

Musée océanographique de Monaco - 20 juin 2018

Les récifs artificiels : visions modernes d'un concept vieux de plusieurs siècles

Pr Patrice Francour

CNRS - Université de Nice-Sophia Antipolis. ECOMERS

francour@unice.fr

Les récifs artificiels : visions modernes d'un concept vieux de plusieurs siècles

« Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur les récifs artificiels sans jamais oser le demander »



... des premiers récifs monégasques aux récifs les plus récents, imprimés en 3D ...



Mais un récif artificiel, qu'est-ce que c'est ?

« Un récif artificiel consiste en un ou plusieurs objets d'origine naturelle ou humaine, immergés délibérément sur le fond de la mer pour influencer des processus physiques, biologiques ou socio-économiques liés aux ressources marines vivantes »

(Seaman & Jensen, 2000)



Mais tout ne devient pas un récif artificiel !

(photo Sea Sheperd)

Une « invention » humaine ancienne !



<https://fr.wikipedia.org/wiki/Go-K%C5%8Dmy%C5%8D>

Récit de l'empereur Joo, milieu du 17^{ème} siècle : sur l'île d'Awaji, près de Kobe, des pêcheurs imaginent de remplacer des épaves coulées lors de tempêtes par des **gabions en bambou** ('jakagos') remplis de pierres. **L'effet sur les pêcheries est important.**

Utilisation ancestrale des 'jakagos' pour lutter contre l'érosion des rivières dès la période Nara (de 710 à 794).

Pierres insérées dans un 'jakago'

<http://kmcenter.rid.go.th/kcdesign/dblog/wp-content/uploads/2009/10/history-and-method-of-Gabion1TCNPF-o-Compatibility-Mode.pdf>



Une « invention » humaine ancienne !

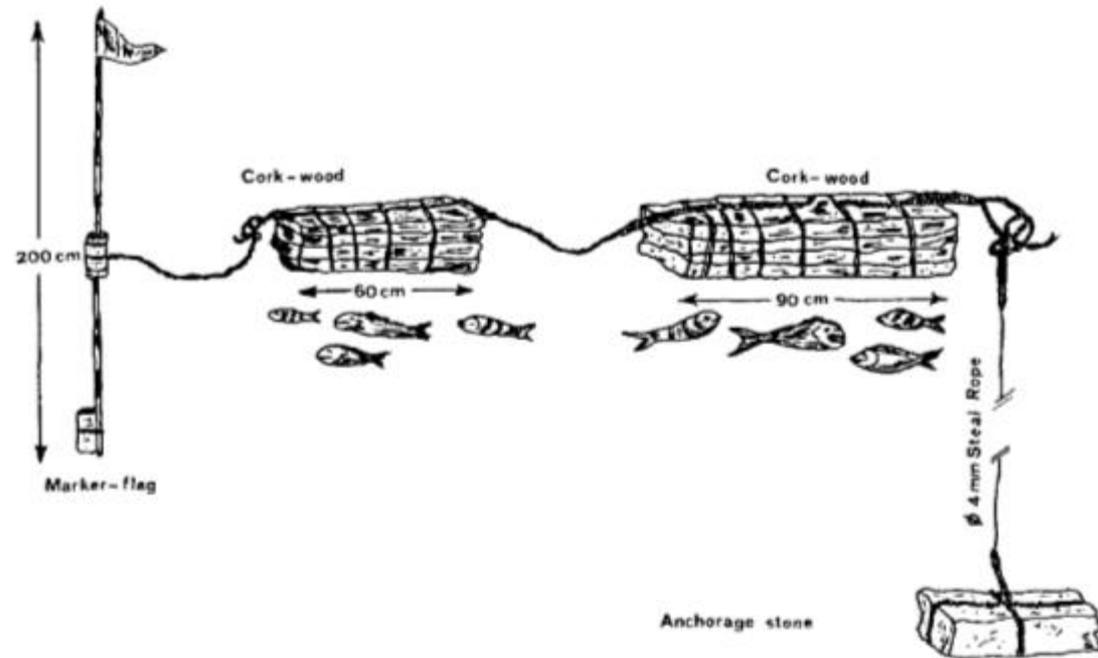
Cette technique japonaise de gabions en bambous est encore utilisée en Asie dans la lutte contre l'érosion (rivières, berges, littoral).

'Jakago' japonais utilisé au Vietnam à l'époque actuelle



Une « invention » humaine ancienne !

Mais encore avant cela, l'homme a utilisé depuis longtemps des objets immergés **volontairement** pour améliorer les prises par pêche ... des **précurseurs de « récifs artificiels » à vocation halieutique** !



Pots à poulpes : une vieille tradition méditerranéenne
(Musée de Zarzis, Djerba; P. Francour)

Kannizzati : des dispositifs de concentration de poissons
utilisés depuis des siècles en Sicile et à Malte (Bombace, 1989)

Et ailleurs dans le Monde ?

- **Japon** : dès la **fin du 19^{ème} siècle**, des récifs artificiels sont utilisés à grande échelle pour améliorer les pêcheries
- **USA** : **1830**, 1^{ère} tentative avec des rondins de bois en Caroline du Sud; **1935**, épaves de bateaux et matériaux divers New Jersey; **1950**, 14 000 caisses de bière en bois remplies de béton (MacGurrin et al. 1989)
- **Taiwan** : **1930**, blocs de béton (Lefèvre et al. 1984)
- **Australie** : **1965**, baie de Port Phillip, 400 tonnes de tuyaux en béton à 20 m (Pollard, 1989)
- **France** : **1968**, Palavas, 400 m³ de carcasses de voitures à 20 m + pneus + blocs de béton; **1972** plaques calcaires à Beaulieu-sur-mer (Barnabé et al., 2000; Lafaurie & Meinesz, 1974)
- **Italie** : **1970**, Varazze, 1300 voitures immergées entre 35 et 50 m; **1974** blocs de béton au SE d'Ancone (Bombace, 1989; Relini, 2007)
- **Venezuela** : **1972**, Golfe de Cariaco, blocs en béton à 10 m (Lefèvre et al. 1984)
- **Mer Noire** : **1972**, Bolshoi Utrish Cape (URSS), blocs de roche de 8 m³; **1976-1977** pneus de voitures (Aleksandrov, 2012; <http://reefsproject.net/article-example-2/>)
- **UK** : **1984**, Torness, SE Ecosse, blocs de roche; **1989**, Poole Bay, béton et résidus de centrales à charbon (Jensen, 2002)
- **Espagne** : **1989**, Tabarca, récifs anti-chalut et récifs de production immergés entre 14 et 24 m (Bayle-Sempere et al., 1994)

Et à Monaco ?

- **juin 1977** : 300 tonnes d'enrochements, en 3 récifs (type B; don Mr Fernand Ortelli), entre 28 et 35 m
- **août 1977** : 2 agrégats de hourdis alvéolaires (14 kg pièce, 3 cavités; 15 tonnes, type A; don Mr Gildo Pastor), 22 m
- **1977 (?)** : 1 récif de tuyaux en poterie vernissée (5 tonnes, type C), 20 m
- **juin 1979** : 2 récifs hourdis sur dalle de type D1 (7 tonnes, 150 hourdis, don Mr Fernand Tinarelli), 8 m et 30 m de fond



Récif artificiel type D1, 8 m
(08/2015)

(nomenclature des récifs artificiels d'après Debernardi, 1982)



Récif artificiel type D1



Récif artificiel type D1, 30 m
(08/2015)

Et à Monaco ?

- **septembre 1980** : 16 récifs en hourdis (0.5 tonnes, 30 hourdis, type D3), 25 m
- **mai 1981** : 3 récifs alvéolaires octogonaux avec puits central (10 tonnes, type D2), 14, 22 et 32 m
- **septembre 1983** : 5 récifs alvéolaires octogonaux avec puits central (12 tonnes, 250 hourdis), 30 m



Récif artificiel type D3 (0.5 tonnes; 07/2017)



Récif artificiel alvéolaire (12 tonnes)



Récif artificiel alvéolaire (08/2015)

Et à Monaco ?

- **janvier 1987**: récif pyramidal (38 caissons en béton armé issus d'un chantier et mis à disposition par Mr Bernard Fautrier), 16 m
- **1987-88** (?) : test d'un récif artificiel flottant
- **janvier 1989** : 4 cages à corail (8 tonnes), 27 et 38 m



Récif flottant expérimental



Récif pyramidal (08/2015)



Grotte à corail

Et à Monaco ?

- **août 1989** : 3 récifs 'Thalamé' (2.8 tonnes), 20 m
- **octobre 1989** : épave de bateau en teck de 12 m, 20 m



Récifs 'Thalamé' (08/2015)



Epave de bateau en bois

Et à Monaco ?

- **juillet 1993** : 1 grotte à corail en fibre de verre et polyester (160 kg), 39 m
- **juin 2005** : récif Hexapora (6.35 tonnes), 15 m (déplacé ensuite sur 20 m)



Grotte artificielle



Récif Hexapora (2006)

Et à Monaco ?

