

# Usages des épaves immergées transformées en récif artificiel

DU Restauration écologique des petits fonds marins côtiers

2023



Préparé par Pierre Andrieux

Tutoré par Pierre Boissery



UNIVERSITÉ  
DE MONTPELLIER



## **Remerciements :**

**Pierre Boissery,**

**Julie Deter,**

**Phillipe Lenfant,**

**Gilles Saragoni,**

**Alexis Rosenfeld,**

**Gregory Asnica et Marjorie Pierard,**

**L'université de Montpellier et l'université de Perpignan**

## Résumé :

L'état de santé actuel de nos océans est assez critique. Heureusement, depuis plusieurs années maintenant, des équipes de chercheurs mettent au point différentes techniques pour préserver nos océans. Parmi elles, la restauration écologique est un moyen efficace quand les protocoles sont bien respectés. Je me suis penché sur l'usage des épaves immergées transformées en récif artificiel. A travers plusieurs études scientifiques, deux usages majeurs en sont sortis. Le premier est l'usage écologique : les épaves, par leurs spécificités, forment des récifs artificiels efficaces. Les épaves fournissent un habitat viable pour la vie marine (Wantiez & Thollot, 2000). Un peu plus d'un an après le sabordage du navire Calédonie Toho II en Nouvelle Calédonie, près de 40 espèces y ont été recensées. L'autre avantage est celui de l'augmentation de la biodiversité. Sur cette même épave, à travers un calcul de la biomasse, des pics de près de 600g/m<sup>2</sup> ont été recensés (Wantiez & Thollot, 2000) ce qui surpasse un autre récif artificiel proche et même le récif naturel de référence, Ricaudy. L'autre usage majeur des épaves transformées en récif artificiel est l'usage économique, notamment celui de l'économie durable (Brock et al, 1994). Avec le sabordage d'un pétrolier de 53m, ils ont constaté une augmentation du nombre de touristes présents sur place avec l'achat d'un deuxième sous-marin d'une compagnie locale, avec un chiffre d'affaires porté à 8.05 millions de dollars. Pour ce qui est de la plongée scaphandre, le chiffre d'affaires sur cette première année était de 728 000 dollars. Du fait de sa capacité à fournir un habitat et d'augmenter la biodiversité avec des pics jusqu'à 2000g/m<sup>2</sup> de biomasse, les pêcheurs locaux ont vu leur chiffre d'affaires atteindre 58 840 dollars.

Malgré ces différents usages, les épaves immergées peuvent entraîner parfois des conséquences néfastes comme accueillir des espèces invasives, polluer le milieu ou encore altérer l'écosystème local. C'est pour cela que des études préalables sur le potentiel futur site doivent impérativement être réalisées.

## Sommaire :

<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
Contexte .....	1
Objectifs .....	2
<b>Usages écologiques .....</b>	<b>3</b>
Objectifs .....	3
Méthode d'analyse .....	4
Résultats .....	6
<b>Usages économiques .....</b>	<b>10</b>
Objectifs .....	10
Méthode d'analyse .....	10
Résultats .....	12
<b>Discussion .....</b>	<b>16</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>18</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>19</b>

## Table des figures et tableaux :

- Figure 1: Emplacement de la zone d'étude (Laurent Wantier et Pierre Thollot, 2000)
- Tableau 1: Calendrier d'échantillonnage de la Calédonie Toho 2, des Caissons et du récif de Ricaudy. (Laurent Wantier et Pierre Thollot, 2000)
- Figure 2 : Variations temporelles de la richesse des espèces de poissons sur Caledonie Toho 2, Caissons et le récif de Ricaudy. (Laurent Wantier et Pierre Thollot, 2000)
- Figure 3: Variations temporelles de la densité des poissons sur Caledonie Toho 2, Caissons et Récif de Ricaudy. (Laurent Wantier et Pierre Thollot, 2000)
- Figure 4: Variations temporelles de la biomasse des poissons sur Caledonie Toho 2, Caissons et Récif de Ricaudy. (Laurent Wantier et Pierre Thollot, 2000)
- Figure 5: Graphique de la biomasse estimée des poissons de septembre 1989 à janvier 1991 sur le navire de 53 m déployé dans le cadre du récif artificiel Atlantis à environ 1,4 km au large de Waikiki, Oahu à 24-30 m de profondeur. (Brock et al. 1994)
- Tableau 2: Résumé des observations sur les prises et l'effort de pêche sur le site du récif artificiel Atlantis, Waikiki, Oahu (Brock et al. 1994)

## Introduction :

### Contexte :

Les océans sont d'une importance vitale pour notre planète, couvrant plus de 70% de sa surface et abritant une grande variété de formes de vie. Cependant, les activités humaines ont eu un impact considérable sur leur état actuel. Voici quelques-uns des problèmes les plus urgents :

→ La surpêche : Les pratiques de pêche non durables ont épuisé de nombreuses populations de poissons et menacent l'équilibre des écosystèmes marins.

→ La pollution : Les déchets plastiques, les produits chimiques, les déchets toxiques et les eaux usées sont déversés dans les océans, provoquant des dommages à la vie marine et à l'environnement.

→ Le changement climatique : Les émissions de gaz à effet de serre causées par les activités humaines ont entraîné une acidification des océans, une augmentation de la température de l'eau et une montée du niveau de la mer, qui menacent la vie marine et les communautés côtières.

→ La destruction des habitats : Les écosystèmes côtiers et marins, tels que les récifs coralliens, herbiers et mangroves, sont menacés par la destruction due à l'urbanisation et aux activités humaines.

Les océans sont extrêmement importants pour la vie sur Terre pour plusieurs raisons :

- Régulation du climat : selon une étude menée par une équipe internationale, dirigée par Nicolas Grüber de l'ETH Zurich, les océans absorbent environ un quart des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) produites par les activités humaines. Ils jouent donc un rôle crucial dans la régulation du climat et de la température globale.
- Production d'oxygène : Les océans produisent environ la moitié de l'oxygène de la planète. Les micro-organismes marins, tels que les phytoplanctons, sont responsables de cette production d'oxygène.
- Biodiversité : Les océans abritent une grande variété de formes de vie, y compris des espèces qui ne se trouvent nulle part ailleurs sur Terre. La biodiversité marine est essentielle pour la survie de la vie sur Terre, car elle fournit de la nourriture, de l'oxygène et des médicaments.
- Ressources économiques : Les océans sont une source importante de nourriture, d'énergie, de minéraux et de matières premières pour les industries.
- Loisirs et tourisme : Les océans offrent des possibilités de loisirs et de tourisme, telles que la baignade, la plongée sous-marine, la navigation de plaisance et la pêche sportive.

Il est donc crucial de prendre des mesures pour préserver la santé de nos océans, comme la mise en place de pratiques de pêche durables, la réduction de la pollution et des émissions de gaz à effet de serre, la protection ainsi que dans certains cas, la restauration écologique des écosystèmes marins.

La restauration écologique des fonds marins est une pratique qui vise à rétablir et à améliorer les écosystèmes marins dégradés ou endommagés.

La restauration écologique des fonds marins peut prendre plusieurs formes, selon les objectifs spécifiques de chaque projet. Certaines méthodes courantes de restauration des fonds marins incluent :

1. La transplantation d'organismes : Cette méthode consiste à prélever des organismes vivants sains d'une zone non endommagée et à les transplanter dans la zone endommagée pour aider à restaurer l'écosystème. Les organismes peuvent être des plantes marines, des coraux, des moules ou des huîtres, entre autres.
2. La réhabilitation des habitats côtiers : La réhabilitation des habitats côtiers implique la restauration des zones de mangrove, des marais salants et des herbiers marins qui ont été dégradés ou détruits. Ces écosystèmes côtiers sont importants pour de nombreux organismes marins et fournissent également des avantages écologiques tels que la prévention de l'érosion côtière et la régulation de la qualité de l'eau.
3. La dépollution des zones marines : La dépollution des zones marines implique la restauration de zones polluées par des contaminants tels que les produits chimiques, les métaux lourds et les déchets. Cette méthode peut inclure la suppression des sources de pollution, la remédiation des sols et la restauration des habitats affectés.
4. La création de récifs artificiels : Les récifs artificiels sont des structures construites pour imiter les caractéristiques des récifs naturels et fournir un habitat pour les organismes marins. Les récifs artificiels peuvent être créés à partir de matériaux naturels tels que des roches ou des coquilles, ou de matériaux artificiels tels que des blocs de béton ou encore, des épaves.

## Objectifs :

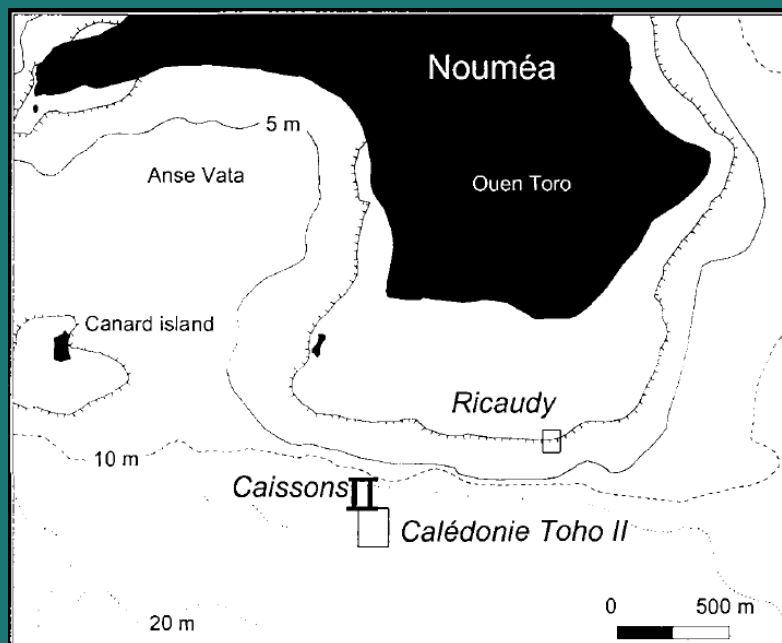
Les épaves peuvent en effet être une solution de restauration écologique marine, mais cela dépend des circonstances et des objectifs de conservation spécifiques. Voici quelques points à considérer que nous allons étudier dans ce rapport à travers des études de cas :

Nous allons démontrer les usages écologiques à travers des épaves immergées transformées en récif artificiel :

- Habitat pour la vie marine : les épaves peuvent fournir un habitat pour les poissons, les crustacés et autres organismes marins, en créant des zones de refuge, de nourriture et de reproduction.
- Augmentation de la biodiversité : les épaves peuvent encourager la croissance de communautés écologiques complexes et diversifiées, qui peuvent souvent être plus riches en espèces que les habitats naturels voisins.
- Potentiel économique : les épaves peuvent être des sites attractifs pour la plongée et le tourisme, en offrant aux visiteurs la possibilité de découvrir la vie marine et l'histoire locale. De même, par leur forte concentration en poissons, les épaves attirent les pêcheurs.

