



Réalisé par : BARTHELEMY Johanna

Méthode d'évaluation quantitative de la complexité structurale des récifs artificiels



Année universitaire 2015-2016

Sous la direction du Professeur FRANCOUR Patrice

Dans le cadre de la réalisation de mon étude de stage sur la complexité des récifs artificiels, je souhaiterais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce rapport de stage.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Francour Patrice, Directeur du laboratoire ECOMERS et maître de stage, pour sa confiance, son écoute, ses conseils et sa disponibilité à mon égard me permettant d'accomplir un travail enrichissant.

Je remercie également l'Association Monégasque pour la Protection de la Nature et sa Présidente, Madame Jacqueline Gautier-Debernardi pour leur participation à ce projet.

Mes remerciements s'adressent également à toute l'équipe du laboratoire ECOMERS pour leur accueil, leur esprit d'équipe et leur disponibilité.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes amis stagiaires Gagne Laura et Vieux Jean-Vincent qui ont su m'épauler, m'aiguiller et ont rendu ce stage d'autant plus agréable.

Sommaire

1	Introduction.....	4
2	Revue de la littérature scientifique	5
3	Matériels et méthodes	6
3.1	<i>Définition du matériel utilisé.....</i>	6
3.2	<i>Détermination des indices d'évaluation de la complexité.....</i>	7
3.2.1	<i>Indice de complexité C_1 : la rugosité du substrat</i>	7
3.2.2	<i>Indice de complexité C_2 : volume de cavités occupé</i>	8
3.2.3	<i>Indice de complexité C_3 : variété de la taille d'ouverture des cavités.....</i>	9
3.2.4	<i>Indice de complexité C_4 : la disposition des éléments structuraux.....</i>	10
3.2.5	<i>Indice de complexité C_5 : la hauteur de l'architecture</i>	10
3.2.6	<i>Indice de complexité C_6 : l'hétérogénéité de substrat</i>	11
3.3	<i>Présentation des modèles expérimentaux de récifs unitaires.....</i>	11
3.4	<i>Présentation des modèles expérimentaux d'agrégats récifaux</i>	12
3.5	<i>Présentation des modèles de villages de récifs</i>	14
3.6	<i>Méthodes d'évaluation de la complexité appliquées sur différents types de récifs.....</i>	15
3.7	<i>Présentation des milieux naturels expérimentaux.....</i>	16
3.8	<i>Une méthode d'évaluation indépendante de la taille.....</i>	16
4	Résultats.....	17
4.1	<i>Les récifs unitaires</i>	17
4.2	<i>Les agrégats de récifs.....</i>	18
4.3	<i>Les villages de récifs</i>	19
4.4	<i>Comparaison des évaluations de complexité entre milieux naturels et récifs unitaires</i>	19
4.5	<i>Effet de la taille sur les indices de complexité</i>	20
5	Discussion.....	21
6	Conclusion/perspective.....	22
7	Bibliographie	22

Annexes

Résumé/Abstract

1 Introduction

La complexité de l'habitat est souvent définie par différents termes tels que « l'hétérogénéité du substrat » (Menge *et al.*, 1985), « la complexité topographique » (Walters Wethey *et al.*, 1996), ou encore « l'architecture de l'habitat » (Lawton, 1986).

Dès 1961, MacArthur a analysé les relations entre la complexité de l'habitat et la diversité des espèces. Depuis, de nombreuses études en écologie marine ont étudié, à l'échelle locale, les effets positifs de la complexité d'habitats marins sur les richesses spécifiques et les abondances (Risk, 1972 ; Gorman & Karr, 1978 ; Luckhurst & Luckhurst, 1978;. Menge *et al.*, 1985; Dean & Connell, 1987; Roberts & Ormond, 1987 ; Bell *et al.*, 1991;. Heck & Crowder, 1991; Jeffries, 1993; McClanahan, 1994 ; Caley & St John, 1996 ; Downes *et al.*, 1998 ; Horan *et al.*, 2000; Ferreira *et al.*, 2001;. Harding & Mann, 2001 ; Kelaher & Castilla, 2005; Matias *et al.*, 2010). Ceci peut être expliqué par la forte disponibilité de micro-habitats (Mcnett & Rypstra 2000). Cependant, l'importance de la structure de l'habitat n'a pas toujours été reconnue en raison des problèmes de quantification de la complexité structurelle des habitats naturels (McCoy & Bell, 1991).

Les récifs artificiels, outils reconnus de gestion ou de restauration des écosystèmes littoraux, ont pour objectif de protéger et reconstituer les biocénoses marines, d'améliorer la production halieutique mais aussi de mimer les fonctions architecturales et paysagères, souvent complexes, des milieux naturels. Ainsi, l'éco-mimétisme s'attache à concevoir des habitats spécifiques afin d'offrir des abris adaptés à l'éthologie et à la biologie des espèces.

Les récifs artificiels ont été largement déployés pour attirer les poissons dans les zones de faible productivité, en ajoutant simplement de la complexité (Bohnsack *et al.*, 1997, Grossman *et al.*, 1997). Plusieurs expériences ont été menées pour tester les effets de l'augmentation de la complexité des récifs artificiels sur la réponse écologique des espèces (Charbonnel *et al.* , 2002). De plus, la dernière synthèse publiée sur les récifs artificiels en France (Tessier *et al.* , 2015) souligne que la complexité structurale ou complexité tridimensionnelle (3D ci-après) influence fortement la colonisation des récifs artificiels et leur efficacité en tant que nouvel habitat pour les espèces animales vagiles (poissons, crustacés en particulier). Or, comme le soulignent ces auteurs, l'évaluation de la complexité des récifs artificiels n'a encore jamais été réalisée de façon

quantitative et standardisée. Cette évaluation est généralement semi-quantitative (variable discrète allant de 1 à 5).

Par conséquent, mon stage au sein du laboratoire ECOMERS (Ecosystèmes Côtiers Marins et Réponses aux Stress) situé à l'Université Nice Sophia Antipolis a cherché à développer une méthode d'estimation de la complexité 3D des récifs artificiels, quel que soit leur arrangement (récif unitaire, agrégat de récifs et villages de récifs).