- **juin 2007** : 1 récif (27 parpaings et 19 hourdis sur dalle béton, 1.2 tonnes)
- **décembre 2007** : 6 mini-récifs artificiels (16 briques)

➔ 2 projets avec des scolaires



Récif artificiel 06/2007 et 08/2015



Mini-récif artificiel



Et à Monaco ?

- **fin 2013** : 1 récif expérimental (caissons de flottaison recyclés); 36 m
- **juin 2014** : 1 petit récif artificiel (parpaings sur dalle), 23 m



Récif caisson (08/2016)



Petit récif (06/2014 et 08/2015)



Et à Monaco ?

- **novembre 2017** : 6 récifs 3D (2.5 tonnes, dolomite), 30 m

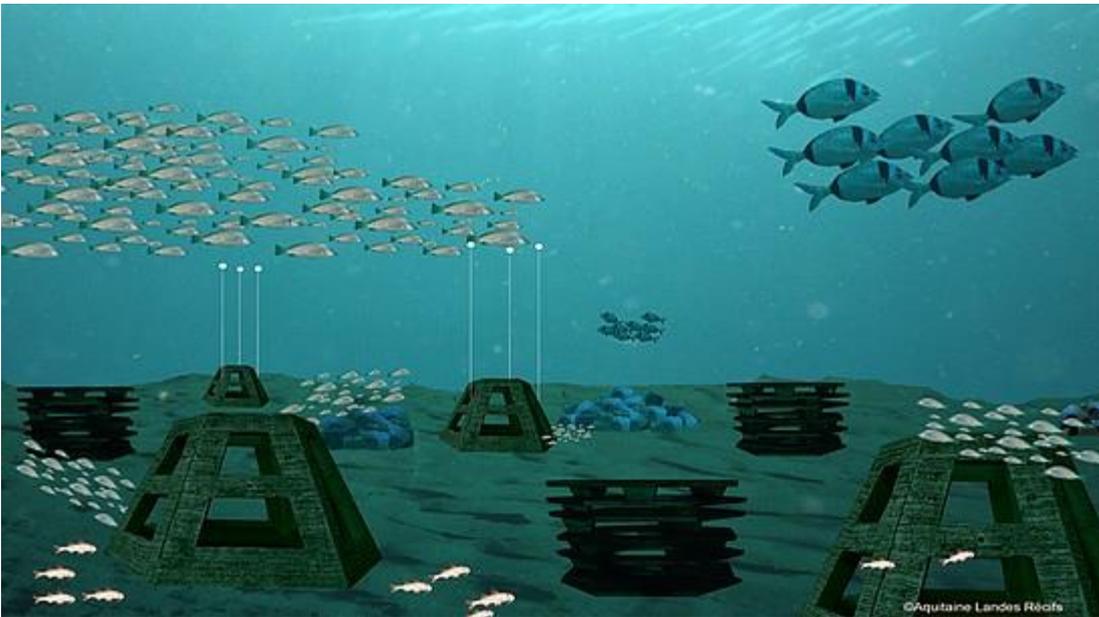


Récif 3D (11/2017; 06/2018)

Mais des récifs artificiels pour quoi faire ?

Les objectifs principaux sont au nombre de 3 :

- **récifs de production** : production/concentration de biomasse de poissons, d'invertébrés ou d'algues; **vocation halieutique**



Aquitaine, les Landes



Beaulieu-sur-mer

Mais des récifs artificiels pour quoi faire ?

Les objectifs principaux sont au nombre de 3 :

- **récifs de production** : production/concentration de biomasse de poissons, d'invertébrés ou d'algues; **vocation halieutique**
- **récifs de protection** : protection d'un habitat sensible (herbier de posidonie) ou d'espèces particulières (les juvéniles de poissons plats); **récifs anti-chalut**



Mais des récifs artificiels pour quoi faire ?

Les objectifs principaux sont au nombre de 3 :

- **récifs de production** : production/concentration de biomasse de poissons, d'invertébrés ou d'algues; **vocation halieutique**
- **récifs de protection** : protection d'un habitat sensible (herbier de posidonie) ou d'espèces particulières (les juvéniles de poissons plats); **récifs anti-chalut**
- **récifs ludiques** : offrir aux touristes sous-marins (plongeurs, apnéïstes) des lieux à visiter; **vocation récréative**



Épaves de bateaux, d'avions (naturelles ou intentionnelles)



Œuvres d'art



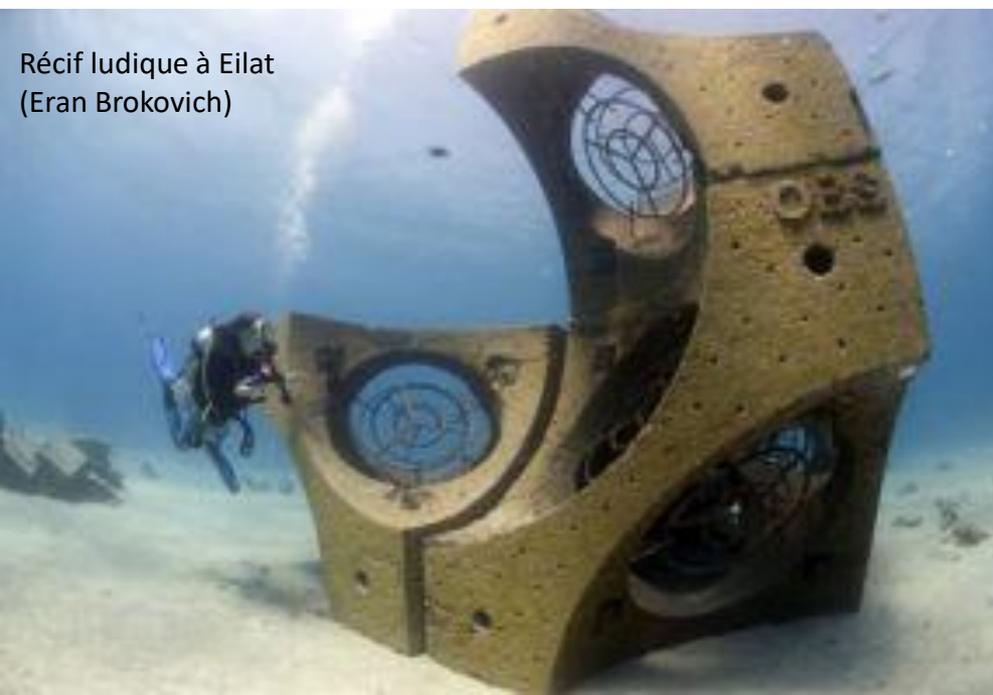
Récifs artificiels spécifiques



Epave du Toulonnais (Jean-Nicolas Detourbet)



Œuvres de Jason deCaires Taylor, Mexico et Lanzarote



Récif ludique à Eilat
(Eran Brokovich)



Mais des récifs artificiels pour quoi faire ?

Récifs artificiels avec une double vocation : halieutique et récréative



(Japon; Hubert Ceccaldi)

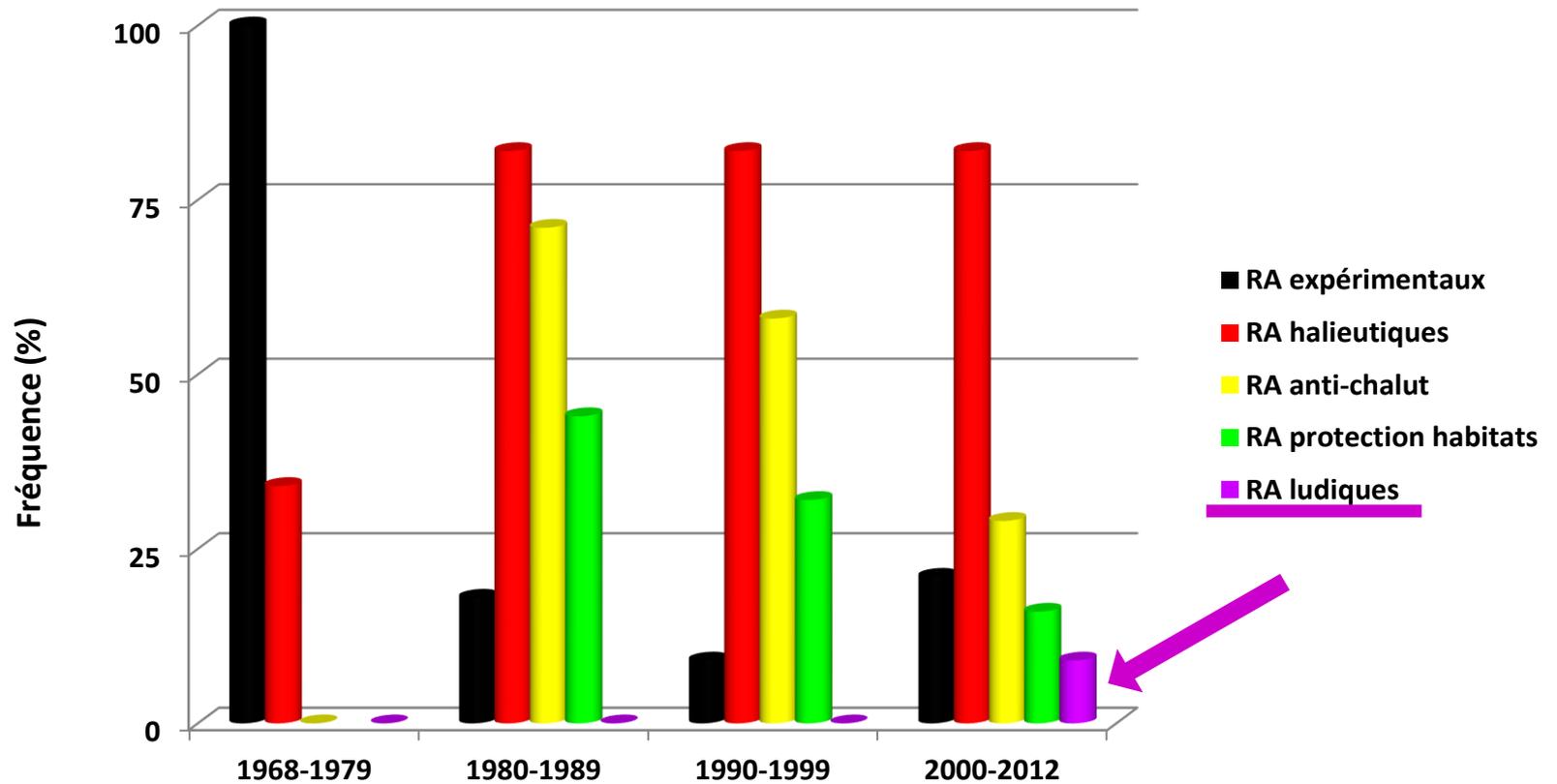
La technologie d'impression 3D ouvre de nouvelles perspectives

