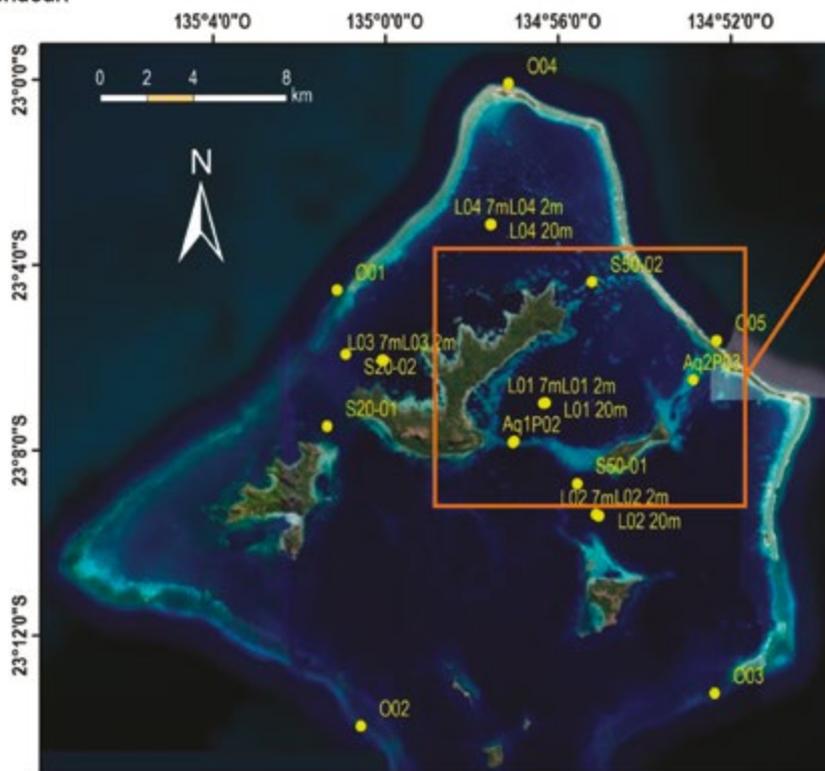
Mangareva, située dans l'archipel des Gambier, est l'une des îles les plus productrices de perles faisant d'elle un pilier de l'industrie perlière. L'objectif ici est d'étudier l'hydrodynamique* du lagon à l'aide d'instruments de mesure (figure 1) afin de comprendre et d'expliquer les processus liés au collectage d'huîtres perlières. On s'intéresse notamment à la zone du lagon en face du village de Rikitea où la plus grande partie du collectage se fait (figure 1).

Les données de vent ont été récoltées à l'aide de modèles* et données satellite qui fournissent les conditions climatiques toutes les 6 heures.

Les appareils de mesure ont été placés pendant la saison chaude 2019-2020 sur des zones spécifiques qui permettent d'obtenir les mesures les plus complémentaires possibles. En premier lieu, 5 capteurs de pression et de température de l'eau RBR-duet sont mis en place sur la pente océanique (stations Oxx) et 4 dans le lagon (stations Lxx7m) (figure 1). Ils sont utilisés pour mesurer la houle océanique et la marée. Leurs emplacements ont été définis pour obtenir des mesures de houle impactant tous les secteurs de l'île. Les RBR-duet dans le lagon permettent de déterminer le déphasage* entre la marée du côté océanique et celle dans le lagon.

Des courantomètres ADCP, Aquadopp et Marotte (sur les stations Sxx, Aqx et Pxx respectivement en figure 1) sont ensuite positionnés à différentes profondeurs pour connaître l'influence des houles incidentes et du vent sur les courants dans le lagon des Gambier. Ces instruments de mesure permettent également de comprendre les flux* d'eau autour de Mangareva, c'est-à-dire s'ils sont plutôt entrants ou sortants, et en fonction de quelles conditions de vent, houle ou marée.

Enfin, des capteurs de température (SBE56, sur les stations Lxx2m ou Lxx20m en figure 1) sont déployés à 2 et 20 m de profondeur.



Source : Google Earth



Les 3 stations ci-dessus sont des stations de collectage déployées par les perliculteurs en octobre-novembre 2018 pour un suivi de courte durée. Ces données de la Direction des Ressources marines (DRM) sont utiles pour valider les interprétations de l'effet des courants sur le collectage, mais nous disposons toutefois de peu de données. Pouvoir disposer de statistiques fournies par les perliculteurs serait très utile.

Figure 1. Distribution des capteurs physiques déployés autour de l'île de Mangareva de novembre 2019 à février 2020. Légende : capteurs Lxx2m ou Lxx20m = Seabird SBE56 (température) ; O et Lxx7m = RBR-duet (pression, température) ; S20 = ADCP RBI (mesures de courants) peu profonds (15-20 m) ; S50 = ADCP RBI profonds (30 m) ; Aq = ADCP Aquadopp très peu profond (3 m) ; P = courantomètres Marotte (3 m).