Pour cela, dans un premier temps, une synthèse des différentes méthodes semi-quantitatives d'évaluation existantes en mer a été réalisée. Cela a permis d'identifier les principales variables permettant de quantifier le degré de complexité de l'habitat pour proposer des indices de complexité. Ces indices de complexité ont ensuite été appliqués sur les principaux types de récifs artificiels (récif unitaire, récifs en agrégats et village de récifs) déployés en Méditerranée française. A titre de comparaison, des estimations ont également été faites sur quelques milieux naturels.

2 Revue de la littérature scientifique

Les évaluations semi-quantitatives de la complexité de l'habitat reposent sur différentes méthodes ; il est donc difficile d'en tirer des conclusions générales (Risk *et al.*, 1972; Gorman & Karr, 1978; Luckhurst & Luckhurst, 1978; Roberts & Ormond, 1987; Gorham & Alevizon, 1989; McClanahan *et al.*, 1994; Caley & St John, 1996; Horan *et al.*, 2000; Ferreira *et al.*, 2001; Harding & Mann, 2001). Le seul point commun de ces méthodes diverses est le recours à une échelle semi-quantitative : une échelle arbitraire entre 0 et 5. L'incertitude liée à ces méthodes fait qu'il est difficile, d'un auteur à l'autre, de comparer les évaluations réalisées..

La complexité est définie comme étant « constituée de plusieurs parties, différentes et connectées entre elles » d'après l'Oxford English Dictionary. Par conséquent, l'évaluation de la complexité de l'habitat nécessite la prise en compte de plusieurs variables. D'après les différentes méthodes semi-quantitatives employées pour évaluer la complexité de l'habitat, il existe au moins six éléments reconnus de complexité qui sont : la variété de taille des cavités de refuge (Roberts & Ormond, 1987), la rugosité du substrat (Risk, 1972; Roberts & Ormond, 1987; Jennings *et al.*, 1996; Ohman

& Rajasuriya, 1998), l'hétérogénéité du substrat (Ohman & Rajasuriya, 1998), la hauteur de l'habitat (Luckhurst & Luckhurst, 1978; Molles, 1978), la disposition des éléments structuraux (Tokeshi & Arakaki, 2011) et le volume de cavités occupé (Ruitton *et al.*, 1999). Il est très important de prendre conscience que d'une manière générale, les auteurs examinent seulement une à deux des variables sur les six citées précédemment.

La rugosité est corrélée positivement avec la richesse des espèces de poissons dans la plupart des études, mais la relation entre la richesse des espèces de poissons et les autres variables de complexité n'a pas été toujours mise en évidence. Des méthodes différentes sont généralement utilisées pour des habitats différents. Par exemple, une chaîne épousant la forme d'un récif est un moyen approprié pour mesurer approximativement la complexité des récifs (rugosité), mais dans le cas d'un herbier de phanérogames, la hauteur des faisceaux et la densité seraient des mesures plus appropriées.

Par ailleurs, il a été démontré que les structures ayant des morphologies plus complexes n'ont pas forcément des surfaces supérieures (Sher-Kaul *et al.*, 1995, Warfe *et al.*, 2008). Un certain nombre d'études ont manipulé la complexité de l'habitat tout en maintenant une surface constante et ont trouvé que les espèces répondaient à la structure de l'habitat indépendamment de la surface, de la taille et de l'architecture (Warfe *et al.*, 2008). À l'échelle du patch, la complexité de l'habitat peut accroître la richesse en espèces et les effets de la taille des parcelles illustrent l'importance de l'habitat à différentes échelles spatiales, indépendamment de la surface du substrat (Taniguchi *et al.*, 2003; Matias *et al.*, 2010).

L'objectif du présent travail étant de proposer une méthode d'évaluation quantitative de la complexité structurale des récifs artificiels, il convient donc de considérer les six éléments reconnus de la complexité de l'habitat et de développer des indices indépendants de la taille/surface des habitats considérés.

3 Matériels et méthodes

3.1 Définition du matériel utilisé

Un récif unitaire est un module, une unité de base indivisible. Un agrégat de récifs correspond à un ensemble de récifs unitaires. Par convention, la distance maximale entre deux récifs unitaires doit être inférieure ou égale à la moyenne des rayons des deux modules unitaires. Au-delà, nous

passerons dans la catégorie « village de récifs ». Un village de récifs est un ensemble d'agrégats récifaux séparés les uns des autres par des distances supérieures au diamètre moyen des agrégats.

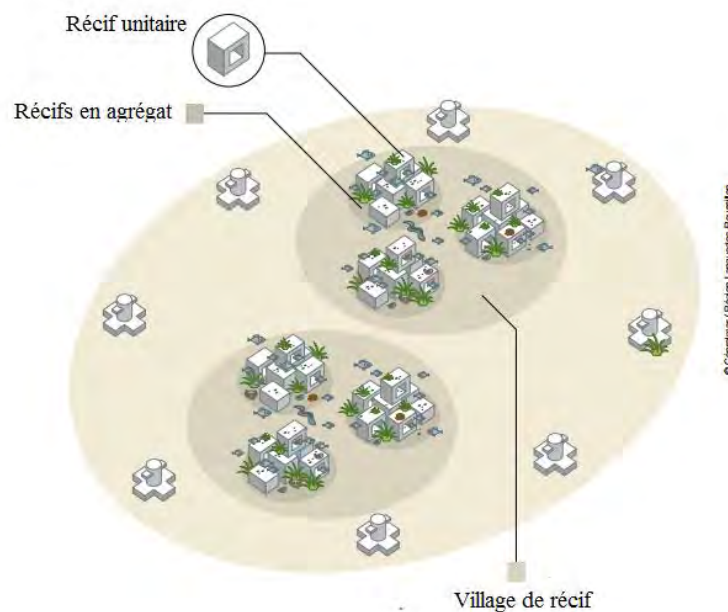
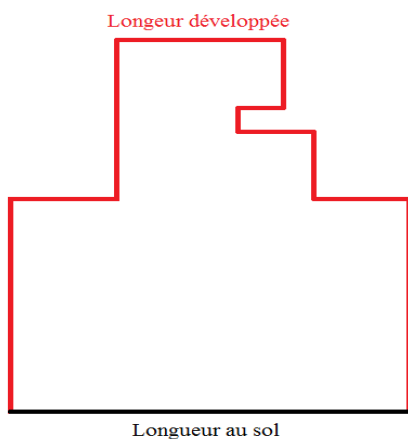