(Enrico Dini; D-Shape)



Mais des récifs artificiels pour quoi faire ?

Fréquence (%) des différents objectifs affichés pour les récifs artificiels immergés en France



Quels matériaux ?

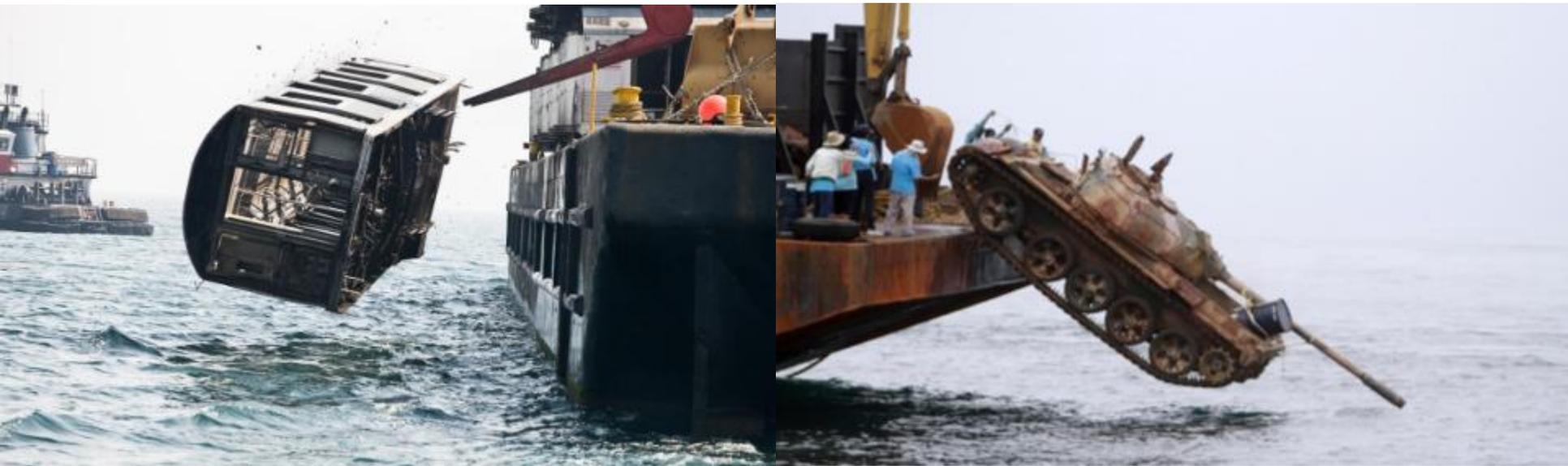
- les premiers récifs artificiels ont surtout été faits avec des matériaux de récupération ou des déchets (arrêt dans les années 80)
 - carcasses de voitures et/ou pneus, débris divers



Récifs de pneumatiques à Golfe Juan, 30 ans après leur immersion

Quels matériaux ?

- les premiers récifs artificiels ont surtout été faits avec des matériaux de récupération ou des déchets (arrêt dans les années 80)
 - carcasses de voitures et/ou pneus, débris divers
 - des wagons, des tanks, *etc.*



<https://www.theinertia.com/surf/new-york-city-drop-subways-into-ocean-as-artificial-reef/?pid=24234>

<https://www.theatlantic.com/photo/2011/04/artificial-reefs-around-the-world/100042/>

Quels matériaux ?

- les premiers récifs artificiels ont surtout été faits avec des matériaux de recyclage ou des déchets (arrêt dans les années 80)
- par la suite, le **béton** a été très majoritairement employé ...
- même si d'autres matériaux sont parfois utilisés comme le métal ou le bambou par exemple



<http://www.fishingworld.com.au/news/artificial-reefs-on-the-way-for-moreton-bay>

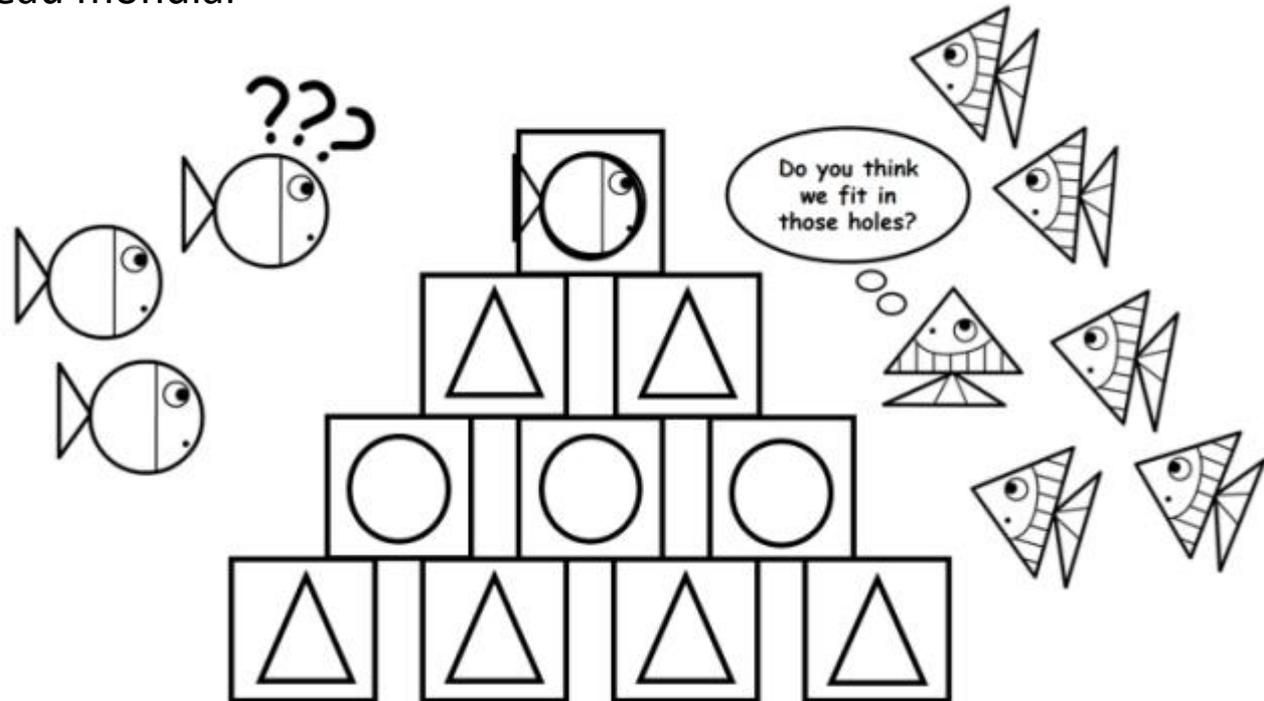


<http://newsinfo.inquirer.net/609386/quezon-goes-artificial-in-fight-to-keep-corals>

Pourquoi un objet immergé deviendra un récif artificiel ?