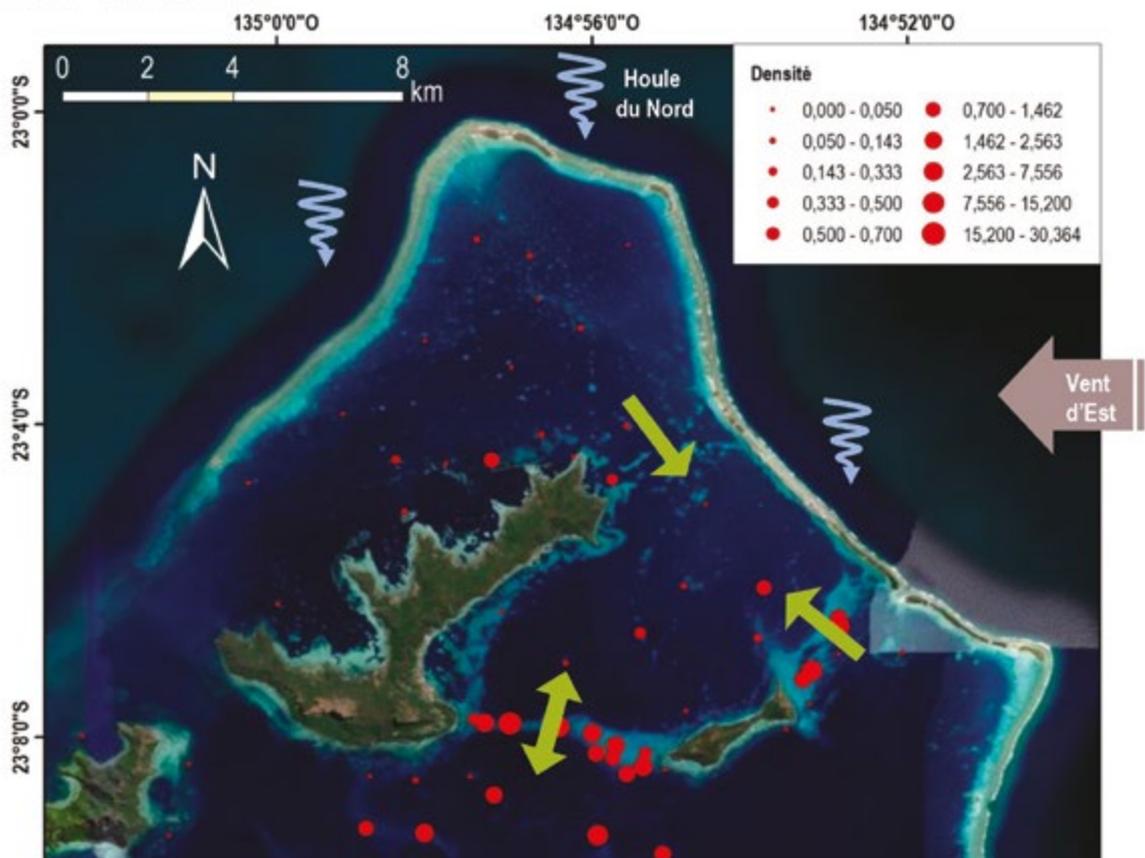
Le collectage de naissains à Mangareva/Rikitea et son contexte de stock et d'hydrodynamique

Dans l'archipel des Gambier, une zone dédiée au collectage des naissains a été identifiée et délimitée par la DRM. Celle-ci se situe dans les eaux qui séparent l'île de Mangareva et Aukena. Elle est composée de zones à fort captage de larves d'huîtres perlières qui sont représentées par les stations Rikitea, Cardinal et Aukena (figure 1).

Parmi ces 3 sites de collectage de la DRM (figure 1), le plus fort captage a été observé en 2018-2019 à Aukena (58 ± 29 nacres par mètre de collecteur). Pour Rikitea et Cardinal, les valeurs étaient plus faibles puisqu'elles présentaient en moyenne 17 ± 9 et 14 ± 5 nacres par mètre de collecteur, respectivement.

Concernant les populations d'huîtres sauvages, l'évaluation des stocks réalisée sur la période 2019-2020 montre une forte densité* de *P. margaritifera* dans la zone Sud peu profonde qui sépare Aukena et Mangareva, et un peu plus au Sud (figure 2). Dans le Nord du lagon, les densités sont très faibles voire nulles.

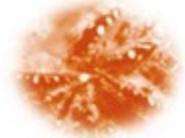
Une fois les mesures corrigées des oscillations d'entrées et de sorties rapides d'eau dues à la marée, l'analyse des mesures de vitesse de courants dans le lagon en saison chaude montre que les flux d'eau à l'Est (Aq2P03) et au Nord (S50-02) du lagon de Rikitea sont principalement rentrants tandis qu'ils sont plus variables au Sud (Aq1P02). Ces courants rentrants semblent être liés à des houles du Nord qui déferlent sur le secteur Nord et Nord-Ouest du lagon et aux vents d'Est-Sud-Est. Les sorties d'eau au Sud (Aq1P02) sont la conséquence des entrées d'eau importantes observées à l'Est et au Nord du lagon. Les flux d'eau étant principalement entrants, les larves originaires des zones de pontes du stock naturel (abondant de part et d'autre d'Aukena, figure 2) s'accumulent donc plus facilement dans cette partie du lagon, tandis que la zone Nord est très peu alimentée. Cette étude explique ainsi le captage généralement intéressant de ce secteur en saison chaude. Une analyse plus fine permettrait d'expliquer les années « exceptionnelles » comme en 2016.



Source : Google Earth

Figure 2. Densités d'huîtres perlières (nombre d'individus sur 100 m²) mesurées dans le lagon de Mangareva et schématisation de courants corrigés de la marée durant la saison chaude, période où le vent d'Est et la houle du Nord sont bien présents. Les courants n'ont pas été étudiés en saison froide, quand les houles de Sud-Ouest sont les plus importantes.

COMMENT VALIDER LES RÉSULTATS DES MODÈLES ?



Description générale

La dispersion des larves d'huîtres perlières *Pinctada margaritifera* est un processus complexe à suivre à l'échelle d'un lagon entier. Le suivi sur le terrain de la dispersion larvaire est un travail difficile à mettre en place, il est **chronophage*** et peut représenter un coût important sur le long terme. Les scientifiques font ainsi appel à des **modèles*** de dispersion larvaire qui simulent les déplacements des larves d'huîtres perlières dans un lagon selon les conditions environnementales (température et concentration en nourriture) et climatiques (vent et houle). Ces modèles couplent des modèles **hydrodynamiques*** avec le comportement et la **physiologie*** des larves. Pour valider les résultats, des campagnes de terrain sont nécessaires et trois méthodes peuvent être utilisées : 1) Le comptage des larves sur le terrain, 2) Les nouveaux outils de génétique et 3) L'utilisation de collecteurs expérimentaux

Celles-ci sont détaillées dans les sections suivantes.

Echantillonnage des larves sur le terrain

L'échantillonnage des larves sur le terrain nécessite des déplacements sur les zones d'intérêt. Un tuyau est placé à une profondeur définie et connecté à une pompe pour récupérer l'eau. Cette eau est ensuite filtrée à l'aide de mailles afin de ne retenir que les particules ou organismes dont la taille est comprise entre 0,040 et 0,250 mm, ce qui inclut les larves de *P. margaritifera*. Les échantillons sont ensuite préservés et analysés en laboratoire. Les larves sont comptées visuellement puis mesurées à l'aide d'un logiciel (par exemple Nlvision®). Au final on obtient une abondance par volume d'eau. Cette méthode ne permet toutefois pas de différencier les larves de *P. margaritifera* de celles de *P. maculata*.

Les données climatologiques et les concentrations en chlorophylle a (pour approximer la concentration en nourriture) sont également prises en compte pour interpréter les abondances de larves.

Les résultats obtenus peuvent être comparés à ceux des modèles pour valider la bonne précision de ces derniers. Un exemple de comptage est donné en figure 1.