## Usages écologiques

Les épaves transformées en récifs artificiels jouent un rôle crucial en tant qu'habitats pour la vie marine, comme le démontrent plusieurs publications scientifiques. Ces structures immergées fournissent des abris et des substrats adaptés à la colonisation par une grande diversité d'espèces marines. Des études ont révélé que les épaves artificielles favorisent la formation de communautés biologiques riches et complexes comparé à d'autres types de récifs artificiels ou même d'autres récifs naturels, offrant alors, un refuge pour les poissons, les coraux, les crustacés et de nombreux autres organismes marins. Une étude publiée dans l'Atoll Research Bulletin nommé « *Colonisation de l'épave du F/V Caledonie TOHO 2 par un assemblage de poissons près de Nouméa (Nouvelle Calédonie)* » par Laurent Wantiez et Pierre Thollot a montré que les épaves immergées dans les eaux tropicales attirent une abondance de poissons et d'invertébrés, contribuant à augmenter la biodiversité locale. C'est de par mon intérêt pour la localisation que j'ai choisi cette étude.



**Figure 1: Emplacement de la zone d'étude**

### Objectifs :

Après le sabordage du navire, le Service de la Mer de la Province Sud finance une étude scientifique afin d'étudier la colonisation de l'épave par un assemblage de poissons. Les différentes étapes du processus de colonisation et l'identification des changements écologiques ont été analysées. La similitude des espèces sur un récif artificiel voisin (Caissons) et le récif naturel le plus proche (Ricaudy) a été évaluée. Cette étude de la colonisation par un assemblage de poissons contribue à la compréhension du débat attraction-produit ionique. La proximité des Caissons a permis de quantifier les interactions entre le nouveau récif artificiel et les communautés environnantes. De plus, la plupart des récifs artificiels étudiés sont des roches de carrière, des blocs de béton, de vieux pneus et des plates-formes de production de pétrole, mais les épaves ont rarement été étudiées.



## Méthode d'analyse :

Le F/V Caledonie Toho 2 (CT2) était un palangrier japonais (longueur 44,7 m, largeur 7,6 m et hauteur 15 m y compris les ouvrages supérieurs) de 121 tonnes de charge (une tonne de charge représente un poids de 1 000 kg et un volume de 1 m<sup>3</sup>). Le navire a été coulé le 9 août 1996 près de Nouméa (Fig. 1). Il repose sur tribord, à une hauteur comprise entre 20 et 23 m, sur un substrat de sable boueux avec peu d'organismes épibenthiques : les alcyonaires (*Spongodes merleti*); holothuries (*Actinopyga echinites*); et les étoiles de mer (*Protoreaster nodosus*). Quelques bioclastes, colonisés par des éponges, des hydroïdes, des nudibranches ou des étoiles à plumes (*Himerometra robustipinna*), sont présents sur le fond marin. Ce type de biotope a été identifié comme des « fonds envasés sous influence terrigène » par Richer de Forges et al. (1987). La visibilité variait entre 5 et 10 m et les principaux courants étaient dirigés de la coque au pont. Par conséquent, les courants étaient faibles sur le côté du pont du bateau. À la fin de l'étude, le CT2 était colonisé par 22 taxons benthiques (des éponges, des coraux, des anthozoaires, des mollusques, des crustacés, des échinodermes et des ascidies). Les Caissons sont constitués d'un assemblage (19 x 19 m, hauteur maximale de la pile 6 m) de 30 boîtes de pont flottant en fer US Marine (2 m de côté) coulées entre 1942 et 1945. Ils sont situés entre 17 et 20 m de profondeur dans le même biotope que le CT2 (Fig. 1). La boîte la plus proche est située à 7 m de la tige de l'épave. Les boîtes, coulées il y a plus de 50 ans, sont fortement corrodées et colonisées par 29 flores et faunes benthiques typiques des fonds durs (algues, éponges, coraux, alcyonaires, anthozoaires, mollusques, crustacés, échinodermes et ascidies).

La formation récifale naturelle la plus proche, le récif frangeant de Ricaudy (Fig. 1), à 280 m du CT2 et entre 1 et 3 m de profondeur, est caractérisée par une pente extérieure plus large avec des coraux vivants, principalement ramifiés *Acropora* spp., *Pocillopora* spp., Poritidae et Favidae. Le platier récifal est caractérisé par des gravats dans les parties supérieures et des lits d'algues (*Sargassum* sp. et *Turbinaria ornata*) dans les parties plus profondes. Ce récif a été utilisé comme station de référence. (Lenfant et al. 2015).

**Recensement des poissons :** les colonies de poissons des trois sites (CT2, Caissons et Ricaudy) ont été régulièrement échantillonnées au cours des 13 mois suivants le sabordage du bateau (tableau 1). La fréquence d'échantillonnage était plus élevée au début de l'enquête afin d'identifier avec précision la colonisation initiale des poissons. Les stations ont été échantillonnées une fois par semaine au cours des deux premiers mois, une fois toutes les deux semaines au cours des deux mois suivants et une fois par mois au cours des neuf derniers mois. La fréquence a été occasionnellement modifiée en raison de mauvaises conditions météorologiques (ouragan, dépression tropicale), principalement pour Ricaudy car cette station est inaccessible par vent fort. Malheureusement, la communauté de poissons de Caissons n'a pas été recensée avant l'explosion du CT2 parce que l'enquête a été financée après le sabordage. Cependant, des observations qualitatives et semi-quantitatives ont été faites par Chauvet sur l'effet de l'explosion sur la communauté de poissons des Caissons. Ces observations ont été faites à la surface de la mer et sur le fond marin juste après l'explosion.

Les colonies de poissons du CT2 et des caissons ont été recensés par dénombrement visuel (la durée de chaque recensement variait de 45 à 60 minutes). Tous les poissons situés à l'intérieur des structures et dans un périmètre de 5 m autour des récifs artificiels ont été identifiés et comptés par deux plongeurs, chaque plongeur échantillonnant différentes

familles de poissons. Les plongeurs ont estimé la longueur des poissons. Les poids des poissons ont été calculés à partir des relations longueur-poids (Kulbicki et al., 1993 ; 1994). Les surfaces échantillonnées étaient de 1 067 m<sup>2</sup> pour le CT2 et de 856 m<sup>2</sup> pour les Caissons.

**Tableau 1: Calendrier d'échantillonnage du Calédonie Toho 2, des Caissons et du récif de Ricaudy.**

Date	N°	Days	Calédonie Toho 2	Caissons	Ricaudy
20 08 1996	1	11	x	x	x
26 08 1996	2	17	x	x	-
02 09 1996	3	24	x	x	x
09 09 1996	4	31	x	x	-
17 09 1996	5	39	x	x	-
01 10 1996	6	53	x	x	x
15 10 1996	7	67	x	x	x
28 10 1996	8	80	x	x	x
26 11 1996	9	109	x	x	x
09 12 1996	10	122	x	x	x
18 02 1997	11	182	x	x	x
18 03 1997	12	210	x	x	-
11 04 1997	13	234	x	x	x
16 05 1997	14	269	x	x	-
09 06 1997	15	293	x	x	x
18 07 1997	16	332	x	x	x
08 08 1997	17	353	x	x	x
11 09 1997	18	387	x	x	x

N° = sample number; Days = number of days after the scuttling of the *Calédonie Toho 2*; x = sampling completed; - = no sampling.

L'échantillonnage à distance (Burnham et coll., 1980 ; Buckland et al., 1993) a été utilisé pour échantillonner la communauté de poissons de Ricaudy. Un transect en ligne de 50 m a été posé sur le fond marin. Tous les poissons le long du transect ont été identifiés et comptés par les mêmes plongeurs qui ont échantillonné les récifs artificiels. Les poissons qui se trouvaient à plus de 10 m du transect n'ont pas été enregistrés.

Les plongeurs avaient une bonne connaissance de la faune piscicole et une formation préalable aux recensements visuels. Des travaux antérieurs montrent que les différences dans les estimations de longueur, de distance et de nombre sont probablement mineures (Wantiez et al., 1997 ; Kulbicki et Sarramegna, 1999).

**Analyse des données :** les densités de poissons et les biomasses sur le CT2 et les caissons ont été calculées en divisant le nombre et le poids des poissons par les superficies. Sur Ricaudy, les densités et la biomasse ont été calculées selon la méthode de la distance moyenne (Kulbicki et Sarramegna, 1999) :

$$De = (2L)^{-1} \sum_{i=1}^p n_i d_i^{-1} \text{ and } Bi = (2L)^{-1} \sum_{i=1}^p w_i d_i^{-1}$$

où De= densité (poisson/m<sup>2</sup>), L = longueur du transect (50 m), n<sub>i</sub> = abondance des espèces i, d<sub>i</sub> = distance moyenne de l'espèce i au transect (m), p = nombre d'espèces, Bi = biomasse (g /m<sup>2</sup>) et w<sub>i</sub> = poids de l'espèce i (g).