- la forme, et les matériaux, doivent être adaptés à l'objectif principal : **anti-chalut = stabilité; ludique = attractivité; production = fourniture d'habitats**
- théorie écologique : une espèce a besoin de nourriture et d'un habitat
- la dégradation des habitats est l'une des principales causes de diminution de la biodiversité au niveau mondial

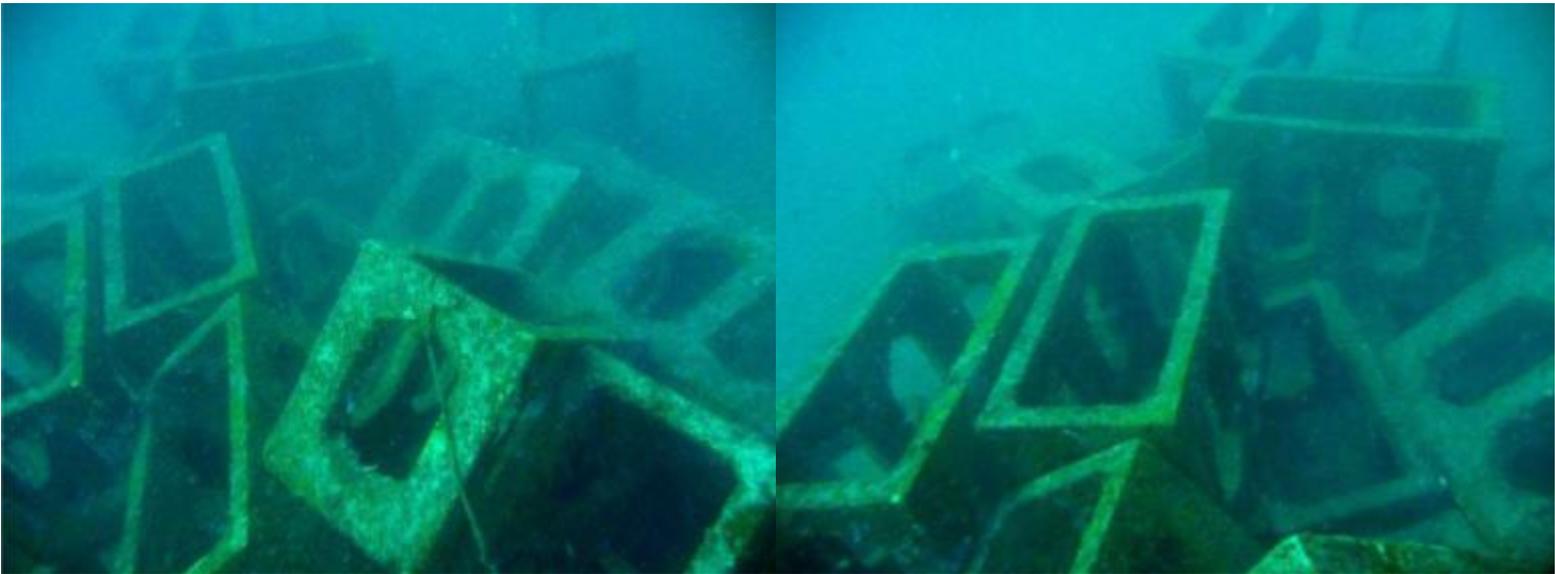
Mais comment recréer des habitats « identiques » aux habitats naturels ?



Mimer les habitats naturels ?

- le recours au béton limite les possibilités !
- certes le coût est réduit car il est possible de couler du béton dans des moules ...
- ... mais la complexité de ces moules est limitée

1^{ère} solution : des modules simples, mais immergés de façon chaotique, en grand nombre



Golfe-Juan; modules de 2 m³ immergés en 1987 (Bodilis et al. 2008)

Mimer les habitats naturels ?

- le recours au béton limite les possibilités !
- certes le coût est réduit car il est possible de couler du béton dans des moules ...
- ... mais la complexité de ces moules est limitée

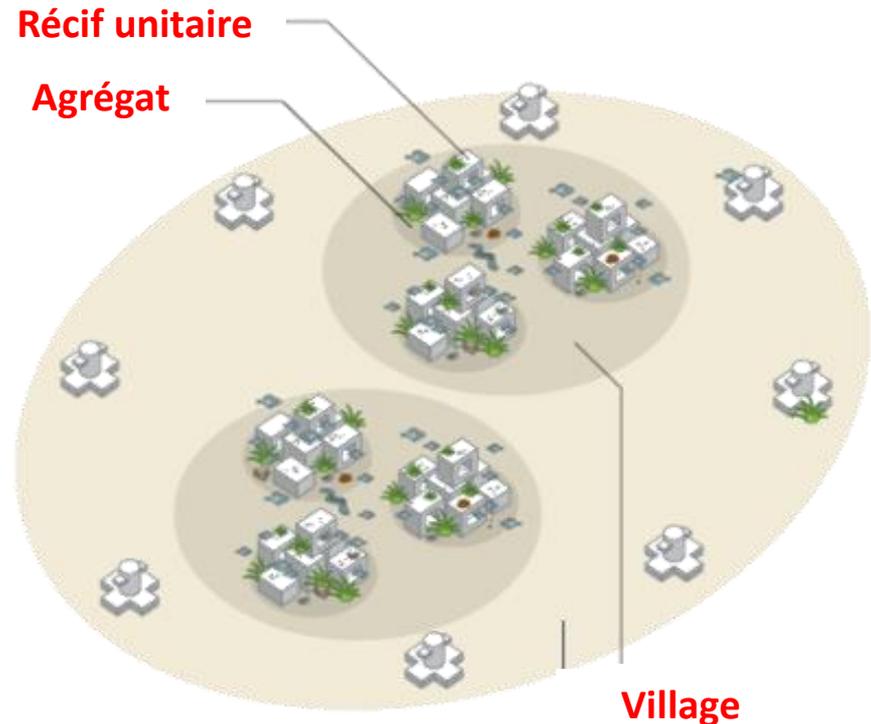
1^{ère} solution : des modules simples, mais immergés de façon chaotique, en grand nombre

2^{ème} solution : diversité de modules et disposition en agrégats et villages

3^{ème} solution : innover et s'affranchir de ces limites



Eco-ingénierie, ingénierie écologique



L'impression 3D, une technologie novatrice

- les imprimantes 3D ne connaissent pas de limites à la complexité architecturale des objets à créer
- 3 étapes : conception d'un modèle numérique 3D, découpage 'logiciel' en tranche, impression tranche par tranche - **c'est l'empilement des couches qui crée le volume**



L'impression 3D, une technologie novatrice

- les imprimantes 3D ne connaissent pas de limites à la complexité architecturale des objets à créer
- 3 étapes : conception d'un modèle numérique 3D, découpage 'logiciel' en tranche, impression tranche par tranche - **c'est l'empilement des couches qui crée le volume**
- début des années 2000 : les premières imprimantes 3D à base de résine chauffée
- les années 2010 voient émerger l'utilisation de nouveaux matériaux : plastique, cire, métal, plâtre, céramique, verre, *etc.*

Le recours aux objets 3D devient assez fréquent après 2010

Skyfall (2012) James Bond et son Aston Martin DB5

Un modèle imprimé en 3D à l'échelle 1:3 sera surimposé numériquement sur les images de l'explosion d'une Porsche 928



(Susson, 2013)

L'impression 3D et les récifs artificiels : bref historique

2012 : premiers récifs artificiels 3D immergés à Bahreïn, faits de dolomite (Sustainable Oceans International, Reef Arabia & D-Shape) - **1 m, 500 kg**



Bahreïn, 1 mois après



Mais les premiers tests en mer de ce matériau révolutionnaire ont été fait en **septembre 2010** à Porto Santo Stefano (Argentario Peninsula; Italie) par **Enrico Dini**

PRELIMINARY TEST INTO SEAWATER



(photos Enrico Dini)

L'impression 3D et les récifs artificiels : bref historique

Après cette initiative concrète, **plusieurs projets présentés, mais non concrétisés**

- a. **Zomparelli & Erioli, septembre 2012** : *30th eCAADe Conference*. Prague, Czech Republic
Erioli & Zomparelli, octobre 2012 : *32nd ACADIA Conference*. San Francisco, USA

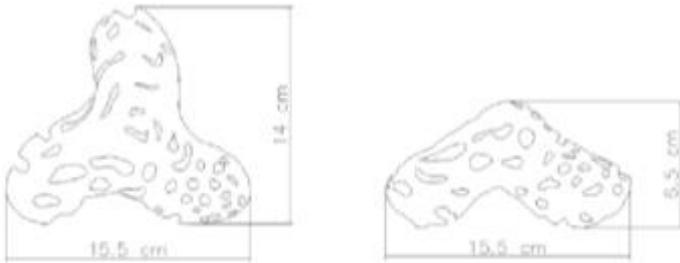


Figure 1. Small scale UPTSAR unit measurements. The left image corresponds to the plan view; the right image corresponds to a front view.