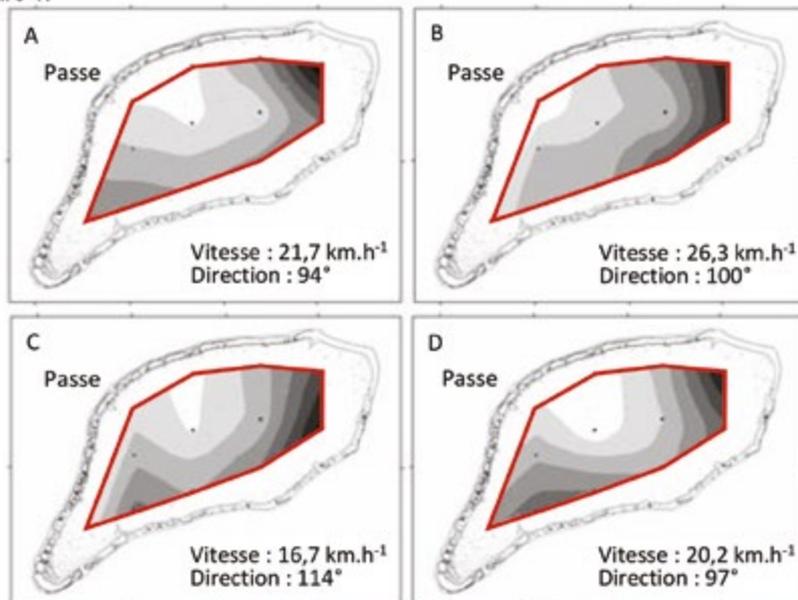


Figure 1. Variation spatiale de l'abondance des larves de bivalves à Ahe de A) avril à mai 2007 ; B) août 2007 ; C) novembre 2007 ; et D) février à mars 2008. Les vitesses et directions moyennes du vent sont indiquées sur la figure. Les zones noires ont une abondance de bivalves 4 fois plus importante que les zones blanches.

Les larves sont réparties de façon différente dans le lagon durant les 4 périodes d'étude.

Les concentrations les plus importantes se trouvent aux secteurs Ouest et Est du lagon, et les concentrations les plus faibles sont dans la zone sous l'influence de la passe.



Analyse génétique

Cette méthode nouvelle permet de connaître précisément l'origine des naissains d'huîtres perlières récoltés sur les collecteurs. Pour cela, des prélèvements de tissus sont effectués sur les populations d'huîtres sauvages, d'élevage et sur les naissains des collecteurs. L'ADN^{*} des échantillons permet de déterminer l'origine des naissains. Par exemple, si l'ADN est identique entre les naissains d'un collecteur et une population sauvage, alors ces naissains sont certainement issus d'une ponte de cette population sauvage. La nouveauté de l'approche d'un point de vue génétique est, que l'on peut maintenant analyser très finement l'ADN et pas certaines sections seulement.

A Ahe, une étude pilote a permis de montrer que les huîtres d'élevage de l'ensemble du lagon avaient des ressemblances génétiques avec les huîtres sauvages du Sud-Ouest (figure 2). Mais les naissains des collecteurs étudiés dans tout le lagon provenaient uniquement de la population sauvage qui se trouve dans le Nord-Est du lagon. On peut en conclure que seule cette population sauvage contribue au collectage. Toutefois, 6 sites seulement de collectage ont été étudiés et toutes les zones du lagon n'étaient pas forcément couvertes. Les résultats doivent donc être interprétés avec vigilance. De plus, il est possible qu'avant l'échantillonnage des collecteurs, des naissains d'origines différentes aient pu se fixer sans pouvoir survivre.

La modélisation^{*} a validé ces résultats de terrain puisqu'elle a aussi montré que les collecteurs pouvaient être connectés à la population sauvage du Nord-Est, pendant la période étudiée. Mais elle montre aussi d'autres possibilités de connexion. Ici, génétique et modélisation se complètent et chaque approche apporte un plus. On retiendra toutefois que la génétique fournit des résultats indiscutables mais dont l'intérêt final pour comprendre la variabilité du collectage dépend de l'effort d'échantillonnage.

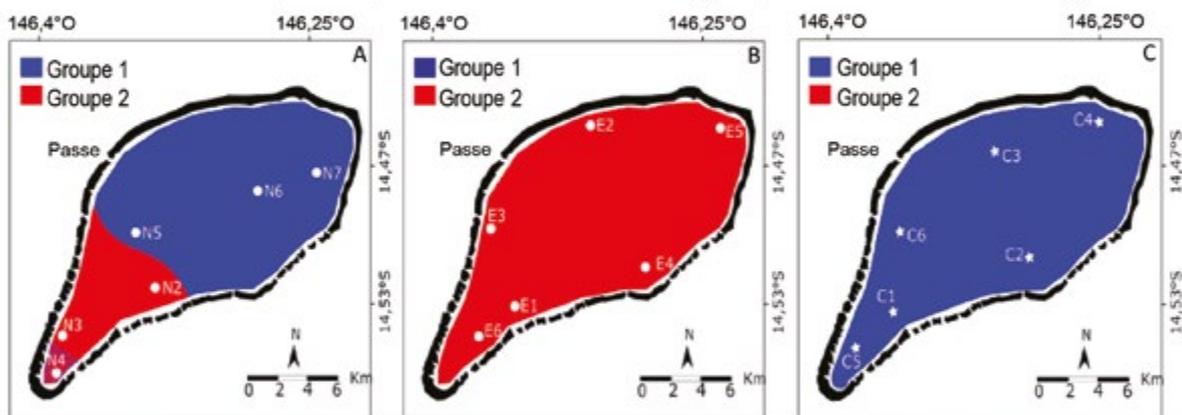


Figure 2. Représentation des groupes de population dans le lagon de Ahe d'après les études génétiques récentes. Les populations d'huîtres sauvages (stations N, panneau A) se répartissent en 2 groupes (bleu et rouge) et sont bien séparées dans le lagon. Les populations d'huîtres en élevage (stations E) sont quant à elles toutes du même groupe (rouge) que la population naturelle de l'Ouest (panneau B). Enfin, le panneau C montre que tous les naissains (stations C) sont, eux, du même groupe bleu que la population naturelle du lagon Nord. Sur la base de ces stations et résultats, l'étude a conclu que seule la population du lagon Nord contribuait au collectage, mais ce résultat demande à être confirmé par d'autres expériences similaires.