Figure 1 : Illustration définissant un récif unitaire, un agrégat de récifs et un village de récifs

3.2 Détermination des indices d'évaluation de la complexité

3.2.1 Indice de complexité C_1 : la rugosité du substrat

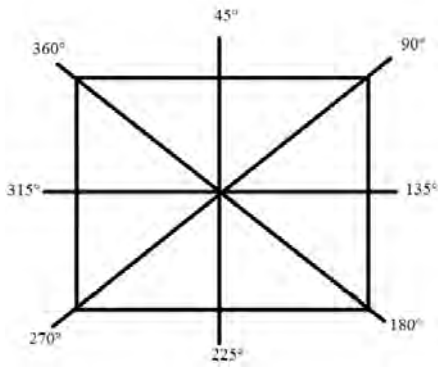


La rugosité est un indice qui intervient pour caractériser une architecture, une dimension de complexification à l'échelle du récif unitaire. Une surface lisse a une complexité considérée à priori comme nulle. Mais la création de cavités sur cette surface crée une certaine complexité. Un récif possédant beaucoup de cavités a une longueur développée très importante par rapport à sa longueur au sol. Il a alors été proposé l'indice suivant pour évaluer une des variables de complexité de ce module (Figure 2).

Figure 2 : Mesure de la rugosité sur un récif unitaire. La zone colorée correspond à la partie de la même couleur dans la formule de calcul (voir texte.)

$$\text{Rugosité} = \frac{\text{Longueur développée}}{\text{Longueur au sol}}$$

Un module unitaire ayant 3 dimensions, une seule mesure de la rugosité ne suffit donc pas pour mesurer la complexité proche. Par conséquent, une mesure de rugosité est faite tous les 45° en se plaçant au dessus et au centre du récif artificiel (Figure 3). La rugosité d'un récif unitaire est donc



calculée à partir de la moyenne des 8 mesures réalisées. La variance, ou plus exactement l'écart-type de cette série de mesures apporte un élément supplémentaire d'information sur la complexité du récif unitaire. Un premier indice de complexité C_1 est donc défini ainsi :

Figure 3 : Mesure de rugosité tous les 45°

$$C_1 = \text{moyenne des 8 valeurs de rugosité} + \text{écart type}$$

Par convention, seules les cavités d'une profondeur supérieures à 0,3m de profondeur ont été prises en compte dans les calculs. Les cavités de taille inférieure ont certainement un rôle écologique, mais leur prise en compte pourrait complexifier trop fortement les calculs.

3.2.2 Indice de complexité C_2 : volume de cavités occupé

Le volume du récif artificiel est une donnée importante du dimensionnement de l'ouvrage mais c'est surtout l'espace de vide qui pourrait être utilisé par les espèces vagiles qui a une signification écologique. En effet, les espèces ont besoin de telles cavités au sein d'un récif unitaire pour se développer, se cacher, se protéger ou encore se reproduire. Un volume de vide dans un récif artificiel traduira alors une faible complexité. Pour tenir compte de cela, l'indice de complexité C_2 été proposé :

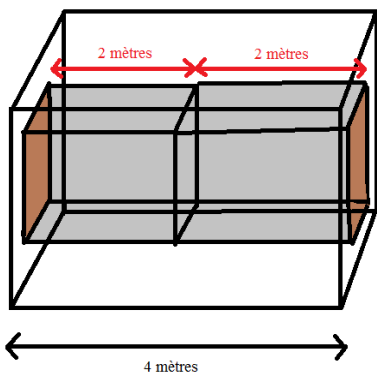
$$C_2 = \frac{\text{volume de vide}}{\text{volume enveloppe}}$$

où : volume de vide représente l'ensemble des volumes de cavités pouvant abriter un organisme marin et volume enveloppe correspondant au volume total extérieur du récif artificiel.

Les cavités peuvent être des espaces fermés avec des parois de chaque coté hormis l'ouverture, ou des espaces ouverts, traversants. Un organisme marin pourra accéder aux premières par un seul coté (l'ouverture) ou par deux cotés dans le deuxième cas (Figure 4) :



Figure 4 ci-contre : Récif artificiel unitaire possédant des cavités dites ouvertes ou traversantes (cercles rouges). Les flèches symbolisent l'entrée possible d'un organisme dans la cavité.



Dans le cas d'une cavité traversante au sein d'un même module unitaire, par convention deux cavités seront considérées, chacune ayant une profondeur égale à la moitié de la profondeur totale. (Figure 5).

Figure 5 ci-contre : Illustration d'une cavité traversante dans un module unitaire.

3.2.3 Indice de complexité C_3 : variété de la taille d'ouverture des cavités

Si les cavités ont toutes des tailles d'ouverture égales, la capacité du récif artificiel à recruter des organismes marins sera plus faible que si les cavités présentes sur un récif artificiel ont des tailles d'ouverture différentes. En effet, la diversité en taille d'ouverture et profondeur permettra l'installation ou la présence d'une plus grande diversité d'organismes marins. La diversité des cavités est donc un indice de complexité. Un indice C_3 est donc proposé pour tenir compte de cette diversité. Cependant, afin de faciliter les calculs associés, il n'est pris en considération dans l'indice C_3 que la variation des tailles d'ouvertures, sans tenir compte de leur profondeur.