La distance moyenne de l'espèce i au transect est calculée de la manière suivante :

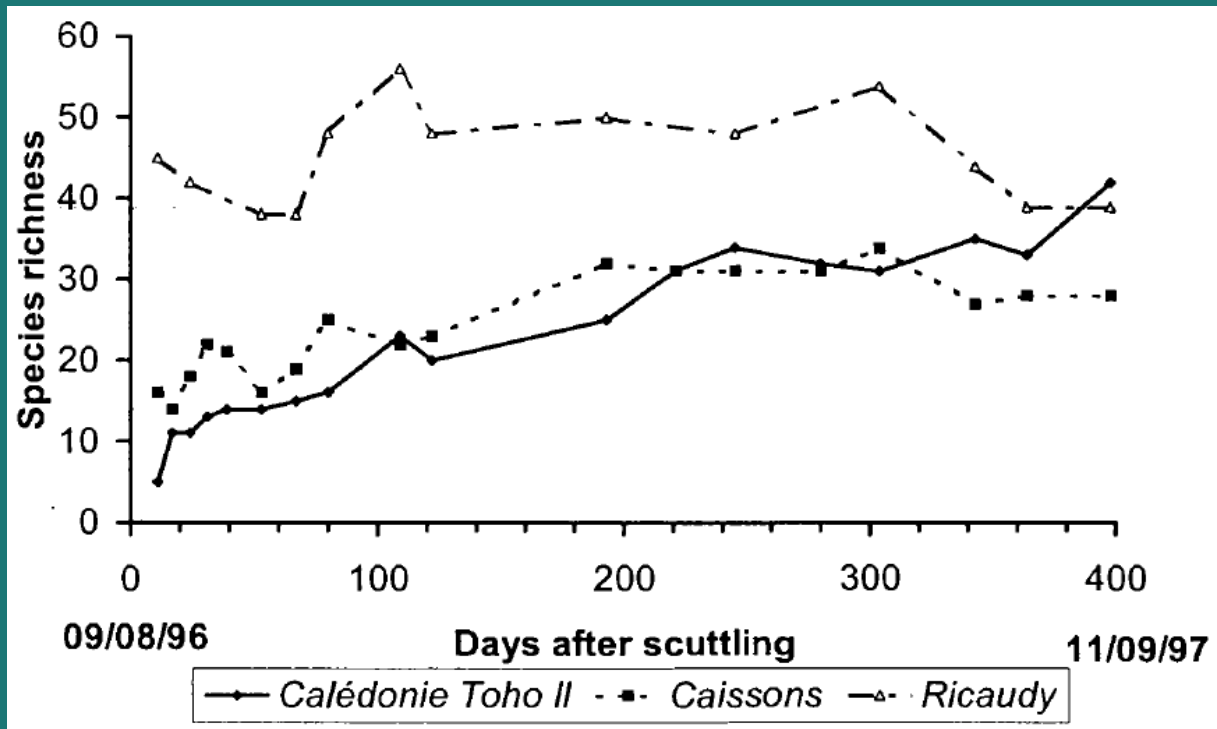
$$d_i = \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^{o_j} n_j d_j$$

où o<sub>j</sub> = nombre d'occurrences de l'espèce i, n<sub>j</sub> = nombre de poissons de l'espèce i observés à l'occurrence j, et d<sub>j</sub> = distance des poissons i au transect à l'occurrence j.

Ces estimations sont faciles à calculer et ont donné des valeurs très proches des meilleurs ajustements à l'aide d'algorithmes compliqués (Kulbicki et Sarramegna, 1999). L'analyse par correspondance (Legendre et Legendre, 1984) a été utilisée pour étudier les structures d'assemblage de poissons des trois sites et pour analyser la colonisation des poissons du CT2. Cette analyse a été effectuée sur la matrice de données de la densité de l'espèce. Aucune transformation des données n'a été nécessaire pour clarifier les projections des objets (échantillons) et des descripteurs (espèces) ou pour identifier les différentes structures et leurs assemblages d'espèces caractéristiques.

### Résultats :

Au total, 183 espèces de poissons ont été enregistrées au cours de cette enquête. Soixante-dix-huit espèces (29 familles) ont été recensées sur le CT2, les Carangidae (9 espèces), les Pomacentridae (9 espèces), les Apogonidae (8 espèces) et les Lutjanidae (8 espèces) étant les familles les plus diversifiées. Quarante-huit espèces (30 familles) ont été recensées sur les Caissons, les Pomacentridae (11 espèces), les Carangidae (10 espèces) et les Serranidae (9 espèces) étant les familles les plus diversifiées. Une centaine d'espèces (23 familles) ont été recensées sur Ricaudy, Labridae (20 espèces), Pomacentridae (19 espèces) et Chaetodontidae (15 espèces) étant les familles les plus diversifiées. Les espèces enrichisseuses sur le CT2 ont augmenté tout au long de l'étude (fig. 2) de 5 espèces, 11 jours après le sabordage, à un maximum de 42 espèces, 398 jours après le sabordage. La colonisation des espèces a été la plus importante au cours des 20 premiers jours, la première étape de colonisation impliquant des espèces pionnières. Après cela, la richesse des espèces a augmenté régulièrement pour atteindre un niveau de 31 à 35 espèces après 221 jours.

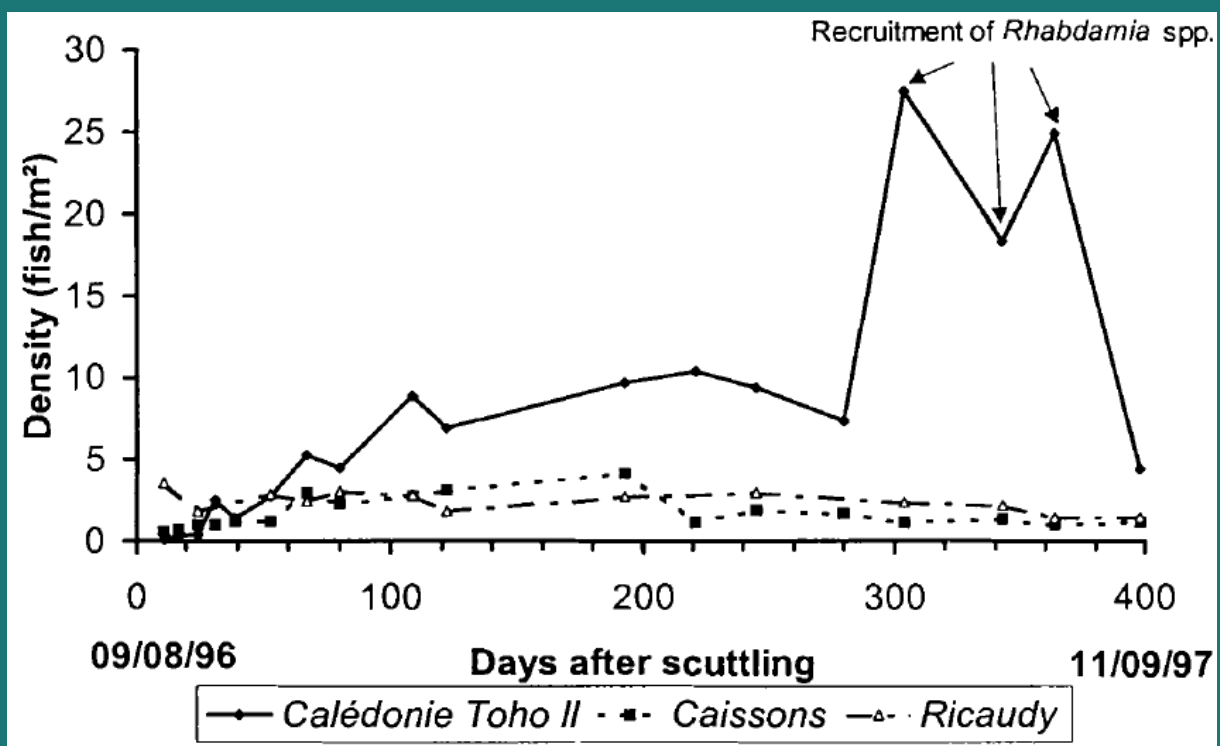


**Figure 2 :** Variations temporelles de la richesse des espèces de poissons sur le Caledonie Toho 2, Caissons et le récif de Ricaudy.

Une nouvelle phase d'augmentation a été observée lors de l'échantillonnage final. Ces espèces seront appelées espèces « secondaires ». Sur les caissons, la richesse en espèces a augmenté globalement au cours des 193 premiers jours, passant de 16 à 32 espèces (Fig. 2). Après cette phase de colonisation, la richesse en espèces est demeurée relativement stable, se situant entre 28 et 34 espèces pendant le reste du relevé. Les variations de la richesse en espèces sur le fond naturel (Ricaudy) étaient relativement faibles (figure 2). En moyenne, 45 espèces ont été enregistrées au cours de l'enquête. La richesse en espèces a été plus faible en hiver (40 espèces en moyenne), de septembre à octobre 1996 (11 à 67 jours après le sabordage) et de juillet à la mi-septembre 1997 (343 à 398 jours après le sabordage). La richesse en espèces était plus élevée au cours du reste de l'année (50 espèces en moyenne). Au cours de l'enquête, la richesse en espèces était significativement plus élevée sur Ricaudy que sur les deux récifs artificiels ( $\chi^2$  test de proportionnalité,  $P < 0,05$ ), les différences entre CT2 et Caissons n'étant pas significatives ( $\chi^2$  test de proportionnalité,  $P > 0,05$ ).