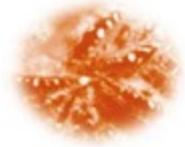
Collecteurs expérimentaux

L'utilisation de collecteurs expérimentaux permet de mesurer le taux de fixation des larves de l'huître perlière *Pinctada margaritifera* en des points connus et sur des périodes prédéfinies. Pour ce faire, des collecteurs expérimentaux, similaires à ceux utilisés dans l'industrie perlière, sont posés à plusieurs profondeurs et zones du lagon. Ces derniers sont immergés pendant une durée de 6 semaines plusieurs fois dans l'année puis ils sont récupérés. Les naissains sont retirés du collecteur, identifiés puis comptés. L'effet des conditions environnementales sur le collectage en chaque station peut aussi être étudié si celles-ci sont mesurées pendant l'étude.

Les valeurs d'abondance obtenues pour *P. margaritifera* sur différents collecteurs permet de cartographier le succès du collectage. Ces cartes peuvent être comparées aux résultats de simulation^{*} de la dispersion larvaire. Toutefois, la modélisation de la dispersion larvaire ne prend pas encore en compte à ce jour ce qui se passe sur le collecteur lui-même après la fixation des larves (prédation, compétition avec d'autres espèces, etc.).

Ces données sont difficiles à collecter sur les atolls éloignés et un retour sur le succès du collectage par les perliculteurs eux-mêmes serait très utile pour aider à valider les modèles de dispersion larvaire.

➔ RESTOCKAGE ET GESTION DU STOCK D'HUÎTRES



Pourquoi faire du restockage ?

Le restockage d'huîtres perlières consiste en l'introduction dans le milieu naturel d'individus de *P. margaritifera*.

L'huître perlière *P. margaritifera* est un hermaphrodite protandre qui est d'abord mâle puis ensuite femelle. Sa reproduction dépend donc du nombre d'individus de chaque sexe présents dans le milieu naturel (sex-ratio). Celui-ci peut être déterminé par la connaissance de la taille des individus puisque celle-ci est liée à l'âge et au sexe de l'huître. Par exemple, de 0 à 7 cm, aucune femelle n'est trouvée dans la population et au-delà de 13 cm, plus de 20% des individus sont des femelles. La structure de taille d'une population diffère selon les atolls et peut également varier au sein d'un même lagon. Elle varie aussi entre populations d'huîtres sauvages ou d'élevage. En effet, dans les fermes perlières, les huîtres sont plus petites et donc quasiment toutes mâles, alors que les huîtres sauvages, de taille plus importante en moyenne, sont principalement femelles.

Des expériences génétiques sur *P. margaritifera* ont été réalisées à Ahe et celles-ci ont montré que les naissains retrouvés sur les collecteurs provenaient uniquement des populations naturelles. Ceci suggère qu'aucun naissain ne provenait du stock en élevage et que seul le stock sauvage serait efficace pour la reproduction et le collectage. Cependant, ces résultats doivent être confirmés par des expériences complémentaires.

Ainsi, le restockage des huîtres apparaît comme une nécessité afin d'équilibrer le sex-ratio de la population, améliorer la reproduction de l'espèce et favoriser le collectage.

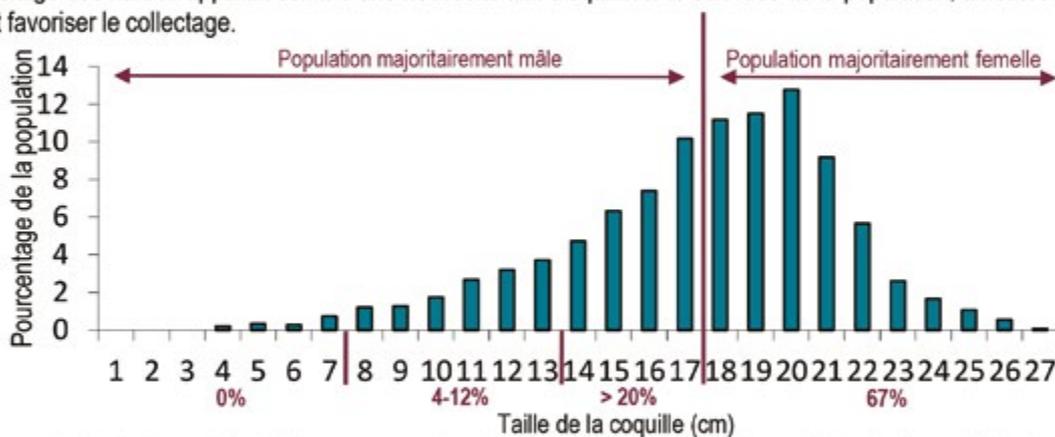


Figure 1. Structure de taille de la population d'huîtres sauvages dans le lagon de Raroia. Les données ont été collectées en 2018. Sous le graphique, en texte violet, est indiqué le pourcentage de femelles dans la population selon les classes de taille. Par exemple à partir de 13-14 cm, la proportion de femelles dépasse les 20%.

Éléments à prendre en compte pour du restockage

Lorsqu'on définit une zone de restockage d'huîtres perlières, plusieurs éléments sont à prendre en compte :

- La **bathymétrie*** : c'est un critère logistique puisque l'accès au fond doit être facilité. Ainsi, le choix des zones se concentrera sur les zones peu profondes si le stock naturel se retrouve majoritairement entre la surface et 10 m de profondeur.
- La **connectivité du lagon** : les huîtres seront posées préférentiellement sur des zones pour lesquelles la dispersion des **gamètes*** et des œufs lors d'un événement de ponte serait maximale pour la majorité des régimes de vents.

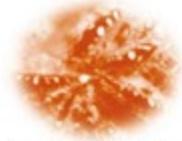
Enfin, de nombreux collecteurs ont été perdus et sont retrouvés chargés de nacres dans certains lagons. Dans le cadre d'opérations de nettoyage, la question de la gestion de ce stock se pose, à savoir si on les jette ou les relocalise. Pour ce faire, la contribution des comités de gestion de la perliculture est nécessaire et ils seront sans doute sollicités pour être parties prenantes.



Figure 2. Photos de collecteurs perdus en novembre 2021 dans le lagon de Takapoto.



→ POINTS CLÉS DE LA PARTIE APPLICATION



Synthèse des patrons de dispersion larvaire

La dispersion larvaire a été étudiée selon différents régimes de vent au moment de la ponte et périodes de dispersion considérées (15 ou 30 jours) dans les lagons de : Ahe, Takaroa et Raroia.