L'indice de Shannon est un indice permettant de mesurer la diversité spécifique. Il permet d'exprimer la diversité en prenant en compte le nombre d'espèces et l'abondance des individus au sein de chacune de ces espèces. Ainsi, une communauté dominée par une seule espèce aura une diversité moindre qu'une communauté dont toutes les espèces sont co-dominantes. La valeur de l'indice varie de 0 (une seule espèce) à $\log S$ (lorsque toutes les S espèces ont même abondance).

Dans le cas des récifs artificiels, le nombre d'individus d'une espèce est remplacé par le nombre de cavités d'un type donné. Prenons l'exemple suivant : si un récif unitaire possède 10 cavités de diamètre 0,2 mètres et 4 cavités de diamètre 0,3 mètres alors deux types de cavités seront considérés : 10 cavités du type 1 et 4 cavités du type 2.

L'indice C_3 se calcule alors comme suit :

$$\text{Indice de complexité } C_3 = - \sum_{i=1}^S p_i \log p_i$$

où :

- p_i = abondance proportionnelle ou pourcentage d'importance d'un type de cavités $p_i = n_i/N$
- n_i = nombre de cavités du type i sur un récif unitaire
- N = nombre total de cavités de tous les types sur un récif unitaire
- S = nombre de cavités considérées

Whittaker (1972) a proposé que la diversité spécifique bêta soit calculée à partir d'un modèle multiplicatif ; plus récemment, Lande (1996) a suggéré de la calculer à partir d'un modèle additif. Les indices de complexité C_2 et C_3 concernent la même composante, les cavités : ils ont donc été additionnés.

L'indice C_1 se réfère à une notion de surface alors que C_2 et C_3 à une notion de volume. Le premier influencera donc écologiquement plus les organismes benthiques et les deux autres les organismes mobiles. Toutefois, chacune de ces trois variables renseigne sur le degré de complexité d'un récif unitaire. La contribution de chaque indice à la complexité totale d'un récif unitaire a été recherchée à l'aide d'une Analyse en Composantes Principales (ACP).

3.2.4 Indice de complexité C_4 : la disposition des éléments structuraux

Les modules unitaires mis en agrégats ou les villages de récifs apportent un niveau de complexité supplémentaire qu'il faut donc prendre en compte. La distance entre éléments structuraux en particulier est très importante. Pour les récifs en agrégats deux modules collés l'un à l'autre (distance nulle) auront une complexité supplémentaire faible, voire nulle. A l'inverse, deux modules espacés d'une distance non nulle auront une complexité plus élevée. Par convention, la différence entre un agrégat de récifs et un village de récifs est liée à la distance séparant deux ensembles (voir chapitre 3.1) : pour les récifs en agrégat, la distance mesurée entre deux récifs unitaires est inférieure ou égale à la moyenne des rayons de chaque module. Pour mesurer la complexité d'un

agrégat de récif, l'indice I_c est proposé :
$$I_c = \frac{D}{\frac{(Ra+Rb)}{2}}$$

où :

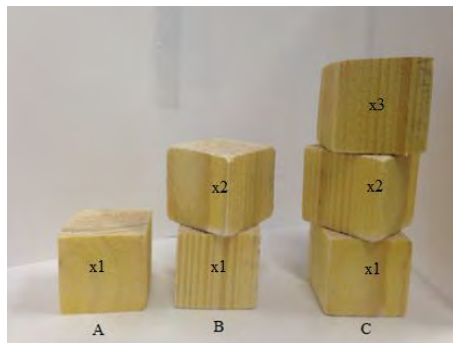
- D = distance entre le récif a et le récif b
- Ra et Rb = rayon du récif a et rayon du récif b

Tous les I_c possibles sont alors calculés entre tous les récifs unitaires pris deux à deux au sein d'un agrégat. Si l'agrégat de récifs compte plusieurs niveaux superposés, cela est calculé couche par couche. L'indice C_4 est alors la moyenne des I_c calculés pour un niveau donné.

3.2.5 Indice de complexité C_5 : la hauteur de l'architecture

Dans le cas d'un agrégat de récifs sur plusieurs niveaux (Figure 6), il est alors nécessaire de combiner les indices C_4 calculés par niveau. En effet, l'ajout d'un niveau supplémentaire provoque une augmentation de la complexité. Une pondération permet alors de tenir compte de la structure par niveau. Par convention, une monocouche aura une pondération C_5 de 1 (multiplication par 1), la

deuxième couche aura une pondération de 2 (multiplication par 2), la troisième couche aura une pondération de 3 (multiplication par 3), etc.



A : une couche
B : deux couches
C : trois couches

Figure 6 ci-contre : Illustration de la notion de niveau au sein d'un agrégat. (source personnelle)

Si le dernier niveau n'est occupé que par un seul récif unitaire (voir C sur la figure 6), l'indice C_4 est nul puisqu'il n'y a pas de distance entre récifs unitaires. Toutefois, ce récif au sommet apporte une complexité supplémentaire. Ainsi, pour avoir une valeur de complexité représentative de la réalité, par convention, une valeur de 1 a été ajoutée à chaque niveau.

Ainsi, la grandeur $(1 + C_4) * C_5$ représentera la complexité d'un niveau donné au sein d'un agrégat, avec C_5 augmentant de 1 à chaque niveau depuis 1 (premier niveau) jusqu'à n ($n^{\text{ième}}$ niveau).

Pour le village de récifs, par convention, au-delà d'une distance de 20 mètres, il a été décidé par convention qu'il n'y avait plus de déplacement orienté pour les espèces entre les agrégats. Par conséquent, aucune complexité supplémentaire n'est apportée au-delà de 20 m de distance.