La densité des poissons a augmenté rapidement au cours des 109 premiers jours suivant le sabordage (Fig. 3). Cette augmentation est principalement due à l'établissement d'espèces planctivores (Clupeidae, Apogonidae et Pomacentridae) et à la migration d'espèces carnivores (Carangidae, Lutjanidae). Après cette augmentation, la densité est restée relativement stable (environ 8,15 poissons/m<sup>2</sup>), les pics exceptionnels se situant entre 304 et 364 jours après le sabordage. Ces valeurs élevées correspondaient au recrutement d'Apogonidae, Rhabdamia spp. La densité de ces espèces a diminué de façon spectaculaire dans le dernier échantillon en raison de la fin du recrutement et de la prédation. Les bancs de Carangidae se nourrissaient de petits poissons, qui s'aventuraient hors de leurs abris

(ouvrages supérieurs ou cales). Sur les Caissons, la densité a augmenté pendant 67 jours après le sabordage (Fig. 3) en raison du recrutement des mêmes petites espèces que sur le CT2 et de la présence des mêmes espèces de Carangidae. La densité est restée relativement stable entre 67 et 193 jours, puis a diminué à une moyenne de 1,32 poisson/m<sup>2</sup>. Ce deuxième niveau était dû à la fin du recrutement des Clupeidae (*Spratelloides* spp.) tandis que la prédation par les Carangidae persistait. Sur Ricaudy, la densité est restée relativement stable tout au long du relevé (Fig. 3), la population de poissons étant dominée par les juvéniles de poissons-perroquets (*Scarus* spp.) et les Pomacentridés adultes (*Abudefduf sexfasciatus*, *Pomacentrus molluccensis* et *Stegastes nigricans*). À la fin de l'enquête, la densité de poissons était la plus élevée sur le TC2 en raison de la présence de bancs d'Apogonidae et de juvéniles, tandis que les densités étaient comparables sur Caissons et Ricaudy (Fig. 3).

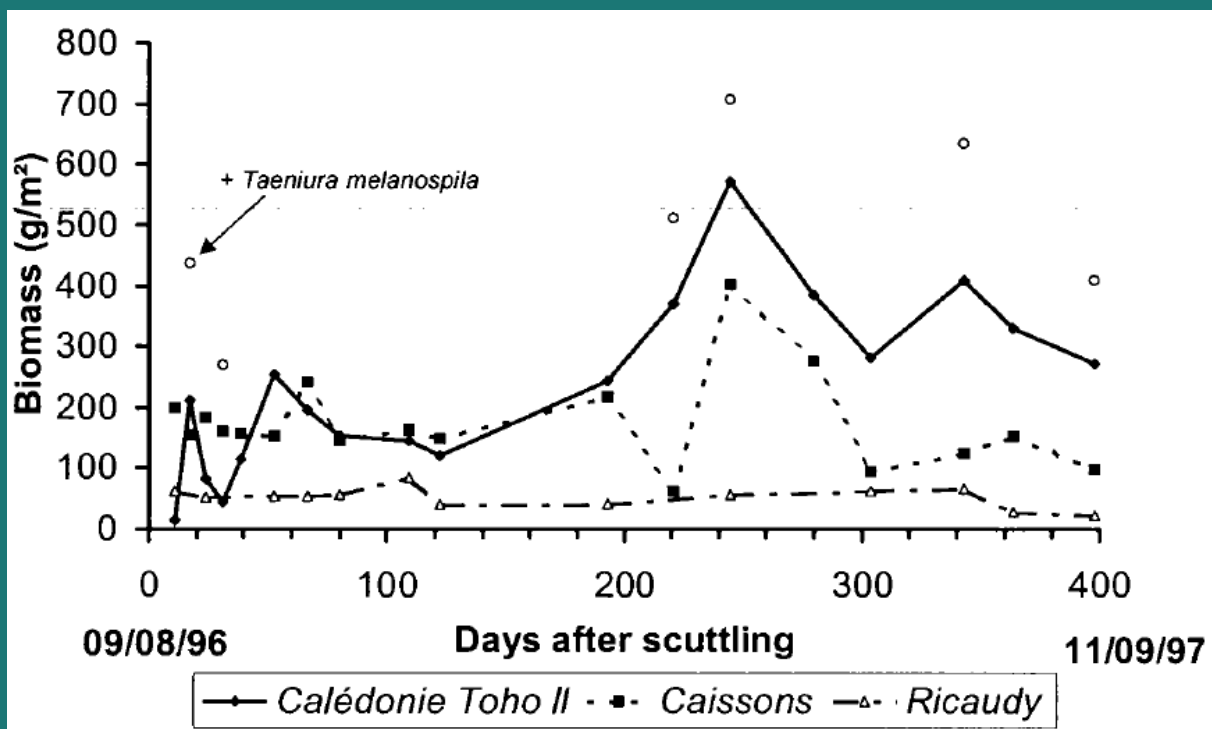


**Figure 3:** Variations temporelles de la densité des poissons sur Caledonie Toho 2, Caissons et Récif de Ricaudy.

La biomasse des poissons sur le CT2 a augmenté au cours des 53 jours suivant le sabordage (Fig. 4). Cette augmentation est principalement due à la migration de *Lutjanus russelli* depuis les Caissons. La biomasse s'est stabilisée à une moyenne de 153 g/m<sup>2</sup> entre 53 et 193 jours après le sabordage. Des variations importantes ont été observées après cette première phase de colonisation, en raison de la présence occasionnelle de Carangidae (Carangidae et *Carangoides dinema* non identifiés), de grands *Lutjanus argentimaculatus* et de Sphyraenidae (*Sphyraena flavicauda* et *Sphyraena jello*). A la fin de l'enquête, la biomasse atteignait en moyenne 336 g/m<sup>2</sup>. Les plus gros poissons enregistrés étaient des

raies (*Taeniura melanospila*) de plus de 200 kg et cinq mérous (*Epinephelus coioides*) de 0,5 kg à 13 kg, les premiers spécimens étant enregistrés 11 jours après le sabordage.

Sur les Caissons, la biomasse moyenne est restée relativement stable (174,3 g/m<sup>2</sup>) malgré des variations importantes (Fig. 4). À deux exceptions près (24 et 304 jours après le sabordage), un banc de *Lutjanus russelli* constituait plus de 45% de la biomasse totale. Les variations de la biomasse étaient principalement liées à la fluctuation de la taille de cette école. Sur Ricaudy, la biomasse est restée stable (52,2 g/m<sup>2</sup> en moyenne) au cours de l'enquête (Fig. 4). A la fin de l'enquête, la biomasse de poissons était plus élevée sur CT2 et plus faible sur Ricaudy.



**Figure 4:** Variations temporelles de la biomasse des poissons sur le Caledonie Toho 2, Caissons et Récif de Ricaudy.

Cette étude a montré que la richesse en espèces est plus élevée sur les récifs naturels que sur les récifs artificiels voisins en raison d'une plus grande complexité de l'habitat (Chou et al., 1992 ; Bohnsack et coll., 1994 ; Carr et Hixon, 1997; Chou, 1997; Pickering et Whitmarsh, 1997; Rooker et coll., 1997). À la fin de l'enquête, la richesse en espèces était plus élevée sur le CT2, coulé 13 mois auparavant, que sur les Caissons, coulés il y a plus de 50 ans. Ce résultat confirme que la diversité des espèces est liée à la taille et à la complexité structurelle du récif artificiel (Pickering et Witmarsh, 1997), qui sont plus importantes sur le CT2. La hauteur de la structure agit comme un stimulant visuel ou sonore ou une référence spatiale pour attirer les espèces migratrices (Pickering et Withmarsh, 1997). La complexité structurelle influence également la diversité des communautés en fournissant de nombreux abris avec des caractéristiques d'habitat différentes (lumière, crevasse, courant, etc.).

Les densités sont plus élevées sur les récifs artificiels que sur les récifs naturels (Chou et al., 1992 ; Bohnsack et coll., 1994 ; Pickering et Whitmarsh, 1997). Dans la présente étude, la densité était plus élevée sur le CT2 (plus grande structure) que sur les Caissons (plus petite structure) car les deux structures n'étaient pas du même type ainsi que sur le Récif de Ricaudy.

La biomasse est plus élevée sur les récifs artificiels que sur les récifs naturels, ce qui reflète l'attrait des prédateurs benthiques et pélagiques (Chou et al., 1992 ; Pickering et Whitmarsh, 1997; Rooker et coll., 1997). La biomasse la plus élevée sur la plus grande structure a également été signalée par Bohnsack et al. (1994).

Grâce à cette étude, nous avons pu démontrer que les épaves immergées transformées en récifs artificiels présentent des usages écologiques : constitution d'un habitat pour la vie marine et, de ce fait, augmentation de la biodiversité.

## Usages économiques

Actuellement, les récifs artificiels sont utilisés comme outil de gestion pour compenser la surpêche et la dégradation anthropique (Grove, 1982 ; Chou et coll., 1992 ; Bohnsack et al., 1997 ; Chou, 1997). Ils fournissent de nouveaux habitats aux juvéniles et aux adultes et contribuent à protéger les ressources si la pêche est restreinte autour du récif artificiel (Bohnsack, 1989 ; Chou, 1997 ; Grossman et coll., 1997).

Nous passerons en revue l'étude suivante publiée dans le bulletin de Science Marine : « *Au-delà de l'augmentation de la pêche, les récifs artificiels et l'écotourisme* » de Richard E. Brock et al, 1994 pour démontrer les usages économiques halieutiques et touristiques d'un récif artificiel basé sur une épave, une potentielle économie durable.

### Objectifs :

La question est de savoir si les récifs artificiels améliorent localement la production halieutique et touristique durable ou simplement les ressources agrégées déjà présentes dans la région d'Hawaï.

### Méthode d'analyse :

Le site du récif artificiel Atlantis Waikiki est situé à environ 1,4 km au large de Waikiki Beach, Oahu, Hawaï dans 24 à 36 m d'eau. Le site désigné de 1,85 ha (122 X 152 m) est situé sur un large platier calcaire en pente douce vers la mer (5 à 10°) entre 24 et 30 m de profondeur. Entre 30 et 36 m de profondeur, la zone est un platier de sable en pente douce vers la mer. En raison du faible développement de la communauté de poissons sur le site d'excursion de plongée (voir ci-dessous), Atlantis Sub-marines of Hawaii, L.P. voulait développer un habitat benthique supplémentaire (récif artificiel) pour améliorer l'abondance des ressources marines. Pour atteindre cet objectif, Atlantis Submarines a obtenu les permis fédéraux et étatiques nécessaires et a déployé des matériaux de recherche. Le développement du récif artificiel sur le site de plongée de Waikiki Atlantis a commencé avec le sabordage d'un pétrolier de 53 m le 26 juillet 1989. Avant le naufrage, ce navire a été débarrassé des matières toxiques (huile, graisse, etc.) et plus de 25 grands trous (taille maximale jusqu'à 1,2 X 2,5 m) ont été percés à travers la coque au-dessus de la ligne de flottaison ainsi que sur les ponts jusqu'à l'intérieur du navire pour améliorer

l'utilisation de l'espace d'abri, la circulation, la pénétration de la lumière et le mouvement des poissons à travers le navire. Au moment du déploiement, plus de 2 000 tonnes de gravier basaltique ont été ajoutées au navire pour assurer une stabilité accrue. Le navire a été déployé le long de l'interface entre les battures calcaires et de sable en mer dans l'eau de 29 à 32 m de profondeur.