Frau *et al.*, 2016 : structures « ultra-poreuses » imprimés en 3D par D-Shape pour faire office de brise-lames (test en bassin à houle sur des modèles réduits)

- b. **Cabral & Primeau 2015** : Master d'architecture - proposition de réaliser des récifs artificiels à l'aide de l'impression 3D pour remplacer le récif de Osborne (Floride) initialement fait de pneus de voiture

Juin 2014 : un projet prend forme aux Pays-Bas avec la société Boskalis à l'occasion de la visite de S.A.S. le Prince Albert II de Monaco, accompagné de S.E.M. Bernard Fautrier : **imprimer des récifs artificiels à l'aide d'une imprimante 3D**

La genèse du projet et les acteurs



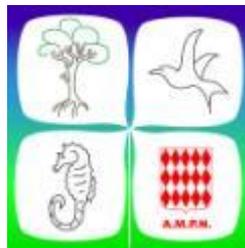
Astrid Kramer et Jamie Lecinski



Enrico Dini



Jacqueline Gautier-Debernardi



S.E.M. Bernard Fautrier

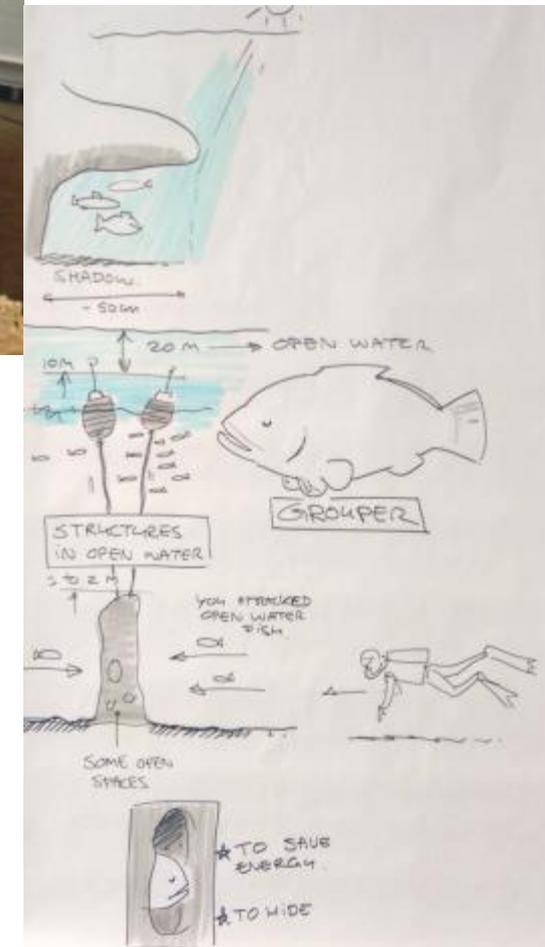


La genèse du projet et les acteurs

mars 2015 : brainstorming



... des premiers éléments de réflexion sur les contraintes pour les espèces ciblées

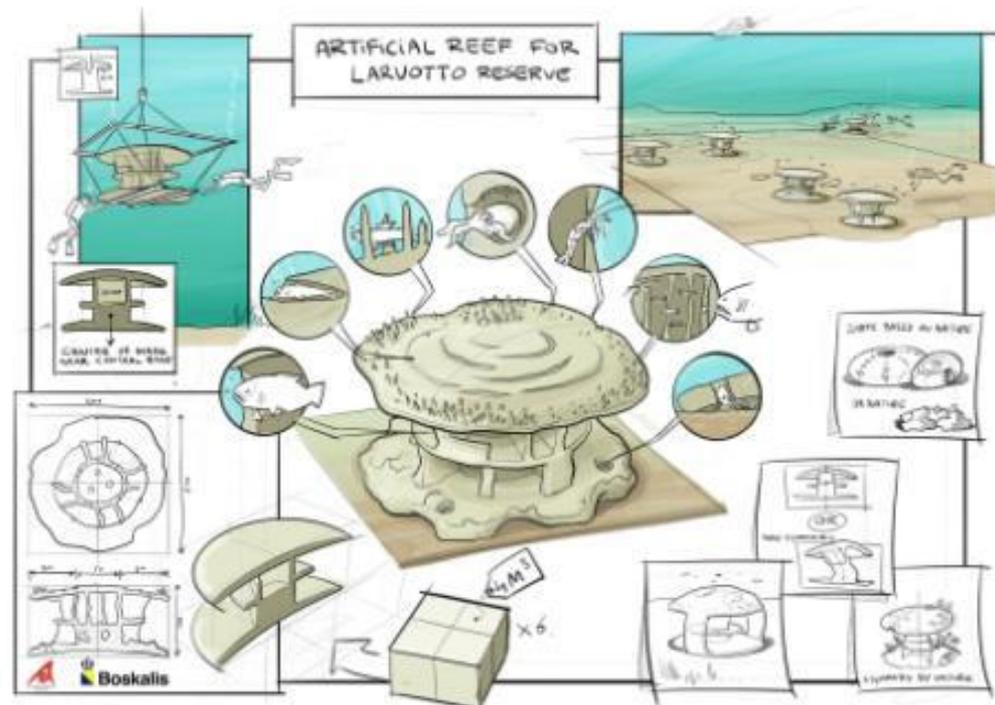


La genèse du projet et les acteurs



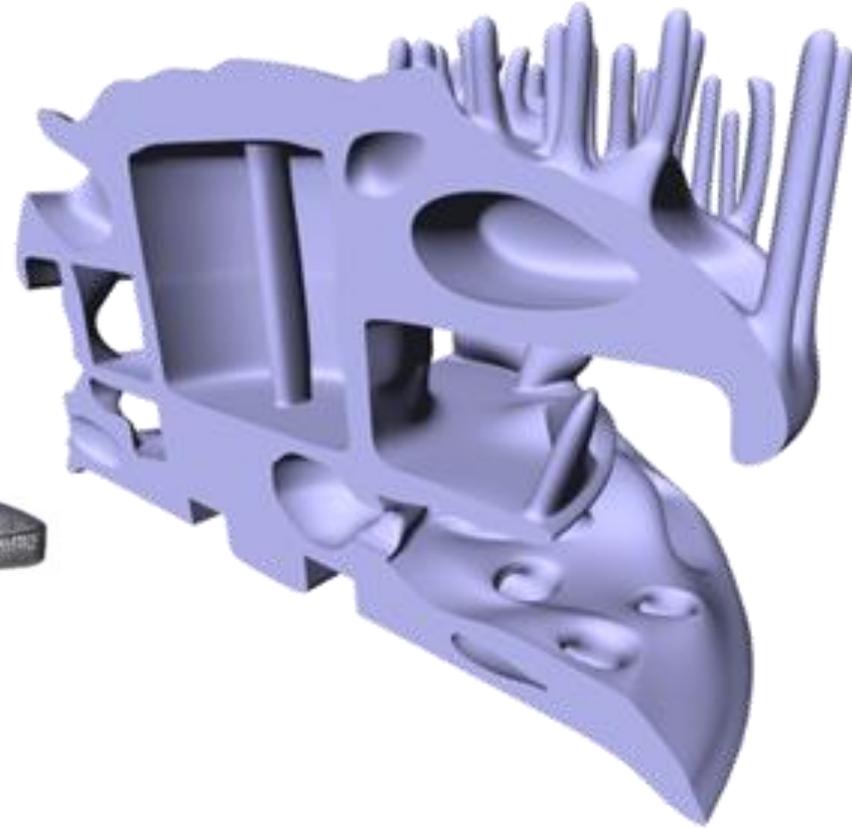
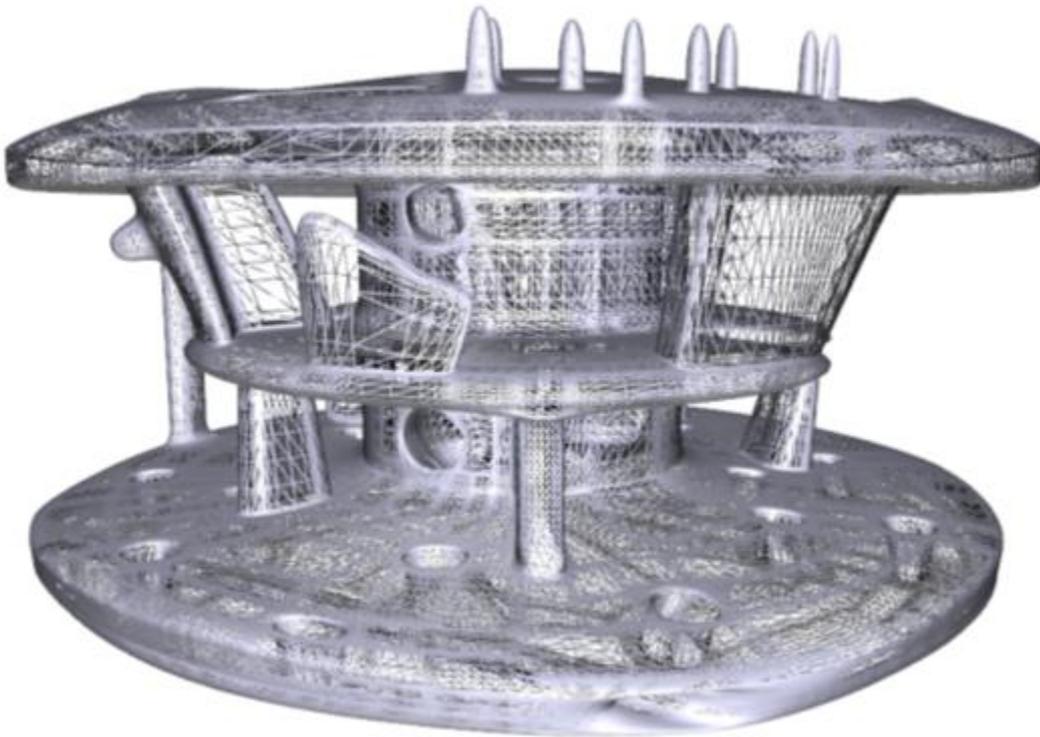
... un premier « modèle » 3D

... avant une ébauche plus avancée du futur récif artificiel 3D !