3.2.6 Indice de complexité C_6 : l'hétérogénéité de substrat


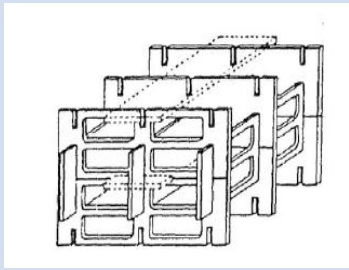
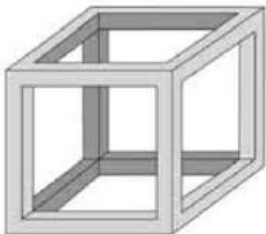
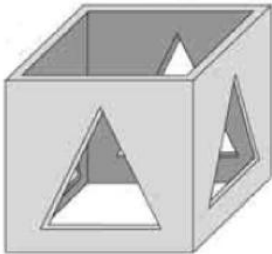


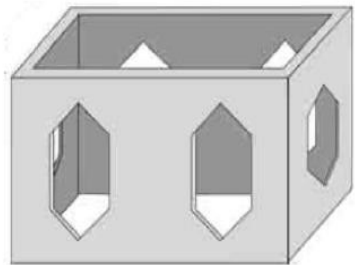
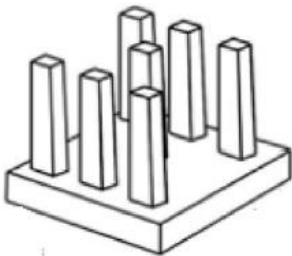
L'hypothèse de l'hétérogénéité de l'habitat (MacArthur & MacArthur, 1961) apparaît être particulièrement pertinente pour expliquer la diversification de la composition taxinomique dans un milieu donné. Ce concept stipule qu'une augmentation de la diversité des habitats peut mener à une augmentation de la diversité spécifique. Trouver un indice démontrant que plus un milieu est hétérogène plus il est complexe n'est pas quelque chose de simple. Cependant, calculer un coefficient de variabilité à partir de valeurs obtenues par les indices précédents est quelque chose de facile : plus le milieu sera hétérogène et plus le coefficient de variabilité sera élevé. Par conséquent, l'indice C_6 calqué sur la formule d'un coefficient de variation est proposé :

$$C_6 = \frac{\text{cart type}}{\text{moyenne des indices M2 (voir chapitre 3.6)}} \times 100$$

3.3 Présentation des modèles expérimentaux de récifs unitaires

Même si l'immersion de récifs unitaires est rare en Méditerranée, en dehors des récifs *Bonna*, le degré de complexité apportée par un module unitaire a toutefois été calculé pour huit types courants de récifs unitaires utilisés en Méditerranée française (Table 1).

Table 1 : Caractéristiques des modèles de récifs unitaire considérés (Tessier *et al.*, 2015)

Illustration	Nom et dimensions	Illustration	Nom et dimensions
 <p>source : c G. Fourneau</p>	<p><u>Bonna pipe</u></p> <p>Diamètre = 1,2m Hauteur = 1m</p>	 <p>source : (Duval-Mellon 1987)</p>	<p><u>Bonna</u></p> <p>Hauteur = 4,4m Longueur = 6m Largeur = 6m</p>
 <p>Source : (Charbonnel & Serre 1999)</p>	<p><u>Cube 1m³</u></p> <p>Hauteur = 1m Longueur = 1m Largeur = 1m</p>	 <p>Source : (Charbonnel & Serre 1999)</p>	<p><u>Cube 1.4m³</u></p> <p>Hauteur = 1m Longueur = 1,2m Largeur = 1,2m</p>
 <p>source : (Charbonnel & Bachet 2010)</p>	<p><u>Alveolar Pyramidal</u></p> <p>Hauteur = 2,5m Longueur=2,5/1,45m Largeur = 2,9/1,85m</p>	 <p>source : (Charbonnel et al. 2011)</p>	<p><u>Maze</u></p> <p>Hauteur = 2,2m Longueur = 4m Largeur = 2m</p>
 <p>Source : (Charbonnel & Serre 1999)</p>	<p><u>Cube 2m³</u></p> <p>Hauteur = 1,25m Longueur = 1,7m Largeur = 0,9m</p>	 <p>source : (Charbonnel & Bachet2010)</p>	<p><u>Falkir electric piles</u></p> <p>Hauteur = 1,6m Longueur = 2,5m Largeur = 2,5m</p>


3.4 Présentation des modèles expérimentaux d'agrégats récifaux

L'immersion de récifs en agrégat est au contraire plus fréquente en Méditerranée. A titre d'exemple, l'application des différents indices proposés a été faite sur des maquettes de récifs fictives à l'aide

de cubes en bois de tailles variées (Table 2), en considérant 3 types de récifs unitaires (A, B et C) représentés par :

- 10 cubes de type A : Hauteur : 4 cm, Longueur : 4 cm, Largeur : 4 cm
- 10 cubes de type B : Hauteur : 4cm, Longueur : 6cm, Largeur : 4cm
- 10 cubes de type C : Hauteur : 4cm, Longueur : 8cm, Largeur : 4cm

Table 2 : Présentation des modèles expérimentaux de récifs en agrégat (sources personnelles)

Illustration	Nombre de cubes associés	Illustration	Nombre de cubes associés
	<u>Agrégat 1 (A1) :</u> 10 cubes de type A		<u>Agrégat 2 (A2) :</u> 10 cubes de type A
	<u>Agrégat 3 (A3) :</u> 10 cubes de type A		<u>Agrégat 4 (A4) :</u> 10 cubes de type A
	<u>Agrégat 5 (A5) :</u> 10 cubes de type A		<u>Agrégat 6 (A6) :</u> 5 cubes de type A 2 cubes de type C 3 cubes de type B
	<u>Agrégat 7 (A7) :</u> 10 cubes de type A		<u>Agrégat 8 (A8) :</u> 10 cubes de type A

Pour rendre possibles les calculs, chaque type de cube (A, B ou C) a été associé à un récif unitaire précis (Figure 7). Même si les agrégats considérés (Figure 6) ne sont pas représentatifs de la réalité, cela permettait de calculer des indices de complexité au niveau des agrégats.