Environ un mois plus tard, six récifs en béton de style japonais (chacun de 6 X 10 m, 4 m de haut) ont été déployés à environ 100 m de distance dans 31 m d'eau. Par la suite, quatre modules japonais en PRF (chacun de 7 x 7 x 4 m) ont été déployés en grappe et deux avions excédentaires (longueur 26 m, envergure 32 m) ont été placés à de plus grandes distances du navire. Le coût de la préparation de ce site pour Atlantis Submarines d'Hawaï, L.P. était d'environ 1 million de dollars.

Pour obtenir des informations sur la pêche du récif artificiel, une combinaison de recensements visuels sous-marins et d'observations sur place a été effectuée. Lors des recensements visuels, un plongeur équipé d'une ardoise et de crayon pénètre dans la zone de taille prédéterminée (étant ici la moitié de l'empreinte du navire ou environ 600 m<sup>2</sup>) et compte tous les poissons observés dans cette zone, en estimant la longueur des poissons individuels pour le calcul ultérieur de la culture sur pied à l'aide de techniques de régression linéaire (Ricker, 1975). Des coefficients de régression spécifiques à l'espèce ont été développés pour plus de 180 espèces de poissons de récif hawaïens sur la base de longueurs et de poids mesurés avec des tailles d'échantillon souvent supérieures à 100 individus par espèce. La méthode de recensement visuel utilisée ici suit Brock et al. (1979) et Brock et Norris (1989) et est une modification de Brock (1954). Malgré les nombreuses lacunes bien connues de la méthode de recensement visuel pour évaluer les poissons des récifs coralliens, elle reste l'une des meilleures techniques non destructives disponibles (Brock, 1982).

Des efforts ont été déployés pour suivre le succès des pêcheurs sur le site du récif artificiel Atlantis (le site d'étude primaire). Les données recueillies comprennent le temps passé à pêcher sur le site, le type d'engin utilisé et le nombre et la taille des poissons capturés sur le site. Des informations supplémentaires ont été recueillies à l'aide d'un télescope terrestre (à environ 4,8 km à une altitude de 150 m) surveillant l'activité des navires de pêche sur le site du récif artificiel, en particulier après le sous-marin Atlantis. Les employés avaient quitté le site pour la soirée ou avant leur arrivée le matin. Dans ce cas, seuls le nombre de bateaux présents et le type d'activité de pêche ont été enregistrés (c.-à-d. pêche en surface ou plongée). Les informations sur les prises effectuées par certains de ces pêcheurs « après les heures normales » ont été obtenues par le biais d'entretiens personnels avec les pêcheurs et les employés d'Atlantis. Des informations économiques sur les différentes activités de plongée se déroulant sur le site Atlantis ont été obtenues par une intervention personnelle auprès de la direction d'Atlantis Submarines of Hawaii, L.P. et Atlantis Reef Divers, Inc. D'autres clubs de plongée ont été surveillés sur le site du récif artificiel. Le nombre de passagers et le nombre de voyages par jour ont été enregistrés pour les jours de semaine et les fins de semaine pendant les périodes hors saison et les périodes de pointe saisonnières. Ces données ont été corroborées par les employés d'Atlantis Submarine qui se rendent quotidiennement sur le site. Les frais généraux de ces autres opérateurs ont été estimés à l'aide des valeurs obtenues auprès d'Atlantis Reef Divers. La plupart des petits exploitants ont probablement des frais généraux beaucoup plus faibles que l'exploitation Atlantis, car ils emploient moins de personnes.



## Résultats :

**Excursions sous-marines:** L'excursion sous-marine Atlantis a commencé à utiliser le site de plongée de Waikiki en septembre 1989. En juillet 1991, un deuxième sous-marin a été ajouté à la tournée. Ces sous-marins transportent 46 passagers et sont conçus pour une profondeur de travail maximale de 46 m. Atlantis employait 80 personnes dans l'exploitation de Waikiki. Les visites duraient environ 1 heure; chaque sous-marin effectuait 10 plongées par jour. De juillet 1990 à juillet 1991, le premier sous-marin a transporté 116 000 passagers et chacun des deux sous-marins devrait transporter 105 000 passagers par an. Le tarif était de 74 \$. Les frais généraux du premier sous-marin l'année dernière étaient de 7 millions de dollars, dont 2,6 millions de dollars correspondaient à la masse salariale. La plupart des frais généraux restent à la charge de la communauté locale. Au cours de la période juillet 1990-juillet 1991, environ 90 % des passagers ont payé le plein tarif (104 400 passagers x 74 \$ = 7 725 000 \$) et les autres ont payé un tarif local spécial de 28 \$ par personne (11 600 x 28 \$ = 324 800 \$). Ainsi, le revenu brut au cours de cette période est d'environ 8,05 millions de dollars et les montants des bénéfices annuels avant impôts à 1,05 million de dollars.

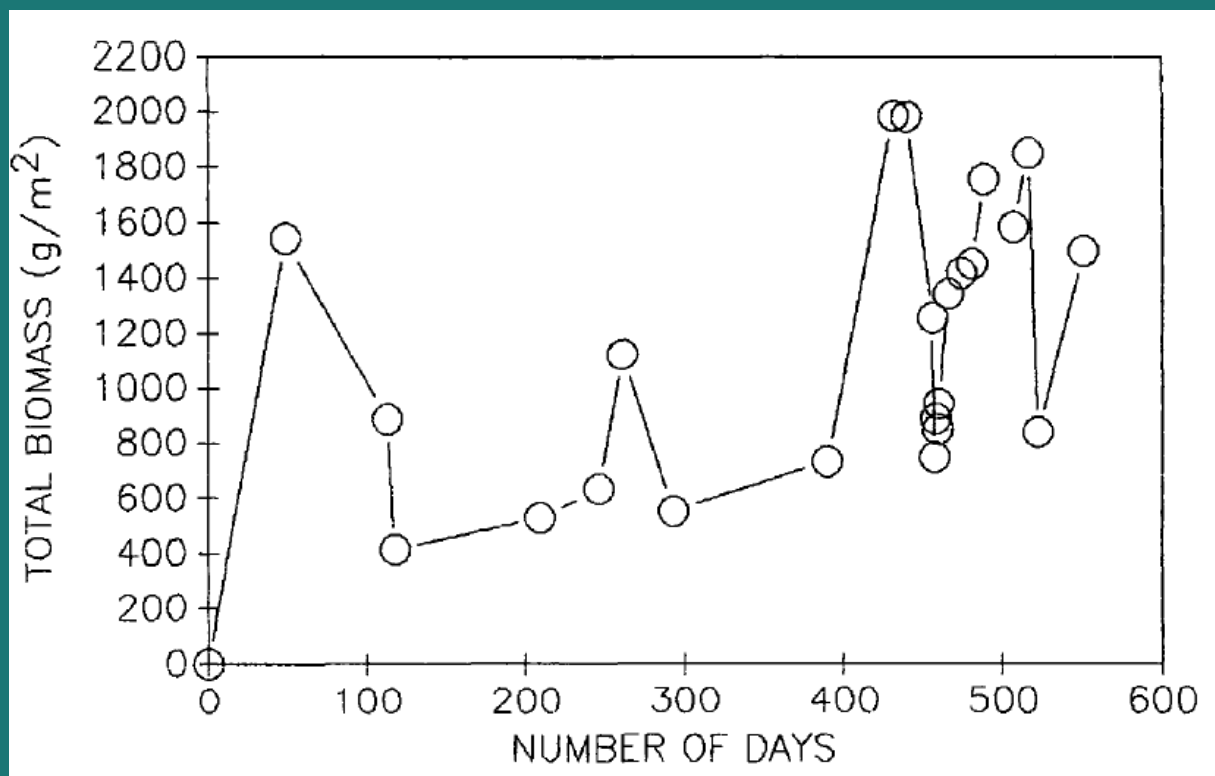
**Excursions de plongée:** La principale excursion de plongée sous-marine (Atlantis Reef Divers) exploitait quotidiennement un navire de 18 m vers le récif artificiel Atlantis. Cette tournée était en opération depuis environ 14 mois. Pendant la haute saison (6 mois de l'année), cet opérateur transportait en moyenne 700 plongeurs par mois; hors saison, ce nombre diminue à 500 plongeurs par mois. Ainsi, environ 7 200 plongeurs ont été accueillis sur cette tournée la première année. Atlantis Reef Divers facturait 26 \$ par plongeur. Les autres plongeurs paient une variété de prix ayant une valeur moyenne par plongeur pour Atlantis Reef Divers de 60 \$. Sur la base de ces chiffres, le revenu brut annuel total de la charte de plongée est d'environ 309 600 \$. Les autres revenus tirés de cette activité proviennent de la location de matériel de plongée et d'appareils photos; les ventes brutes de cet aspect de l'exploitation s'élèvent à 46 400 \$. Les frais généraux de la première année d'exploitation s'élèvent à 336 000 \$. Ainsi, le revenu brut de la première année d'exploitation est de 356 000 \$ et les coûts de 336 000 \$, ce qui se traduit par un bénéfice avant impôts de 20 000 \$ la première année. Il existe quatre autres excursions de plongée dans le récif qui utilisent régulièrement le site de plongée Atlantis. Deux de ces opérateurs plongeaient quotidiennement sur le site du récif Atlantis, amenant 11 200 plongeurs sur le site par an. Ces plongeurs sont facturés en moyenne 65 \$ par personne et les frais généraux sont supposés être les mêmes que pour le circuit Atlantis Reef Divers (ici 46,67 \$ par plongeur). Ces deux circuits avaient des revenus supplémentaires grâce à la location de matériel de plongée et vidéo qui est estimé à 10% des ventes brutes. Les ventes brutes annuelles combinées de ces entreprises sont de 728 000 \$, les frais généraux sont de 522 700 \$ et la location d'équipement est de 72 800 \$. Le bénéfice annuel combiné avant impôts qui en résulte est d'environ 278 000 \$. Il existe deux autres clubs à temps partiel qui, au total, transportent environ neuf plongeurs vers le récif artificiel Atlantis trois fois par semaine. Ces opérateurs avaient une charge moyenne de 65 \$ par plongeur et ils, comme les autres, opèrent environ 50 semaines par an. Ces opérateurs transportent environ 1 350 plongeurs sur le site par an. Si nous supposons qu'ils ont des frais généraux similaires à ceux de l'opération Atlantis Reef Divers (ici 46,67 \$ par plongeur), les recettes brutes globales sont d'environ 87 700 \$ par an, les frais généraux sont d'environ 63 000 \$ par an, donc le bénéfice annuel avant impôt est de 24 700 \$.