La genèse du projet et les acteurs

Étape suivante, la réalisation d'un premier modèle numérique



Avant impression, ce modèle a également servi à tester la résistance mécanique de la forme

La genèse du projet et les acteurs

Evolution du design sur des considérations mécaniques :

- amincissement du « chapeau » et du plateau intermédiaire
- ajout de colonnes pour renforcer la stabilité de la partie haute du récif 3D



Amélioration du matériau

Les pré-requis :

- Résistance à l'eau de mer
- Solidité
- Utilisation possible de la technologie d'impression 3D
- Non polluant
- Agrégation du sable de Dolomite
- Séchage rapide



Force de compression

Résistance à la flexion



Impression avec une imprimante 3D



**Imprimante 3 D géante; automatisation du procédé ...
sauf le nettoyage encore manuel**

Des récifs expérimentaux très étudiés

Immersion le 2 novembre 2017 : les premiers récifs 3D en Méditerranée, les plus grands au Monde ... et **les seuls avec un suivi scientifique**

Juin 2016 : 13^{ème} conférence internationale sur les récifs coralliens, Hawaï : présentation de l'expérience lancée à **Monaco** (Kramer A., Francour P., Lescinski J., Gautier-Debernardi J., Dini E.)

Septembre 2017 : IMPAC 4 au Chili (Gautier-Debernardi J., Francour P., Riera E., Dini E., Hubas C., Lamy D., Lescinski J., Tazelaar J.)

Mai 2018 :



Biofilm monitoring as a tool to assess the efficiency of artificial reefs as substrates: Toward 3D printed reefs

Elisabeth Riera^{a,b,*}, Dominique Lamy^b, Christophe Goulard^c, Patrice Francour^a, Cédric Hubas^{b,d}



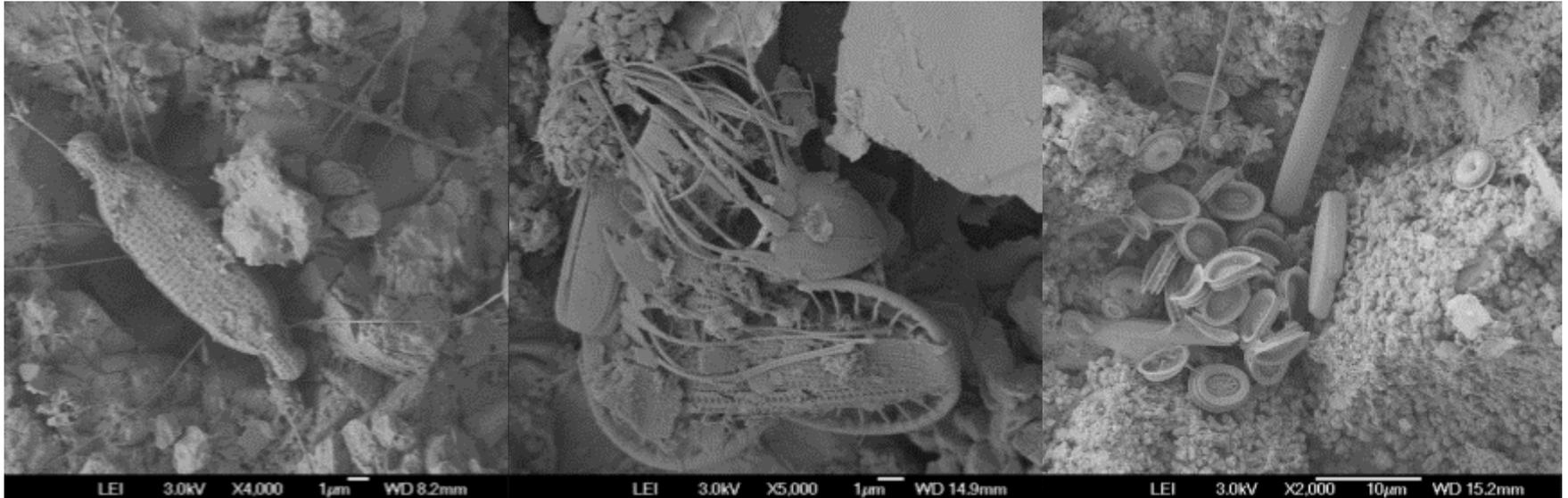
Des récifs expérimentaux très étudiés

Travaux de recherche visant à :

1. étudier le **développement des premières formes de vie** sur le matériau vierge immergé



le biofilm (bactéries et microorganismes insérés dans une couche de protéines qu'ils sécrètent)



Des récifs expérimentaux très étudiés

Travaux de recherche visant à :

1. étudier le **développement des premières formes de vie** sur le matériau vierge immergé



le biofilm (bactéries et microorganismes insérés dans une couche de protéines qu'ils sécrètent)

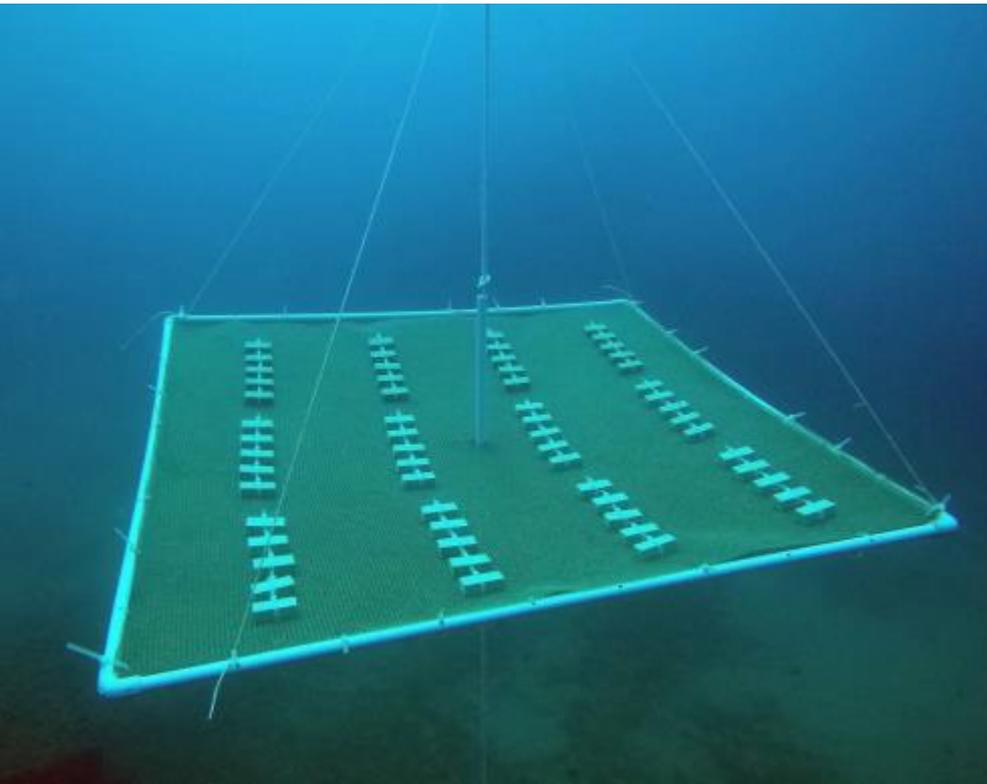


le macrofouling (algues et invertébrés dont les spores ou les larves ont profité du biofilm pour se développer)