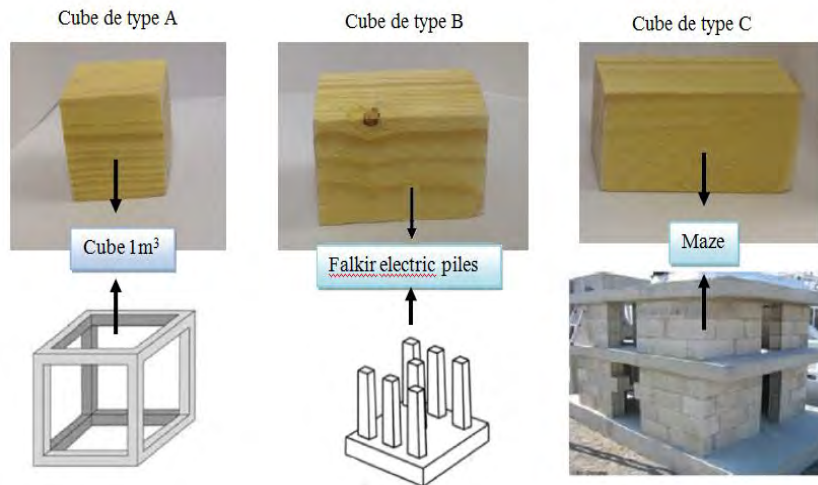


Figure 7 : Association des types de cubes A, B et C à différents modules unitaires déployés en Méditerranée française.

3.5 Présentation des modèles de villages de récifs

Des modèles de villages ont été établis à partir des maquettes précédentes d'agrégat (1 à 8 ; Table 2) et d'une nouvelle maquette de récifs en agrégat, l'agrégat 9 (A9) composé de cubes de type A (Figure 8). Au total, 4 types de villages ont été arbitrairement définis (Table 3).

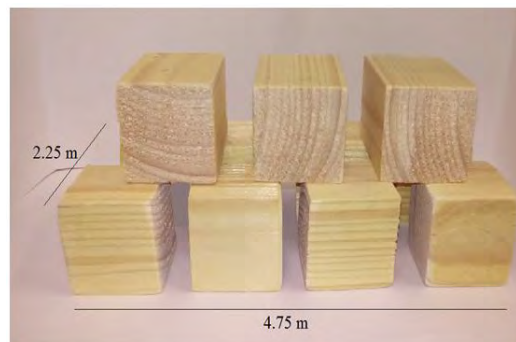
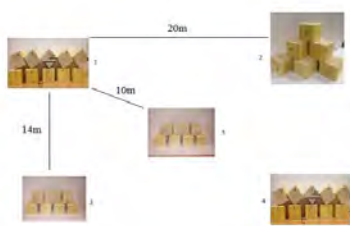


Figure 8 : Représentation de la maquette de récifs en agrégat A9 utilisée pour les villages de récifs

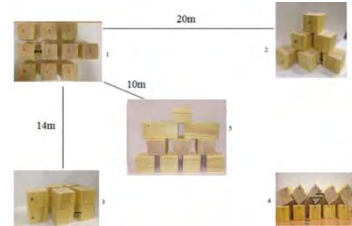
Table 3 : Présentation des modèles expérimentaux des villages de récifs

Illustration	Nom et types d'agrégats composant chaque village	Illustration	Nom et types d'agrégats composant chaque village
	<p><u>Village 1</u></p> <p>5 agrégats correspondant à l'agrégat 9 (A9) = 5 agrégats A9</p>		<p><u>Village 2</u></p> <p>3 agrégats A9 2 agrégats A3</p>



Village 3

- 2 agrégats A9
- 2 agrégats A3
- 1 agrégat A5



Village 4

- 1 agrégat A3
- 1 agrégat A5
- 1 agrégat A6
- 1 agrégat A7
- 1 agrégat A4

3.6 Méthodes d'évaluation de la complexité appliquées sur différents types de récifs

Les indices de complexité C₁, C₂, C₃, C₄, C₅ et C₆ présentés précédemment ont été combinés de façon à évaluer la complexité des récifs unitaires, des agrégats et des villages (Table 4).




Table 4 : Présentation des indices composites M₁, M₂ et M₃ d'évaluation de la complexité