De nombreux plongeurs privés utilisait également le site du récif artificiel Atlantis. Nos données suggèrent qu'environ deux petits bateaux avec une moyenne de deux plongeurs

utilisent quotidiennement le récif artificiel d'Atlantis. En supposant que le site puisse être utilisé en toute sécurité pendant 50 semaines par an, ces plongeurs supplémentaires représentent 1 400 plongeurs par an. Aucun montant en dollars n'est attribué à ces utilisateurs récréatifs.

**Amélioration des ressources halieutiques:** Des recensements visuels de la communauté de poissons présents sur le plateau calcaire du site de récif artificiel avant le développement du récif ont trouvé une moyenne de 12 espèces, 60 individus et une culture sur pied estimée à 44 g·m<sup>-2</sup> (N = 2). La taille moyenne de ces poissons a été estimée à environ 8 cm. Le faible développement de la communauté de poissons dans cet habitat était probablement lié au manque d'abris pour les poissons en raison de la faible croissance des coraux.

À la suite du déploiement du navire en tant que première phase du récif artificiel, l'abondance de poissons a considérablement augmenté. Ces changements se reflètent dans l'évolution de la biomasse estimée au fil du temps (Fig. 5).



**Figure 5:** Graphique de la biomasse estimée des poissons de septembre 1989 à janvier 1991 sur le navire de 53 m déployé dans le cadre du récif artificiel Atlantis à environ 1,4 km au large de Waikiki, Oahu à 24-30 m de profondeur.

Un transect visuel effectué là où le navire était déployé (le long de l'interface du substrat de sable et de calcaire) avant son déploiement a trouvé trois espèces de poissons (quatre *Parapercis schauslandii* de 5 cm de longueur totale chacun, trois *Dascyllus albisella* de 1 cm de longueur totale chacun et un *Paracirrhites arcatus* d'environ 5 cm de longueur totale) ayant une biomasse estimée à 0,6 g·m<sup>-2</sup> sur le site. Cependant, la communauté de poissons

résidant sur le plateau calcaire du rivage du récif déployé avait une culture estimée à 44 g·m<sup>-2</sup> (ci-dessus). La récolte permanente de poissons sur le navire déployé a montré d'énormes oscillations au cours des 550 premiers jours d'observation ; la grande moyenne est de 1 165 g·m<sup>-2</sup>, ce qui représente une augmentation de plus de deux ordres de grandeur.

La communauté de poissons est composée d'espèces résidentes et transitoires ; dans cette étude, les espèces transitoires sont principalement des espèces pélagiques côtières qui ne sont généralement associées à aucun récif corallien particulier. Ces espèces transitoires comprennent le mackeral scad (*Decapterus macarellus*), l'amber-jack (*Seriola dumerilii*), rainbow runner (*Elagatis bipinnulatus*), luth (*Scombroides lysan*), bonite (*Euthynnus affinis*) et wahoo (*Acanthocybium solandri*). Occasionnellement, des espèces pélagiques de haute mer visitent le récif artificiel, notamment l'albacore (*Thunnus albacares*), le listao (*Katsuwonus pelamis*), la coryphène (*Coryphaena hippurus*) et le marlin rayé (*Tetrapterus audax*). La biomasse des espèces transitoires (moyenne = 334 g·m<sup>-2</sup> par recensement) est d'environ 29 % du total par récolte de recensement. L'espèce résidente la plus visible sur le navire est le vivaneau à lignes bleues ou taape (*Lutjanus kasmira*) introduit. La moyenne de recensement de taape est 486 g·m<sup>-2</sup> soit environ 42 % de la biomasse moyenne par recensement. Ainsi, environ 71% en moyenne estimée par recensement sont composés d'espèces transitoires et taape dans les 550 premiers jours suivant le déploiement.

Une grande partie de la fluctuation de la récolte permanente de poissons sur le navire est due aux activités des pêcheurs. À de nombreuses reprises, des pêcheurs ont été rencontrés sur le site ; les techniques utilisées vont de la pêche à la ligne et à l'hameçon au harpon et au filet. D'un point de vue intérieur, ils ont surveillé l'utilisation du site du récif artificiel d'Atlantis, en particulier tôt ou tard dans la journée lorsque le personnel d'Atlantis était absent du site. À l'occasion, des bateaux de plongée équipés de filets maillants (informations obtenues plus tard par un entretien personnel) ont été vus ancrés sur le site du récif artificiel. Les résultats de certaines de ces activités de pêche étaient évidents lors de nos recensements visuels ; souvent lorsque les comptages et la biomasse estimée étaient faibles (par exemple, jours 118, 209, 293, 457 et 522, Fig. 5), les poissons ont été vus avec des « brûlures de filet ». Souvent, ce qui avait été un banc important (70 à 150 adultes) du très recherché surmulet (*Mulloides vanicolensis*) était réduit à six ou huit individus dont certains avaient des brûlures de filet visibles.

En général, à part une petite quantité de pêche aux appâts dérivants, les activités de pêche sont limitées aux moments où les sous-marins et les excursions de plongée sous-marine ne fonctionnent pas, ce qui concentre ces activités de consommation tôt le matin et en fin d'après-midi. La plupart des pêcheurs évitent le récif artificiel lorsqu'il n'y a pas d'endroit disponible pour amarrer leur bateau et lorsque les plongeurs SCUBA sont dans l'eau. Il n'y a que deux mouillages sur le navire déployé ; les lignes d'ancrage n'importe où ailleurs sur le site du récif artificiel d'Atlantis pendant que le sous-marin est en fonctionnement sont susceptibles de s'emmêler et de se couper accidentellement.

Le tableau 2 présente un résumé des prises et de l'effort de pêche déployés sur le site du récif artificiel Atlantis à partir de l'échantillonnage au cours de la période d'étude de 550 jours. Au total, environ 7 kg de poissons sont pêchés par heure. Si la pêche est limitée à environ 4 h par jour (tôt le matin et au crépuscule), environ 28 kg de poissons sont prélevés par les pêcheurs à la traîne, aux appâts dérivants et au harpon. Les pêcheurs au filet sont un "événement rare" relatif sur le récif, apparaissant environ tous les 2,5 mois et prélevant de 20 à 200 kg de poissons par sortie. Les principales espèces ciblées par les pêcheurs au filet sont le surmulet (*Mulloides vanicolensis*) et le taape (*Lutjanus kasmira*).

**Tableau 2: Résumé des observations sur les prises et l'effort de pêche sur le site du récif artificiel Atlantis, Waikiki, Oahu**

Fishing method	Catch effort	Sample size
Trolling	1.6 kg·h <sup>-1</sup> ·boat <sup>-1</sup>	31
Drift bait	2.4 kg·h <sup>-1</sup> ·boat <sup>-1</sup>	52
Spear	3.1 kg·h <sup>-1</sup> ·diver <sup>-1</sup>	12
Net	Unknown but anecdotal information suggests 20 to 200 kg·h <sup>-1</sup> ·boat <sup>-1</sup> about once every 2.5 months	

Si 200 kg de poissons sont prélevés tous les 75 jours, la biomasse quotidienne estimée de poissons capturés par le navire déployé est d'environ 31 kg·j<sup>-1</sup>. La division des ressources aquatiques de l'État d'Hawaï recueille des données sur les activités de pêche commerciale. Ces données comprennent la marchandise débarquée, vendue et la valeur en dollars (prix départ navire) par espèce. La valeur moyenne sortie navire des prises côtières d'Hawaï est d'environ 5,20 \$·kg<sup>-1</sup>. Si les pêcheurs capturent 31 kg·j<sup>-1</sup> du navire déployé et que la totalité de cette prise est vendue, le produit brut est de 16\$/kg et la valeur brute annuelle est de 58 840 \$. Cette étude manque d'informations sur les frais généraux des pêcheurs pêchant sur le site du récif artificiel Atlantis. Si l'on suppose que tous les poissons pêchés sont vendus et que le produit brut de la vente du poisson représente un "bénéfice" pour les pêcheurs, une simple comparaison économique peut être faite entre les activités non-consommatrices se déroulant sur le site du récif artificiel par rapport aux activités consommatrices (activités de pêche). Au quotidien, les excursions de plongée au cours de leur première année d'exploitation sur le site du récif ont un bénéfice avant impôt estimé à 3 761 \$ et pour les pêcheurs, 161 \$ ; annuellement, ces chiffres sont respectivement de 1,37 million de dollars et de 58 840 dollars. Le récif artificiel génère donc un produit brut annuel de 4 %.

Contrairement au tourisme en général, le tourisme de plongée cible une zone relativement petite le long des pays tropicaux qui ont pour la plupart une économie peu développée. Pour certains de ces pays, les revenus tirés du tourisme de plongée représentent l'une des principales parties du budget de l'État (Sudara et Nateharnch-analap, 1988, Craik, 1992). Le nombre de plongeurs transportés par une seule compagnie allemande générerait environ 25 % du PNB des Maldives au début des années quatre-vingt-dix. La dépendance de certaines autres destinations de plongée telles que l'Égypte, la République dominicaine et les Fidji aux « dollars de plongée » est probablement moindre, mais la plongée reste un facteur économique important notamment ces dernières années avec l'augmentation de ces récifs artificiels comme les épaves, coulées volontairement pour les plongeurs, ce qui par leur attrait de masse, pourrait nuire à l'écosystème.