Les résultats de la **modélisation*** montrent que la dispersion des larves dans les secteurs du lagon variait en fonction du régime de vent et de la période de vie larvaire pris en compte.

A Ahe, pour des vents d'Est-Sud-Est et d'Est-Nord-Est, les larves auront tendance à s'accumuler au centre et Nord du lagon après 15 jours de dispersion. Si une période de 30 jours est considérée, la proportion de larves obtenues sur les différents secteurs est moins importante. Pour le régime 7, les larves s'accumulent au centre et Sud du lagon après 15 jours alors que l'on a une **homogénéisation*** des quantités de larves dans le lagon après 30 jours.

A Takaroa, les larves ont tendance à s'accumuler au centre du lagon pour les 3 régimes considérés. Cette tendance varie peu en fonction de la période considérée.

Pour Raroia, les régimes 6 et 7 entraînent une accumulation des larves dans la partie Sud-Ouest du lagon, peu importe la durée de dispersion considérée. Les concentrations de larves sont plus homogènes sous le régime 2.

Le cas de Mangareva

L'île de Mangareva a été instrumentée en 2018-2019 avec plusieurs capteurs permettant de mesurer les courants dans le lagon, les températures et la houle océanique.

Trois sites de collectage, considérés comme des zones à fort captage de larves d'huîtres perlières, ont été étudiés : Rikitea, Cardinal et Aukena. Sur ces sites, des collecteurs expérimentaux ont été posés afin de quantifier les larves présentes sur ces derniers.

Les plus grandes quantités de larves étaient observées à Aukena.

Une évaluation des stocks a été réalisée en 2019-2020. Celle-ci a montré une forte **densité*** de nacres dans la zone peu profonde qui sépare Aukena et Mangareva et un peu plus au Sud. Dans le Nord du lagon, les densités sont très faibles.

L'étude de l'**hydrodynamique*** du lagon montre des courants rentrants à l'Est et au Nord du lagon de Rikitea et des courants plus variables au Sud. Les courants rentrants semblent liés à des houles du Nord tandis que le **flux*** d'eau sortant, qui peut être observé au Sud, est lié aux entrées importantes d'eau dans le lagon de Rikitea. Cette dynamique explique l'accumulation des larves dans cette zone et donc son potentiel de captage des naissains.

Comment valider les résultats des modèles ?

Les **modèles*** de dispersion larvaire doivent être validés à l'aide de mesures de terrain. Pour cela, trois méthodes peuvent être utilisées : 1) l'échantillonnage des larves sur le terrain ; 2) l'analyse génétique et ; 3) l'utilisation de collecteurs expérimentaux.

L'échantillonnage des larves consiste à filtrer l'eau pour ne récupérer uniquement que les organismes d'une certaine taille dont les larves d'huîtres perlières, puis les larves sont comptées visuellement. Cette méthode permet d'obtenir une mesure de l'abondance des larves par volume d'eau.

L'analyse génétique permet de déterminer l'origine des naissains retrouvés sur les collecteurs. Pour cela, des analyses génétiques sont réalisées sur ces derniers mais également sur les populations sauvages et d'élevage pour comparer leur **ADN*** entre eux et pouvoir les apparenter.

Les collecteurs expérimentaux sont des collecteurs identiques à ceux utilisés pour la perliculture. Ils sont posés sur des zones d'intérêt pendant 6 semaines et plusieurs fois dans l'année. Ils sont ensuite récupérés puis le nombre de naissains sur les collecteurs est compté. Les résultats obtenus sont par la suite comparés à ceux des modèles de dispersion larvaire.

Restockage et gestion

L'étude des classes de taille des populations d'huîtres sauvages et d'élevage ont montré une plus forte proportion de femelles chez les sauvages et de mâles pour celles en élevage. Ceci ne favorise pas la reproduction des nacres.

Pour pallier la différence de taille observée entre les huîtres sauvages et d'élevage, une des solutions serait de réaliser un restockage des huîtres. Ce dernier consiste en l'introduction dans le milieu naturel de nacres.

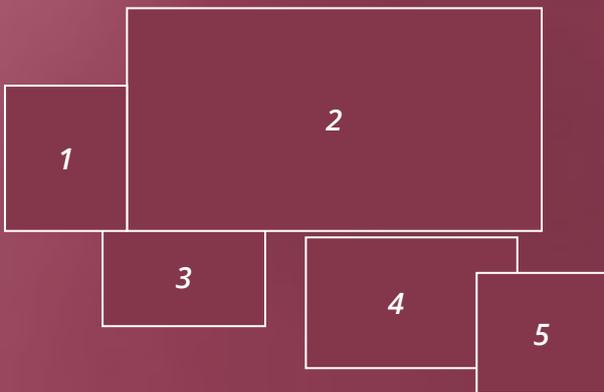


Photo 1 - Perles noires et nacre albinos.

Photo 2 - Fermes à Mangareva.

Photo 3 - Un karena parmi les plus de 1600 que compte Raroia.

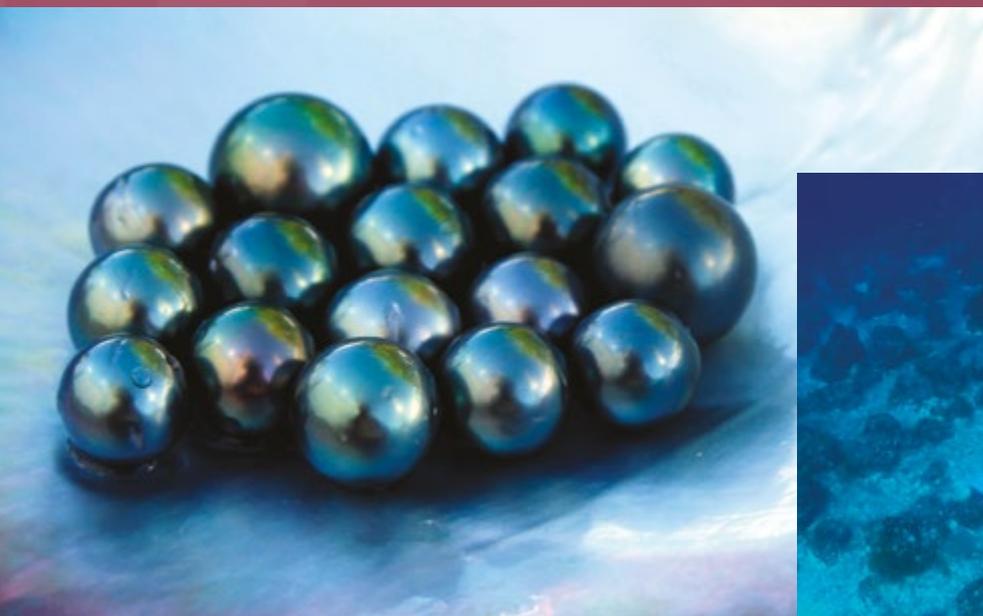
Photo 4 - Perles issues du lagon de Raroia.