	Indices considérés	Méthode d'valuation																																																		
Récif unitaire	C ₁	$M_1 = C_2 + C_3$ <i>Rappel : C₁ apporte une information écologique différente de C₂ et C₃</i>																																																		
	C ₂																																																			
	C ₃																																																			
Récifs en agrégat	C ₂	$M_2 = \sum (n_i \times M_{1i}) + ((C_4 + 1) \times C_5)$ <i>où n_i : nombre de récifs unitaires et M_{1i} : complexité d'un récif unitaire i</i> <i>Exemple : si un agrégat est composé de 10 cubes 1m³ de complexité M₁ = 0.9 et 5 cubes 1.4m³ de complexité M₁ = 1.3 alors :</i> $M_2 = (10 \times 0.9 + 5 \times 1.4) + ((C_4 + 1) \times C_5)$ $M_2 \text{ agrégat A} + M_2 \text{ agrégat B}$																																																		
	C ₃																																																			
	C ₄																																																			
	C ₅																																																			
	C ₆																																																			
Village de récifs		$M_3 = \frac{M_2 \text{ agrégat A} + M_2 \text{ agrégat B}}{2}$ <i>distance entre agrégat A et agrégat B</i>																																																		
		<i>Exemple :</i>																																																		
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>agrégat (ag)</th> <th>M₂ ag A + M₂ ag B</th> <th>nombre ag</th> <th>distance ag</th> <th>Méthode M3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ag 1 + ag 5</td> <td>17,52</td> <td>2</td> <td>10,52</td> <td>0,83</td> </tr> <tr> <td>ag 2 + ag 5</td> <td>17,52</td> <td>2</td> <td>10,52</td> <td>0,83</td> </tr> <tr> <td>ag 3 + ag 5</td> <td>17,52</td> <td>2</td> <td>10,52</td> <td>0,83</td> </tr> <tr> <td>ag 4 + ag 5</td> <td>17,52</td> <td>2</td> <td>10,52</td> <td>0,83</td> </tr> <tr> <td>ag 1 + ag 2</td> <td>17,52</td> <td>2</td> <td>23,75</td> <td>0,37</td> </tr> <tr> <td>ag 2 + ag 4</td> <td>17,52</td> <td>2</td> <td>11,25</td> <td>0,78</td> </tr> <tr> <td>ag 4 + ag 3</td> <td>17,52</td> <td>2</td> <td>23,75</td> <td>0,37</td> </tr> <tr> <td>ag 3 + ag 1</td> <td>17,52</td> <td>2</td> <td>11,25</td> <td>0,78</td> </tr> <tr> <td>moyenne M3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0,70</td> </tr> </tbody> </table>	agrégat (ag)	M ₂ ag A + M ₂ ag B	nombre ag	distance ag	Méthode M3	ag 1 + ag 5	17,52	2	10,52	0,83	ag 2 + ag 5	17,52	2	10,52	0,83	ag 3 + ag 5	17,52	2	10,52	0,83	ag 4 + ag 5	17,52	2	10,52	0,83	ag 1 + ag 2	17,52	2	23,75	0,37	ag 2 + ag 4	17,52	2	11,25	0,78	ag 4 + ag 3	17,52	2	23,75	0,37	ag 3 + ag 1	17,52	2	11,25	0,78	moyenne M3				0,70
	agrégat (ag)	M ₂ ag A + M ₂ ag B	nombre ag	distance ag	Méthode M3																																															
	ag 1 + ag 5	17,52	2	10,52	0,83																																															
	ag 2 + ag 5	17,52	2	10,52	0,83																																															
	ag 3 + ag 5	17,52	2	10,52	0,83																																															
	ag 4 + ag 5	17,52	2	10,52	0,83																																															
	ag 1 + ag 2	17,52	2	23,75	0,37																																															
	ag 2 + ag 4	17,52	2	11,25	0,78																																															
ag 4 + ag 3	17,52	2	23,75	0,37																																																
ag 3 + ag 1	17,52	2	11,25	0,78																																																
moyenne M3				0,70																																																
	<i>On fait ensuite la moyenne des valeurs de M₃ pour obtenir la complexité du village.</i>																																																			
	<i>L'indice C₆ est calculé à partir des différentes valeurs de M₂ (cases violettes)</i>																																																			

3.7 Présentation des milieux naturels expérimentaux

Un milieu naturel peut être considéré comme un récif unitaire. A l'échelle d'un paysage sous-marin, la juxtaposition de différents habitats est alors équivalente à la notion d'agrégat ou de village. Par conséquent, l'évaluation de la complexité des milieux naturels retenus (herbier de posidonies, enrochement et digue) a été faite à l'aide des indices C_1 , C_2 et C_3 pour permettre une comparaison avec la complexité des principaux récifs unitaires implantés en Méditerranée française. Dans le cas des enrochements et des digues, 3 profondeurs de cavité ont été arbitrairement considérées (Table 5).

Table 5 : Présentation des modèles de milieux naturels retenus

Illustration	Nom et mesures																		
	<u>Herbier de posidonies</u> Longueur : 1m Largeur : 1m Hauteur : 0,6 m Nombre de faisceaux variables																		
	<u>Enrochements</u> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>échantillon 1</th> <th>échantillon 2</th> <th>échantillon 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>longueur</td> <td>1m</td> <td>1m</td> <td>1m</td> </tr> <tr> <td>largeur</td> <td>1m</td> <td>1m</td> <td>1m</td> </tr> <tr> <td>profondeur</td> <td>0,1m</td> <td>0,3m</td> <td>0,5m</td> </tr> </tbody> </table>				échantillon 1	échantillon 2	échantillon 3	longueur	1m	1m	1m	largeur	1m	1m	1m	profondeur	0,1m	0,3m	0,5m
	échantillon 1	échantillon 2	échantillon 3																
longueur	1m	1m	1m																
largeur	1m	1m	1m																
profondeur	0,1m	0,3m	0,5m																
	<u>Digues</u> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>échantillon 1</th> <th>échantillon 2</th> <th>échantillon 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>longueur</td> <td>1m</td> <td>1m</td> <td>1m</td> </tr> <tr> <td>largeur</td> <td>1m</td> <td>1m</td> <td>1m</td> </tr> <tr> <td>hauteur</td> <td>0,1m</td> <td>0,3m</td> <td>0,6m</td> </tr> </tbody> </table>				échantillon 1	échantillon 2	échantillon 3	longueur	1m	1m	1m	largeur	1m	1m	1m	hauteur	0,1m	0,3m	0,6m
	échantillon 1	échantillon 2	échantillon 3																
longueur	1m	1m	1m																
largeur	1m	1m	1m																
hauteur	0,1m	0,3m	0,6m																

3.8 Une méthode d'évaluation indépendante de la taille

Les différents indices proposés doivent être indépendants de la taille de l'unité considérée (récif artificiel ou milieu naturel). Pour s'en assurer, un test a été réalisé sur un milieu naturel (enrochements) et sur un type de récif artificiel (cube de 1m³). Les indices ont alors été calculés sur des unités de tailles différentes (petit, moyen et grand). Un indice de complexité identique pour les

différentes tailles de la même unité signifie alors que le calcul de l'indice considéré est bien indépendant de la taille.

4 Résultats

4.1 Les récifs unitaires

Le calcul de $M_1 (C_2 + C_3)$ a été réalisé pour huit récifs unitaires (Annexe 1). Le graphique ci-dessous (Figure 9) représente le classement de ces 8 récifs unitaires par ordre croissant de complexité calculée. L'axe des abscisses représente le nom des récifs utilisés et l'axe des ordonnées les valeurs de complexité associée à ces modules unitaires. Nous observons que le *Bonna* est le récif unitaire le moins complexe tandis que le *Maze* représente le récif le plus complexe.