Nous avons donc pu constater à travers cette étude l'intérêt économique halieutique et touristique durable des épaves immergées transformées en récif artificiel.

## Discussion :

J'ai d'abord voulu axer ce mémoire sur la transplantation de corail ou de gorgone sur les épaves mais par manque d'informations scientifiques à ce sujet, je me suis alors tourné vers les usages écologiques et économiques de ces dernières. Les études scientifiques n'étaient pas toute récentes mais je pense avoir réussi à démontrer les usages des épaves dans leur globalité.

Malgré tous ces usages positifs liés à l'immersion d'épaves transformées en récif artificiel, durant mes recherches, j'ai toutefois appris qu'il pouvait y avoir aussi des effets néfastes que nous passerons en revue, comme ici le phénomène de propagation d'espèce invasive :

Le corail envahissant *Tubastraea tagusensis* (corail solaire) est une espèce formant un habitat qui étend actuellement son aire de répartition géographique dans l'océan Atlantique, entraînant ainsi des impacts écologiques et socio-économiques négatifs. Des plongeurs ont observé ce corail dans l'Atlantique équatorial occidental en janvier 2020, poussant à de fortes densités sur une épave de la Seconde Guerre mondiale (coulée en 1943) à une profondeur d'environ 32 m. Les images disponibles du début de la décennie (2012-2018) ne montrent aucun signe évident de corail solaire sur cette épave, suggérant une colonisation récente et une expansion de l'aire de répartition. La preuve récente de l'expansion a été trouvée à 200 km à l'est du dernier enregistrement, qui a également été trouvé sur une épave de la Seconde Guerre mondiale (coulée en 1942) en 2016. Des centaines d'épaves de la Seconde Guerre mondiale négligées, ainsi que de nouvelles épaves dans des eaux peu profondes et mésophotiques, pourrait fournir des habitats de tremplin à ce corail pour étendre sa distribution dans l'Atlantique. Les épaves jouent un rôle en tant que réseau de tremplins pour la propagation du corail solaire, créant des voies complémentaires pour l'envahissement en surmontant les traits physiologiques et la courte durée de vie des larves de corail. (Oliveira Soares et al. 2020).

Les épaves peuvent aussi être la cause de pollution aux métaux lourds :

Dans le naufrage du « Sea Diamond », on estime que près de 1,7 tonne de piles/accumulateurs et environ 150 téléviseurs à technologie à tube cathodique ont disparu au fond de la mer. Dans ces circonstances, tous les matériaux précités subiront à terme une corrosion accélérée sévère. Par conséquent, divers métaux lourds seront soit libérés dans l'eau de mer, soit précipités sous forme de sels entraînant une contamination des sédiments marins. Selon les données du navire et les quantités susmentionnées de piles et de téléviseurs, on estime qu'environ 75 à 80 g de mercure, 630 à 1 050 g de cadmium et 1,14 à 1,26 tonne de plomb existent dans l'épave uniquement en raison de l'électricité et équipements électroniques présents dans le navire, sans compter la quantité importante de métaux lourds tels que le cuivre, le nickel, le fer et le chrome qui existent dans la carcasse. Quatre séries d'échantillonnages d'eau de mer (n = 85) ont été réalisées dans différentes stations entourant la zone de l'épave afin d'évaluer l'impact global du rejet de métaux lourds dans le milieu aquatique environnant. L'analyse a indiqué qu'il y avait des stations où le plomb, le zinc et le cadmium étaient présents à des concentrations supérieures aux limites autorisées fixées par l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis pour l'eau de mer. De plus, l'analyse de trois séries d'échantillonnage de sédiments (n = 31) de la zone de l'épave a montré des valeurs de concentration élevées mais attendues pour les ferreux et le manganèse, compte tenu du contexte géologique de la zone et de la contamination par le plomb, le cuivre et le cadmium. (Dimitrakakis et al. 2014).

De même pour cet article qui a étudié si les déchets de moules zébrées (*Dreissena polymorpha*) ont contribué aux concentrations de métaux toxiques sur et à proximité de trois épaves dans le bassin ouest du lac Érié en raison de plans visant à promouvoir les épaves en tant que sites de tourisme de plongée. Deux épaves (Northern Indiana et Conemaugh) ont été construites avec du bois, et l'autre épave (M.I. Wilcox) a été construite avec un faible pourcentage (moins de 3 %) de métal. Les trois épaves étaient densément peuplées de moules zébrées (*Dreissena polymorpha*). Des plongeurs ont collecté, sur et à proximité d'épaves, 36 échantillons de sédiments qui ont ensuite été analysés chimiquement par eau régale, suivie d'une spectroscopie d'émission plasma-optique à couplage inductif. Les analyses des ensembles de données ont révélé que : toutes les épaves étaient contaminées par de l'arsenic, du cadmium, du chrome, du cuivre, du plomb, du nickel, du vanadium et du zinc, les métaux toxiques trouvés sur deux des épaves dépassaient les limites du Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) sur les concentrations de métaux toxiques présents dans les sols et les sédiments, et ainsi les concentrations de métaux toxiques diminuaient avec l'éloignement des épaves. Étant donné que les métaux toxiques étaient concentrés sur toutes les épaves et diminuaient avec l'éloignement des épaves, on pourrait en déduire que les moules zébrées ont contribué aux concentrations élevées de métaux toxiques parce qu'elles utilisaient les épaves comme substrats de fixation. Au cours du processus, les moules zébrées ont filtré et biodéposé des particules fines qui se sont avérées fortement contaminées par des métaux toxiques. (Placido et al. 1999).

Enfin les épaves pourraient avoir un rôle dans l'altération et l'équilibre écosystémique des habitats :

Les épaves peuvent vider localement et régionalement les récifs naturels voisins en attirant leur biote. Inversement, il peut améliorer les conditions environnementales pour la survie et la reproduction des espèces, agissant comme source de diversité aux niveaux local et régional. Ces hypothèses ont été testées en évaluant la diversité taxonomique, fonctionnelle et phylogénétique de 12 communautés de poissons dans le nord-est du Brésil : quatre épaves vieillissantes (>100 ans) et huit récifs naturels environnants à des profondeurs et des distances comparables. Ils ont divisé la diversité gamma des communautés de récifs artificiels et naturels en composantes alpha et bêta indépendantes, pris en compte l'abondance des espèces et évalué si les modèles bêta étaient principalement déterminés par le renouvellement spatial ou l'imbrication. Ils ont recensé 6 335 individus répartis en 88 espèces de poissons et 38 familles. Alors que les récifs artificiels et naturels partageaient 50 espèces (57%), 21 espèces (24%) étaient exclusives aux récifs artificiels, ce qui suggère que les récifs naturels à proximité - la source d'origine la plus probable de ces espèces exclusives - ne les abritent plus. La diversité alpha des espèces typiques et dominantes ne différait pas significativement entre les types de récifs, mais la diversité alpha des espèces rares était taxonomiquement, fonctionnellement et phylogénétiquement plus élevée dans les récifs artificiels, indiquant des effets positifs des structures à l'échelle locale. En revanche, la diversité bêta régionale était plus élevée dans les récifs naturels en termes de diversité taxonomique et fonctionnelle, quelle que soit l'abondance des espèces. La diversité bêta par paires a indiqué que le renouvellement avait un effet important sur la dissemblance de composition dans les deux types de récifs, alors que l'imbrication était presque sans importance dans les récifs artificiels. Ces structures artificielles telles que les épaves peuvent favoriser la concurrence d'espèces rares, mais elles sont incapables de produire les modèles de diversité bêta que produisent les récifs naturels, même après plusieurs décennies de colonisation. Bien que les habitats artificiels abritent une partie importante de la diversité

régionale des poissons de récif, ils peuvent également avoir contribué à la dégradation des récifs naturels à proximité. (Medeiros et al. 2022).

D'autre part, les récifs artificiels non planifiés peuvent entraîner des impacts sur l'habitat de fond mou environnant par l'altération de la topographie et de la dynamique du fond. Les récifs artificiels sont colonisés par différents organismes, échangeant des larves et des spores avec les récifs naturels les plus proches, cependant le but de cette étude (Taciana Kramer Pinto et al. 2021) était de déterminer si les communautés benthiques des épaves centenaires peuvent être similaires aux communautés naturelles des récifs rocheux établis à courte distance. La couverture benthique d'épaves coulées il y a plus de 100 ans et celle de récifs naturels situés à une distance de gradient de 0, 1 et 2 km, et différemment exposés à l'action des vagues, ont été comparées. À l'aide d'analyses multivariées, ils ont constaté que les similitudes étaient influencées à la fois par l'exposition aux vagues et par la distance. Dans la zone exposée, la communauté d'encrassement benthique dans l'épave était similaire aux communautés benthiques des récifs les plus proches, avec des valeurs de richesse décroissantes avec la distance. Les communautés des zones protégées présentaient une grande dissemblance. (Voir Annexe 1). Une fois que la présence d'un récif artificiel influence les communautés benthiques des récifs naturels

Il est donc recommandé d'évaluer les coûts/bénéfices de l'introduction de récifs artificiels, en tenant compte de l'hydrodynamique locale et de la proximité des environnements naturels et de la composition de l'épave afin de minimiser les changements indésirables dans l'environnement naturel.

## Conclusion :

A l'issue de cette analyse, nous avons pu démontrer les deux usages principaux des épaves immergées transformées en récif artificiel en décryptant différentes études ; l'usage écologique, par le fait que les épaves constituent un habitat viable pouvant accueillir un grand nombre d'espèces vu les recensements effectués, mais aussi par le fait qu'elles augmentent la biodiversité du site à travers une biomasse supérieure à d'autres récifs, artificiels ou non. Nous avons pu aussi constater que ces épaves immergées constituent un réel intérêt pour une économie locale durable, si ces dernières sont soumises à des réglementations spécifiques. Enfin nous avons pu discuter des potentiels risques liés aux épaves comme la pollution aux métaux lourds, l'altération de l'habitat ou encore abriter des espèces invasives. C'est donc pour cela que des études d'impacts préliminaires sont impératives avant d'immerger de nouvelles épaves, pour créer de magnifiques récifs artificiels visant à restaurer nos fonds marins côtiers.