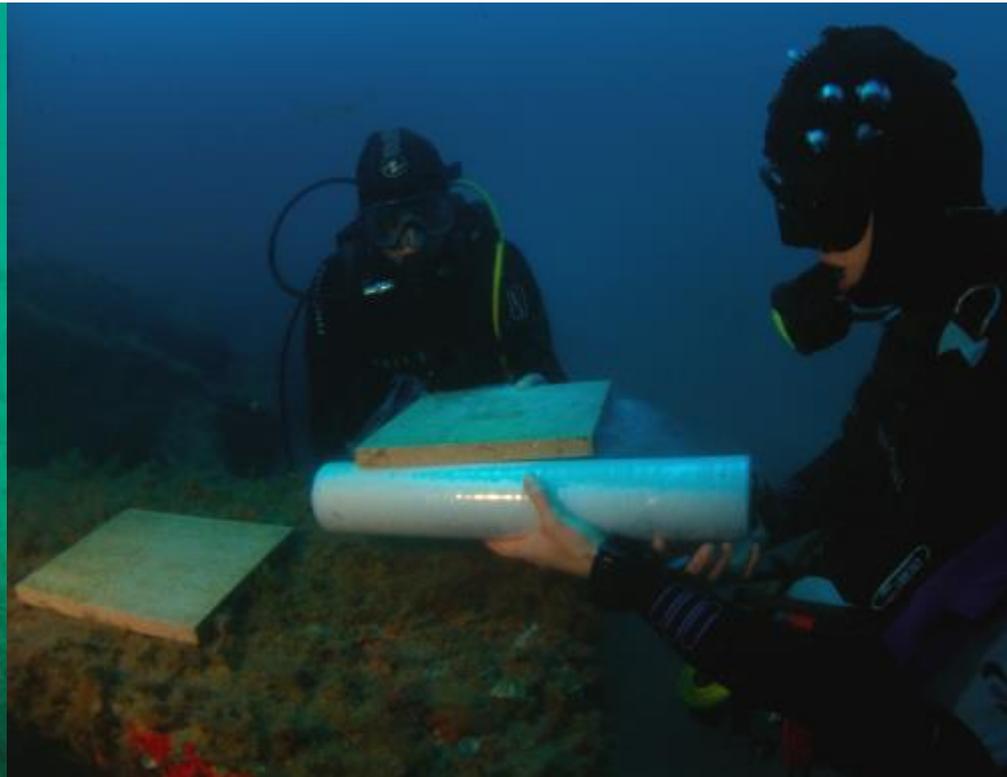
Des récifs expérimentaux très étudiés

Dans les deux cas, **biofilm** et macrofouling, 3 substrats ont été comparés (**roche naturelle, béton et dolomite**) et des centaines d'échantillons ont été préparés. Suivi de **4 semaines** pour le biofilm, de 1 an pour le macrofouling.



Des récifs expérimentaux très étudiés

Dans les deux cas, biofilm et **macrofouling**, 3 substrats ont été comparés (**roche naturelle, béton et dolomite**) et des centaines d'échantillons ont été préparés. Suivi de 4 semaines pour le biofilm, de **1 an** pour le macrofouling.



Des récifs expérimentaux très étudiés

Dans les deux cas, biofilm et macrofouling, 3 substrats ont été comparés (**roche naturelle, béton et dolomite**) et des centaines d'échantillons ont été préparés. Suivi de 4 semaines pour le biofilm, de 1 an pour le macrofouling.

**Données encore en cours d'analyse,
mais que retenir ?**

- une concentration en pigments (organismes photosynthétiques) beaucoup plus élevée sur la dolomite
- une plus faible quantité de sécrétion (adhésion au substrat) sur la dolomite ... en raison de sa forte rugosité
- richesse en espèces dans le macrofouling : roche > dolomite > béton

Des récifs expérimentaux très étudiés

Travaux de recherche visant à :

- quantifier la **complexité tridimensionnelle** des récifs artificiels dans le but de la comparer à celle d'autres récifs déjà immergés ou celle de substrats naturels



développement d'un indice de complexité **quantitatif** utilisable en plongée, sur n'importe quel substrat (récif artificiel, roche naturelle, *etc.*)

Plusieurs paramètres pris en compte :

- la rugosité (surface déployée/surface au sol)
- la porosité (volume vide /volume plein)
- le rapport surface/volume
- la **diversité en cavités**

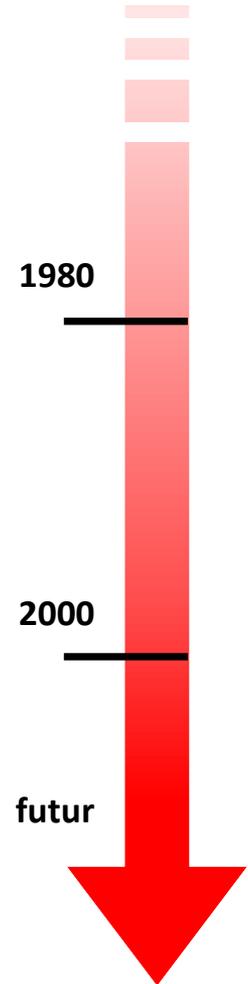


Le récif 3D imaginé présente une diversité en cavités 3 à 9 fois plus élevée que celle des autres récifs artificiels méditerranéens

L'avenir des récifs artificiels

L'histoire des récifs artificiels en 3 phases :

1. immersion d'**objets hétéroclites** (récupération, déchets), souvent toxiques et globalement inadaptés aux objectifs (soutien des pêcheries)
2. développement de **récifs spécifiques**, très majoritairement en **béton**; bons résultats, mais peu d'études sur le lien complexité/efficacité
3. a) l'**éco-ingénierie** et l'intégration des récifs dans un schéma global de **gestion intégrée de la zone côtière**
b) une véritable **évaluation quantitative** de la **complexité** architecturale des récifs immergés en **lien avec les objectifs**



L'avenir des récifs artificiels

Des pistes de développement et de recherche :

- a. **récifs artificiels ludiques** (plongée sous-marine) : encore très peu développés malgré les retombées économiques potentielles
- b. **récifs artificiels de production** associés à des **aires marines protégées**; pêcheurs professionnels en périphérie sur des zones tampon
- c. **récifs artificiels 3D**, oui, **mais pas en béton** : mauvais bilan carbone (0.7 t CO₂ par tonne de ciment), image positive des produits naturels et résultats encourageants en termes de colonisation
- d. **GIZC** : cela implique obligatoirement une **gestion faisant intervenir les usagers**; la **co-gestion** (participation des usagers aux prises de décisions) est **unaniment reconnue dans le monde entier** comme l'avenir des zones côtières

Monaco, précurseur dans le monde des récifs artificiels, a tous les atouts pour se positionner dans ce futur

**Merci de votre
écoute**



Des questions ?

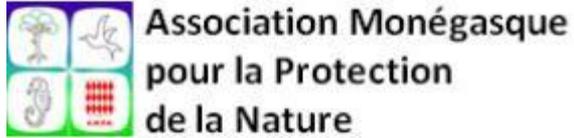


Elisabeth Riera
Doctorante ECOMERS/BOREA



Enrico Dini
Concepteur D-Shape

Remerciements



- Crédits photos :
- Jean-Michel Mille, AMPN
 - Stéphane Jamme, Aquanaute Expertise
 - Hubert Ceccaldi, Académie des Sciences Marseille
 - Enrico Dini, D-Shape
 - Alexis Pey, ECOMERS
 - Patrice Francour, ECOMERS



→ Complexité des structures ?

Développement d'indices de complexité
quantitatif de l'habitat



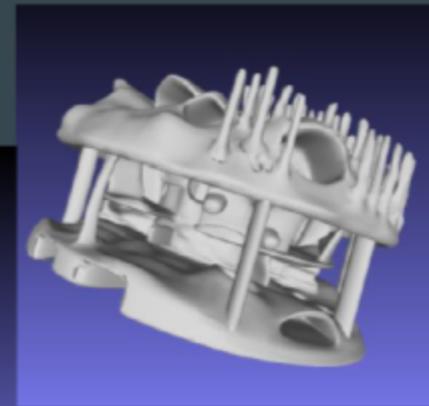
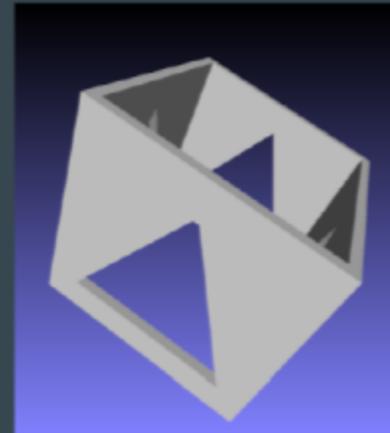
→ Reproduire des modules de récifs artificiels
par modèles numériques