Photo 5 - Survol du fond du lagon de Raroia dans la zone des trente mètres de profondeur.





SYNTHÈSE



→ SYNTHÈSE DES FACTEURS AFFECTANT LE COLLECTAGE



Les conditions hydroclimatiques du lagon

Les conditions hydroclimatiques regroupent les facteurs climatiques et ceux qui influent sur la circulation de l'eau dans les lagons. Ces conditions varient selon la saison (été ou hiver austral) mais aussi selon l'année. En Polynésie française, l'oscillation australe El Niño (ENSO) engendre de fortes variations interannuelles.

Les facteurs qui influent sur la circulation des eaux sont les régimes de vagues et de vents, et la géomorphologie des couronnes d'atolls, qui ensemble contrôlent le degré d'ouverture à l'océan. Cet ensemble explique les différences de conditions environnementales observées au sein d'un lagon mais aussi entre différents atolls. Le temps de renouvellement des eaux mais aussi les fonctions biologiques du lagon dépendent de ces facteurs.

Le vent est le principal facteur intervenant dans la circulation des eaux du lagon puisqu'il entraîne un mouvement des masses d'eau, notamment pour les atolls semi-fermés à fermés. Les régimes de houles océaniques vont permettre, selon le degré d'ouverture des atolls à l'océan, une entrée d'eau plus ou moins importante dans le lagon ce qui a pour résultat d'influer aussi sur la circulation des eaux lagunaires.

Ces éléments impactent donc la dispersion des larves d'huîtres perlières mais aussi la disponibilité en nourriture (plancton*).

La température est un facteur important qui a une influence sur les processus physiologiques* des huîtres perlières tels que la maturation sexuelle et les périodes de pontes mais elle joue aussi sur la qualité de la perle puisque par exemple le lustre s'altère si les températures sont supérieures à 30°C. De plus, la croissance des huîtres est optimale dans une gamme de températures et des températures trop élevées peuvent entraîner des événements de mortalité. La durée de la phase larvaire est également dépendante de la température mais aussi de la disponibilité en nourriture.

Tous les éléments présentés ci-dessus sont liés entre eux et ont une influence sur le succès du collectage (figure 1).

Biologie des huîtres perlières

Le succès du collectage dépend non seulement des conditions hydroclimatiques du lagon mais aussi de la biologie des huîtres perlières.

La quantité de gamètes* libérés dans le milieu et donc de larves obtenues à chaque ponte dépend du nombre d'huîtres sauvages et en élevage ainsi que de leur maturité sexuelle. Le succès de la reproduction dépend également du sex-ratio de la population. Pour cela, il est important de connaître la structure de taille de ces populations puisque la taille des huîtres est liée à leur âge et donc à leur sexe, bien que cette relation soit parfois dépendante de l'atoll et des secteurs du lagon. Après la ponte, ce sont principalement les conditions hydroclimatiques qui vont influencer sur la rencontre entre gamètes, la dispersion des larves, la durée de cette phase et la croissance des huîtres (du stade larvaire au stade adulte).

La disponibilité en nourriture est aussi un élément clé pour la durée de la phase larvaire et la croissance de *P. margaritifera*. Il est important de connaître les groupes de plancton présents puisque ce ne sont pas toutes les espèces qui sont ingérables par l'huître. En effet, le nanoplancton et le microplancton (supérieurs à 0,002 mm, équivaut à 2 µm) sont majoritairement consommés par *P. margaritifera* mais d'autres sources de nourriture, généralement moins abondantes, sont possibles. Enfin, la présence d'autres organismes marins qui sont prédateurs des larves ou compétiteurs des huîtres peut influencer sur la survie des larves.

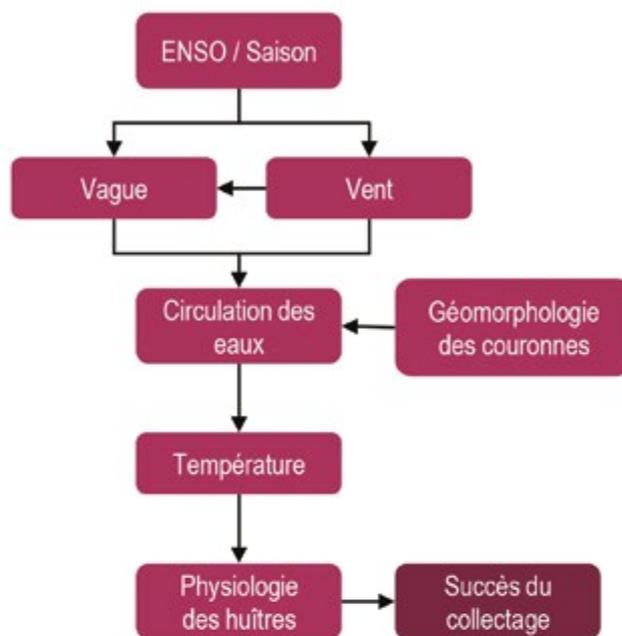


Figure 1. Relation entre les différents facteurs influant sur le succès du collectage des huîtres perlières.



Positionnement des collecteurs

Le dernier facteur qui influe sur le succès du collectage des naissains d'huîtres perlières est l'emplacement des collecteurs. Comme expliqué précédemment, les conditions environnementales peuvent varier dans un même lagon et entre atolls mais aussi selon les saisons et l'année. Ainsi, en fonction des conditions hydroclimatiques, les larves s'accumuleront dans des secteurs qui ne sont pas forcément les mêmes d'une année sur l'autre, le taux de croissance et le taux de survie seront également variables d'une année sur l'autre ou d'une zone à une autre.

Il est ainsi difficile de prédire les zones à fort collectage à partir des expériences précédentes puisqu'elles sont dépendantes des conditions hydroclimatiques du moment dans le lagon et de la biologie des huîtres perlières.