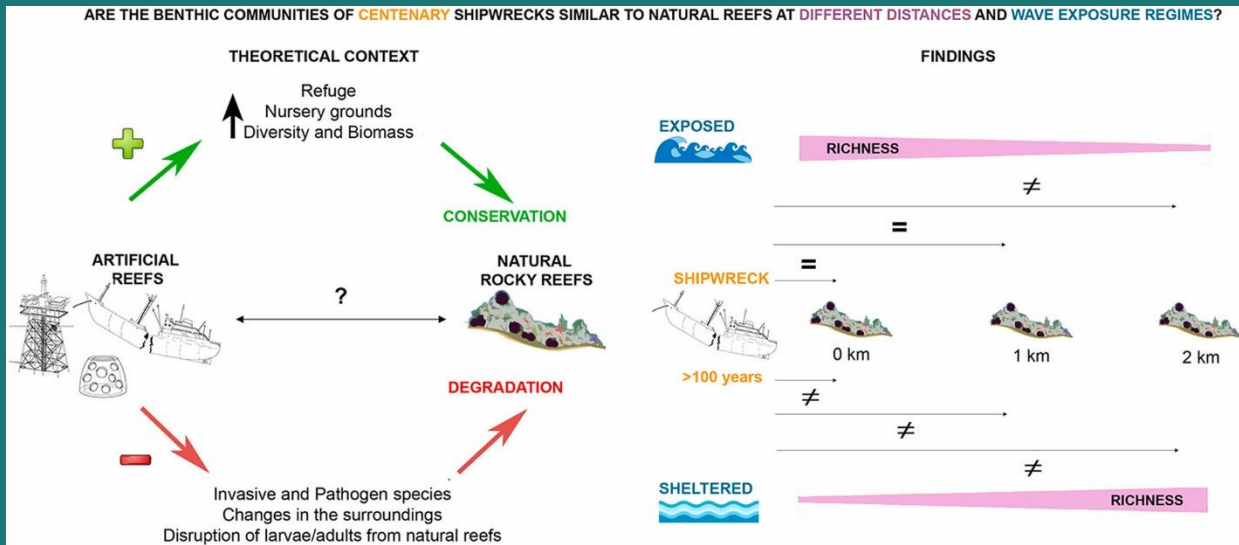
## Références bibliographiques :

- Buckland S.T., Anderson D.R., Burnham K.P. and Laake J.L. 1993. Distance sampling. Estimating abundance of biological populations. Chapman Hall, London, 446 pp.
- Bohnsack J.A. 1989. Are high densities of fishes at artificial reefs the result of habitat limitation or behavioral preference? *Bull. Mar. Sci.*, 44,63 1-645.
- Bohnsack J.A. 1996. Maintenance and recovery of reef fishery productivity. In: Polunin N.V.C. and Roberts C.M. (Eds.), *Reef fisheries*. Chapman Hall, London, 283-313.
- Bohnsack J.A., Harper D.E., McClellan D.B. and Hulsbeck M. 1994. Effects of reef size on colonization and assemblage structure of fishes at artificial reefs off southeastern Florida, USA. *Bull. Mar. Sci.*, 55,796-823.
- Bohnsack J.A., Ecklund A.M. and Szmant A.M. 1997. Artificial reef research: is there more than the attraction-production issue? *Fisheries*, 22, 14-16.
- Brock, R. E. (1994). Beyond fisheries enhancement: artificial reefs and ecotourism. *Bulletin of Marine Science*, 55(2-3), 1181-1188.
- Brock, R. E. 1982. A critique of the visual census method for assessing coral reef fish populations. *Bull. Mar. Sci.* 32: 269-276.
- Brock, R. E. and J. E. Norris. 1989. An analysis of the efficacy of four artificial reef designs in tropical waters. *Bull. Mar. Sci.* 44: 934-941.
- Brock, R. E. and R. M. Buckley and R. A. Grace. 1985. An artificial reef enhancement program for nearshore Hawaiian waters. Pages 317-337 in F. M. D'Itri, ed. *Artificial reefs: marine and freshwater applications*. Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan.
- Brock, V. E. 1954. A preliminary report on a method of estimating reef fish populations. *J. Wildl. Mgmt.* 18: 297-308.
- Burnham K.P., Anderson D.R. and Laake J.L. 1980. Estimation of density from line transect sampling of biological populations. *Wildl. Monogr.*, 32, 1-202.
- Carr M.H. and Hixon M.A. 1997. Artificial reefs: the importance of comparisons with natural reefs. *Fisheries*, 22,28-33.
- Chou L.M. 1997. Artificial reefs of southeast Asia: do they enhance or degrade the marine environment? *Environmental Monitoring Assessment*, 44,45-52.
- Chou L.M., Lim G.S.Y. and Leng C.B. 1992. Fish communities in natural reef and artificial habitats in the coastal waters of Brunei, Darussalam. *ICLARM Conf. Proc.*, 34, 75-90.
- Dimitrakakis, E., Hahladakis, J. & Gidarakos, E. The "Sea Diamond" shipwreck: environmental impact assessment in the water column and sediments of the wreck area. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11, 1421-1432 (2014).
- Gosline, W. A. and V. E. Brock. 1960. *Handbook of Hawaiian fishes*. Univ. Hawaii Press, Honolulu. ix + 372 pp.
- Kulbicki M. 1991. Present knowledge of the structure of coral reef fish assemblages in the Pacific. *UNEP Regional Seas Rep. Studies*, 147, 3 1-53.
- Kulbicki M., Mou Tham G., Thollot P. and Wantiez L. 1993. Length-weight relationships of fish from the lagoon of New Caledonia. *NAGA the ICLARM Quarterly*, April-July 1993,26-30.



- Kulbicki M., Bargibant G., Menou J.L., Mou Tham G., Thollot P., Wantiez L. and Williams J. 1994. Evaluation des ressources en poissons du lagon d'OUVCA. Convention Sci. Mer Biol. Mar. ORSTOM NoumCa, 3 1, 1-448.
- Kulbicki M. and Sarramégna S. 1999. Adequacy of several density estimates obtained from underwater visual censuses: a case study of Chaetodontidae and Pomacentridae. *Aqua. Living Res.*, 12,3 15-325.
- Legendre L. and Legendre P. 1984. *Ecologie numérique 2. La structure des données écologiques*, 2<sup>ème</sup> éd. Masson, Paris, 335 pp.
- Medeiros, A. P., Ferreira, B. P., Betancur - R, R., Cardoso, A. P., Matos, M. R., & Santos, B. A. (2022). Centenary shipwrecks reveal the limits of artificial habitats in protecting regional reef fish diversity. *Journal of Applied Ecology*, 59(1), 286-299.
- Mystakidis, S., Davin, E. L., Gruber, N., & Seneviratne, S. I. (2016). Constraining future terrestrial carbon cycle projections using observation - based water and carbon flux estimates. *Global change biology*, 22(6), 2198-2215.
- Oliveira Soares, M., Salani, S., Paiva, S. V., & Braga, M. D. A. (2020). Shipwrecks help invasive coral to expand range in the Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 158, 111394.
- Placido D. LaValle, Andrew Brooks, V. Chris Lakhan, Zebra Mussel Wastes and Concentrations of Heavy Metals on Shipwrecks in Western Lake Erie, *Journal of Great Lakes Research*, Volume 25, Issue 2, 1999, Pages 330-338, ISSN 0380-1330
- Polovina, J. J. and I. Sakai. 1989. Impact of artificial reefs on fishery production in Shimamaki, Japan. *Bull. Mar. Sci.* 44: 997-1003.
- Pickering H. and Whitmarsh D. 1997. Artificial reefs and fisheries exploitation : a review of the "attraction versus production" debate, the influence of design and its significance for policy. *Fish. Res.*, 3 1, 39-59.
- Richer de Forges B., Bargibant G., Menou J.L. and Guarrigue C. 1987. Le lagon sudouest de la Nouvelle-Calédonie. Observations préalables à la cartographie bionomique des fonds meubles. *Rapp. Scient. Tech. ORSTOM NoumCa*, 45, 1-72.
- Rooker J.R., Dokken Q.R., Pattengill C.V. and Holt G.J. 1997. Fish assemblages on artificial and natural reefs in the Flower Garden Banks National Marine Sanctuary, USA. *Coral Reefs*, 16,83-92.
- Sudara, S., & Nateekarnchanalap, S. (1988). Impact of tourism development on the reef in Thailand.
- Taciana Kramer Pinto, Felipe P.A. Barros, José Anchieta C.C. Nunes, Ricardo J. Miranda, Bruno M.S. Pereira, Pedro H.C. Pereira, Cláudio L.S. Sampaio, Shipwrecks fouling community: Similarities with natural rocky reefs at different distances and wave exposure regimes, *Ocean & Coastal Management*, Volume 213, 2021, 105895, ISSN 0964-5691.
- Tessier, A., Francour, P., Charbonnel, E., Dalias, N., Bodilis, P., Seaman, W., & Lenfant, P. (2015). Assessment of French artificial reefs: due to limitations of research, trends may be misleading. *Hydrobiologia*, 753, 1-29.
- Wantiez, L., & Thollot, P. (2000). Colonization of the F/V Calédonie Toho 2 wreck by a reef-fish assemblage near Nouméa (New Calédonia). *Atoll Research Bulletin*.
- Wantiez L., Thollot P. and Kulbicki M. 1997. Effects of marine reserves on coral reef fish communities from five islands in New Caledonia. *Coral Reefs*, 16,215-224.

## Annexe:



**Annexe 1: Schéma récapitulatif « Centenary shipwrecks reveal the limits of artificial habitats in protecting regional reef fish diversity » (Taciaana Kramer Pinto et al. 2021)**