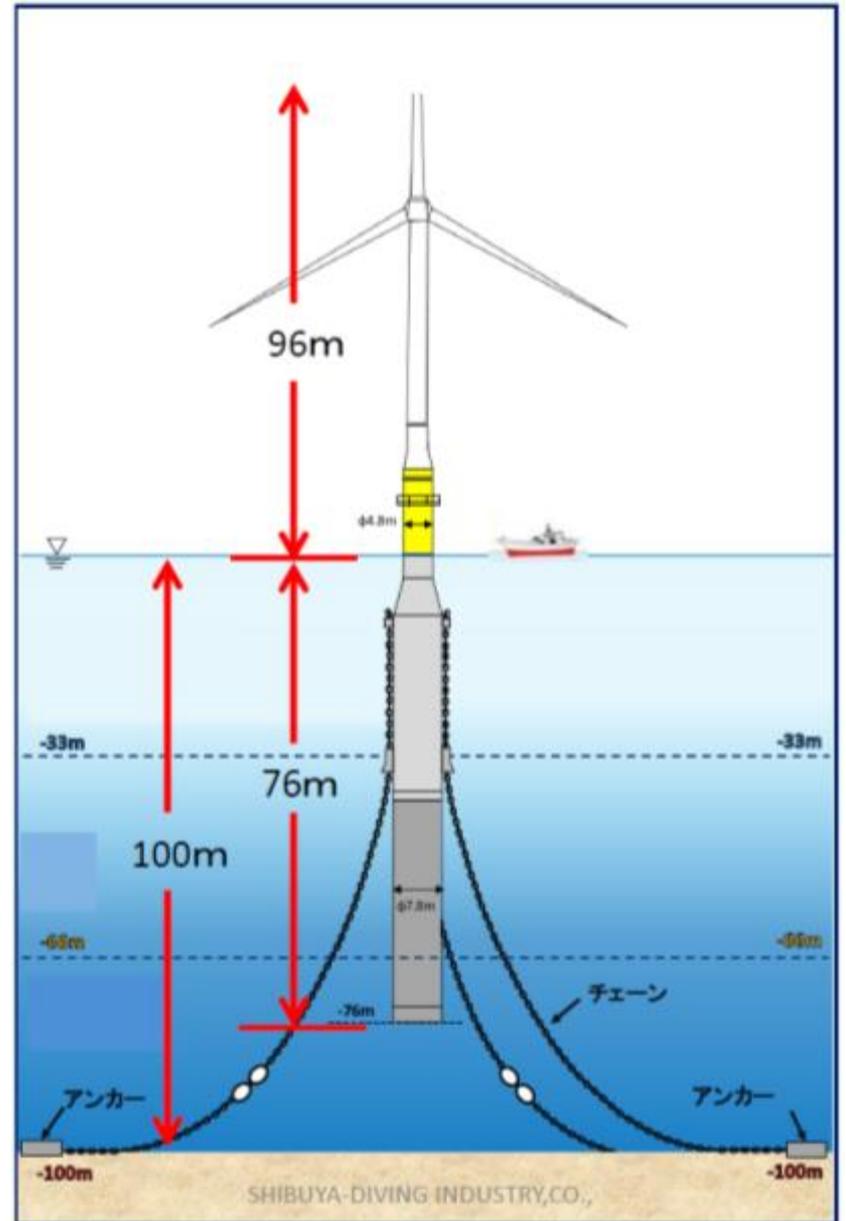


→ Développer un code sur Python pour calculer
la dimension fractale

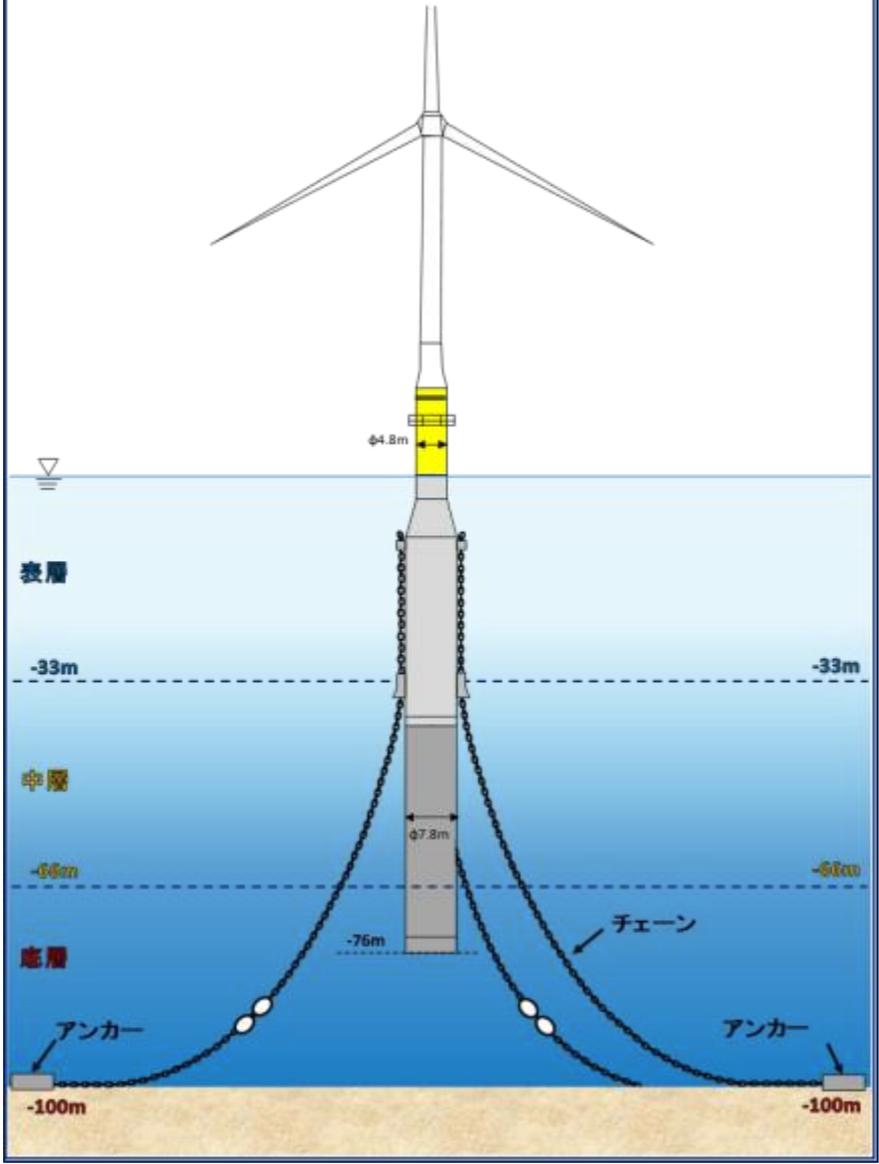


→ Calculer les indices de complexité sur des
logiciels de traitement d'images 3D avec
l'aide d'un stagiaire de L2

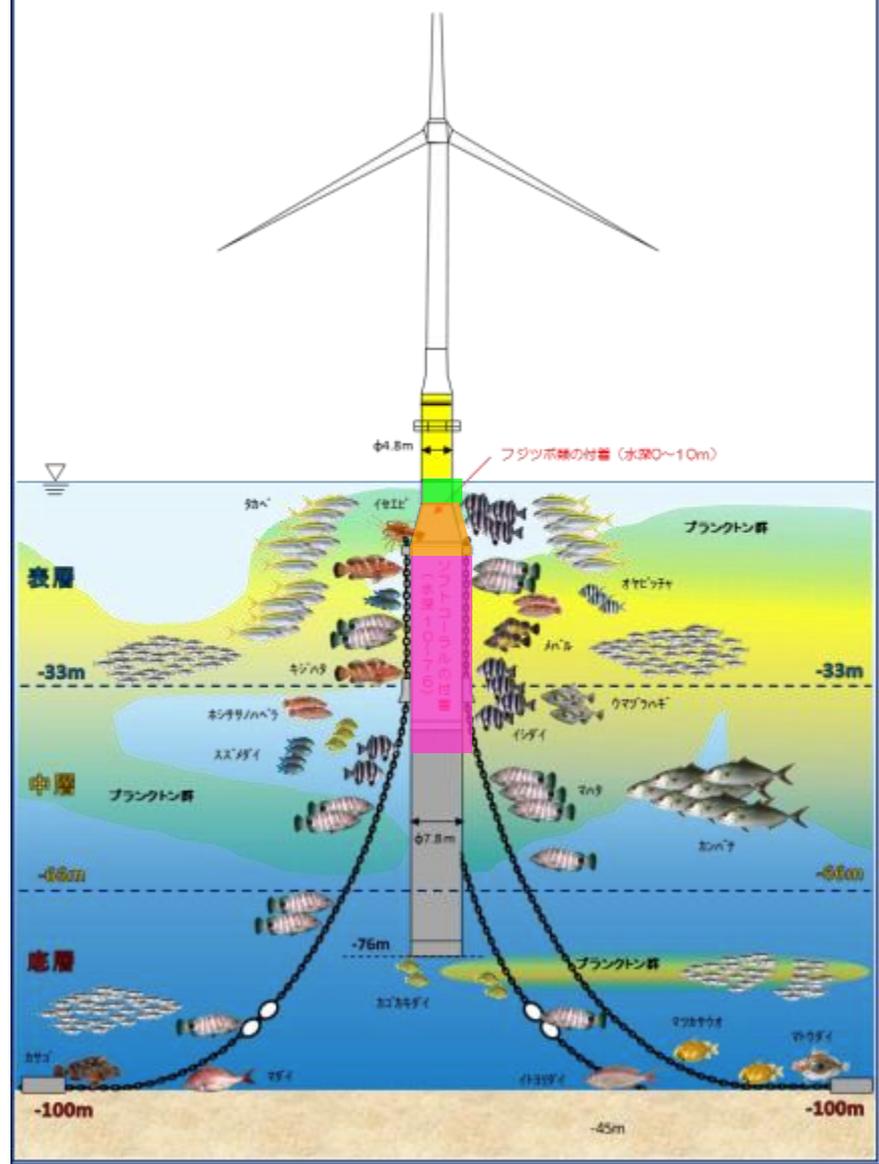




設置直後



一年後



An image of fishery resource environment design around the floating offshorewind device