Synthèse des facteurs et mesures nécessaires pour la modélisation

La figure 2, présentée ci-dessous, est une synthèse des facteurs et processus intervenant dans le succès du collectage et qu'il faudrait continuer à étudier sur différents sites.

Pour estimer le potentiel reproducteur d'un lagon, un inventaire du stock d'huîtres en élevage et dans le milieu naturel ainsi qu'un suivi de la reproduction sont nécessaires.

Les larves obtenues croissent selon la quantité de nourriture disponible, estimée à partir des concentrations en chlorophylle a du milieu. Les larves se dispersent ensuite dans le lagon en fonction de l'*hydrodynamique** du lagon qui est lui, dépendant de nombreux facteurs (climat, *bathymétrie**, géomorphologie, etc.).

A la fin de leur croissance, les larves survivantes se fixent là où les courants les ont emportées, soit sur des substrats durs soit sur des collecteurs. Peu de données sur les collecteurs des professionnels sont disponibles et des collecteurs expérimentaux sont parfois utilisés pour mesurer le taux de fixation des larves. Cependant, les données sur des vrais collecteurs permettraient d'obtenir une plus grande base de données, d'améliorer la compréhension des processus et de valider les *modèles**.

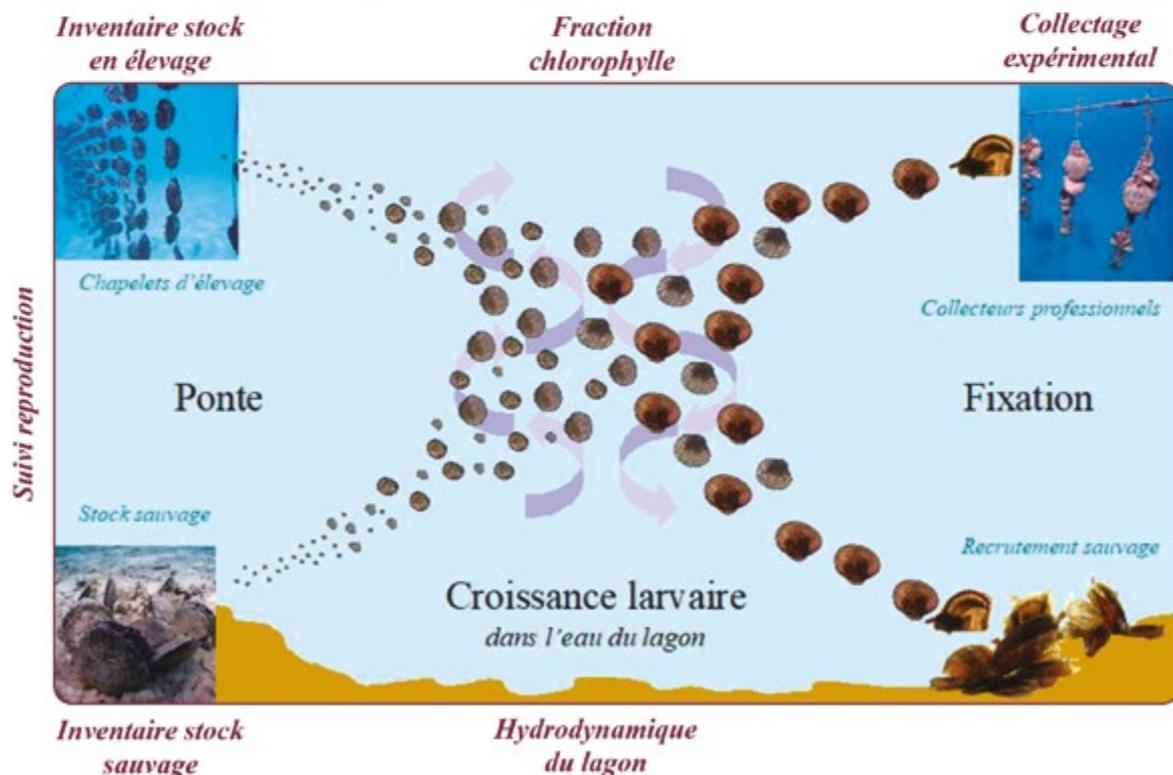


Figure 2. Processus et facteurs influant sur le succès du collectage. Les méthodes utilisées pour la collecte des données apparaissent en italique à côté des éléments, en bleu ou noir, qu'elles permettent de suivre.

➔ CE QU'IL FAUT RETENIR !



- L'oscillation australe El Niño est le principal phénomène à l'origine des variations interannuelles du climat. Elle entraîne des changements dans les régimes de vents, de houles mais aussi des températures.
- Les principaux facteurs responsables de la circulation dans les lagons d'îles et d'atolls pericolas sont la géomorphologie des couronnes et la **bathymétrie***, et en tant que facteurs externes la marée, les régimes de vents et les régimes de vagues. Ces paramètres sont liés et influent tous sur l'**hydrodynamique*** des lagons et donc sur la température.
- Les régimes de houles, de vagues et la géomorphologie des atolls ont été caractérisés de manière systématique, et la bathymétrie précise de plusieurs atolls (Ahe, Takaroa, Raroia, Takume, Takapoto, Gambier, etc.) est disponible.
- Les paramètres hydrodynamiques varient selon l'atoll mais aussi au sein d'un lagon, qui n'est jamais complètement homogène. Les conditions environnementales (température, etc.) sont donc variables entre atolls et au sein d'un lagon. Celles-ci expliquent en partie les différences de dynamique des stocks d'huîtres perlières sauvages (reproduction, mortalité, etc.) et de succès du collectage observé. Elles expliquent aussi l'occurrence d'évènements de mortalité massive.
- Les structures de taille des populations d'huîtres en élevage et sauvages sont différentes. Les huîtres en élevage sont plus petites et sont donc principalement des mâles tandis que les sauvages sont plus grandes et comportent donc plus de femelles.
- La **densité*** des stocks sauvages est plus importante entre la surface et 10 mètres de profondeur sur les sites étudiés depuis 2013 (Ahe, Takaroa, Raroia, Takapoto), contrairement aux observations des années 1990.
- Le restockage d'huîtres perlières dans le lagon semble être une mesure nécessaire pour optimiser le sex-ratio de la population globale du lagon (sauvage et élevage), augmenter le potentiel reproductif, et améliorer le collectage.
- L'influence de la température et du niveau de nourriture (représenté par la concentration en chlorophylle) sur la croissance des *Pinctada margaritifera*, la durée de vie larvaire ou le nombre de pontes annuelles possibles a été quantifié, ce qui permet aussi un premier cadrage théorique du potentiel de collectage d'un atoll une fois le stock d'huîtres connu.
- La dispersion des larves d'huîtres perlières issues des pontes du stock sauvage ou en élevage dépend de la circulation de l'eau dans le lagon et de la localisation des stocks. La dispersion des larves a été modélisée pour 3 atolls (Ahe, Takaroa, Raroia) pour chacun des régimes de vents identifiés. Le même travail est en cours sur Mangareva. Les mesures physiques disponibles informent déjà sur le fonctionnement de la zone de collectage de Rikitea en saison chaude.
- La dispersion des larves, qui affecte le potentiel de collectage de naissains d'huîtres perlières, est fortement dépendante de nombreux facteurs dont les conditions hydrodynamiques du lagon et les processus biologiques des huîtres (ponte, survie des larves). Les paramètres biologiques (maturité des huîtres, nourriture dans le lagon, etc.) sont les plus difficiles à connaître, et à mesurer sur le terrain. Les conditions physiques du milieu (courant, température, etc.) sont, elles, plus facilement appréhendables grâce à la pose de nombreux instruments automatiques pendant plusieurs mois.
- La principale limitation à une prédiction fiable du collectage est l'impossibilité de connaître à tout moment le statut biologique du lagon et des populations d'huîtres.
- Le partage par les periculteurs des informations de rendement du collectage permettrait d'améliorer les **modèles*** mis au point pendant le projet.



CRÉDITS :

Les données scientifiques utilisées dans les figures sont issues du projet MANA et ses participants, sauf indications ci-dessous. Quand une publication existe sur le sujet elle est indiquée dans les références. Toutes photographies de terrain © Serge Andréfouët, IRD, sauf indications ci-dessous.

HYDRODYNAMIQUE DES LAGONS

- Fiche Température. Figure 1 : ©Seabird ; Figures 3 et 4 : d'après Van Wynsberge et al. (2020).
- Fiche Régimes de vent. Figure 3 : d'après Dutheil et al. (2020).
- Fiche Régimes de vagues. Figures 2 et 3 : d'après Dutheil et al. (2021) ; Figure 4 : d'après Aucan et al. (2021).
- Fiche Géomorphologie. Figures 1 et 2 : Images Landsat, © USGS/NASA.
- Fiche Bathymétrie. Figure 1 : Christian Friot/Géopolynésie ; Figure 2 : d'après Andréfouët et al. (2020).

BIOLOGIE DES HŪÎTRES PERLIÈRES

- Fiche Nourriture des huîtres. Figure 2 : Livret restitution projet FED Professionnalisation et Pérennisation de la perliculture (DRM 2011).
- Fiche Croissance et ponte. Figure 1 : Océane Bionaz/IRD ; Figure 2 : d'après Thomas (2009).
- Fiche Les événements connus de mortalité. Figure 2 : d'après Andréfouët et al. (2015).
- Fiche Dispersion larvaire. Figure 2 : d'après Linard (2010).

APPLICATIONS

- Fiche Comment valider les calculs. Figure 1 : d'après Thomas et al. (2012) ; Figure 2: d'après Andréfouët et al. (2021).

RÉFÉRENCES :

- Andréfouët, S., Dutheil, C., Menkes, C.E., Bador, M., Lengaigne, M., 2015.** Mass mortality events in atoll lagoons: environmental control and increased future vulnerability. *Global Change Biology* 21, 195–205.
- Andréfouët, S., Genthon, P., Pelletier, B., Le Gendre, R., Friot, C., Smith, R., Liao, V., 2020.** The lagoon geomorphology of pearl farming atolls in the Central Pacific Ocean revisited using detailed bathymetry data. *Marine Pollution Bulletin* 160, 111580. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111580>
- Andréfouët, S., Le Gendre, R., Thomas, Y., Lo-Yat, A., Reisser, C.M.O., 2021.** Understanding connectivity of pearl oyster populations within Tuamotu atoll semi-closed lagoons: Cumulative insight from genetics and biophysical modelling approaches. *Marine Pollution Bulletin* 167, 112324. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112324>
- Aucan, J., Desclaux, T., Le Gendre, R., Liao, V., Andréfouët, S., 2021.** Tide and wave driven flow across the rim reef of the atoll of Raroia (Tuamotu, French Polynesia). *Marine Pollution Bulletin* 171, 112718. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112718>
- Dutheil, C., Andréfouët, S., Jullien, S., Le Gendre, R., Aucan, J., Menkes, C., 2020.** Characterization of south central Pacific Ocean wind regimes in present and future climate for pearl farming application. *Marine Pollution Bulletin* 160, 111584. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111584>
- Dutheil, C., Jullien, S., Aucan, J., Menkes, C., Le Gendre, R., Andréfouët, S., 2021.** The wave regimes of the Central Pacific Ocean with a focus on pearl farming atolls. *Marine Pollution Bulletin* 162, 111751. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111751>
- Linard, C. 2010.** Écophysiologie et dynamique de la croissance coquillière de l'huître perlière, *Pinctada margaritifera* (L.) : analyses moléculaires et microstructurales. Thèse IFREMER , 185 p.
- Thomas, Y., 2009.** Ecologie larvaire de l'huître perlière (*Pinctada margaritifera*, L.), croissance et dispersion dans un lagon d'atoll polynésien. Thèse IFREMER , 188 p.
- Thomas, Y., Garen, P., Bennett, A., Le Penec, M., Clavier, J., 2012.** Multi-scale distribution and dynamics of bivalve larvae in a deep atoll lagoon (Ahe, French Polynesia). *Marine Pollution Bulletin* 65, 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.12.028>
- Van Wynsberge, S., Le Gendre, R., Sangare, N., Aucan, J., Menkes, C., Liao, V., Andréfouët, S., 2020.** Monitoring pearl farming lagoon temperature with global high resolution satellite-derived products: An evaluation using Raroia Atoll, French Polynesia. *Marine Pollution Bulletin* 160, 111576. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111576>



Fare Ute - Immeuble Le Caill - 2^e étage
B.P. 20 - 98713 Papeete, Tahiti, Polynésie française
Tél. : **(689) 40 50 25 50** - Fax : **(689) 40 43 49 79**
Email : drm@drm.gov.pf
www.ressources-marines.gov.pf
 [ressources marines](https://www.facebook.com/ressourcesmarines)



Plus d'infos, scannez le QR Code