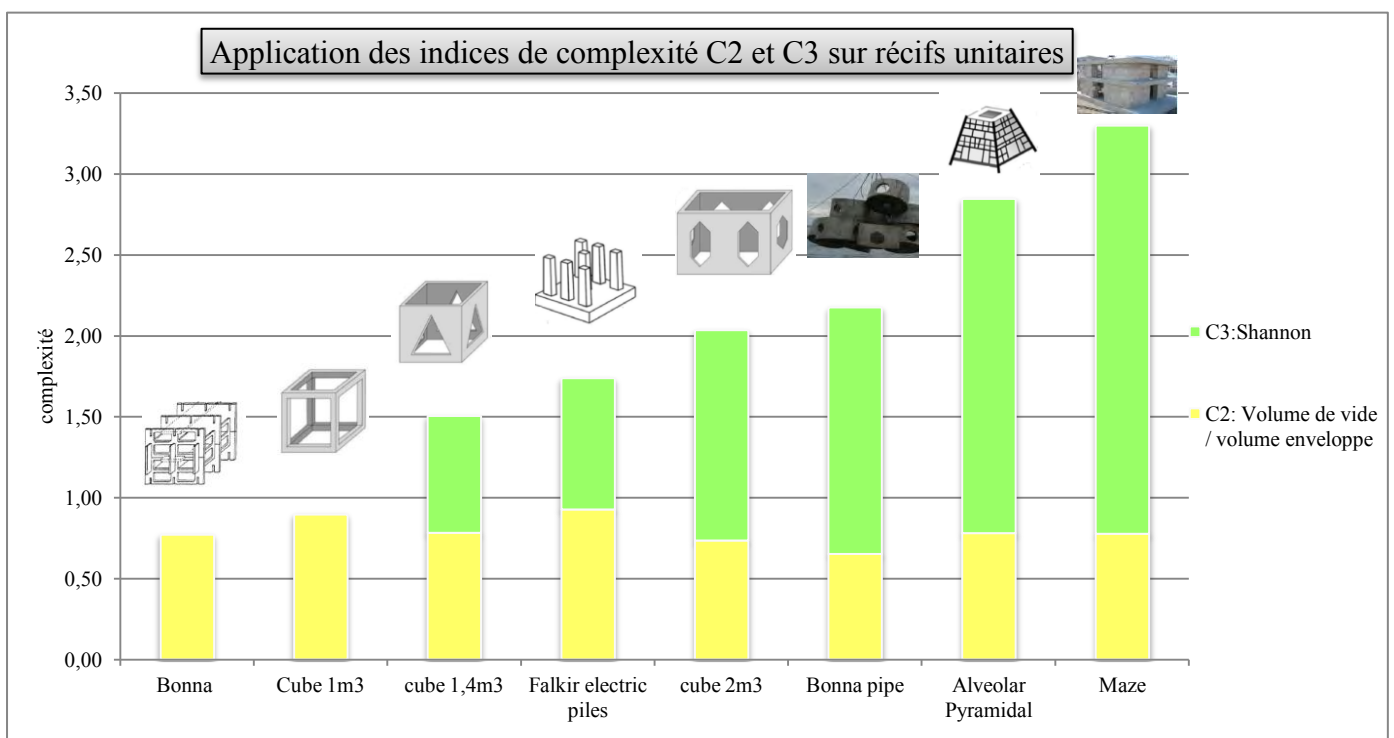


Figure 9 : Classement des 8 récifs unitaires du moins complexe (*Bonna* à gauche) au plus complexe (*Maze* à droite).

L'indice de rugosité C_1 a également été calculé pour ces mêmes récifs unitaires (Annexe 2). Le *Bonna* est toujours le récif artificiel présentant l'indice de rugosité le plus faible et le *Maze* le plus grand. Toutefois, de légères différences apparaissent dans le classement des autres récifs (Annexe 2). L'ACP réalisée sur le volume de cavité occupé (C_2), la moyenne et l'écart-type de la rugosité (C_1) et la diversité des tailles d'ouverture des cavités (C_3) permet de visualiser les variables ayant un rôle prépondérant dans l'évaluation de la complexité (Figure 10).

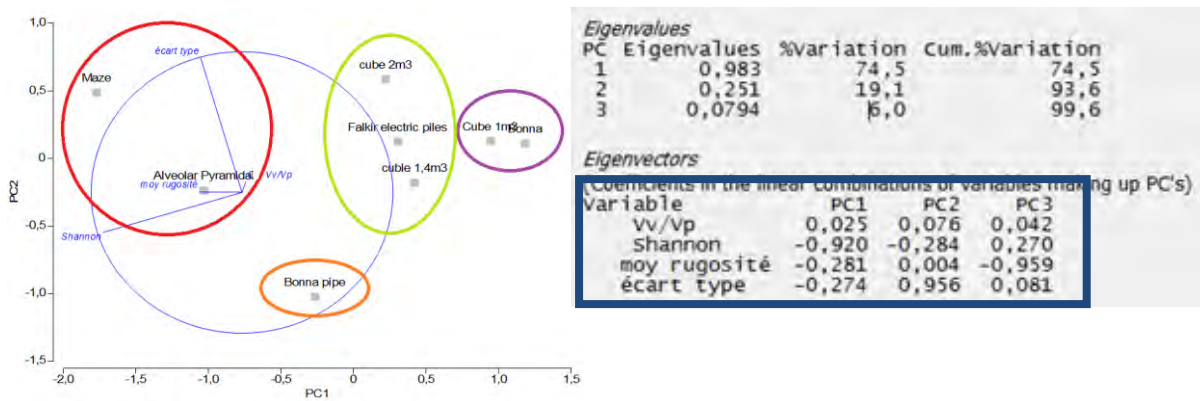


Figure 10 ci contre: Représentation sur les deux premiers axes et résultats de l'ACP réalisée sur 4 variables quantitatives (encadrées en bleu)

Deux variables se distinguent clairement des autres : la diversité des tailles d'ouverture des cavités (C_3), nommée sur le graphique « Shannon » pour l'axe 1, et l'écart type de rugosité (C_1), nommé sur le graphique « écart type » pour l'axe 2. Ces deux axes expliquent respectivement 74.5 % et 19.1% de la variance totale.

4.2 Les agrégats de récifs

L'évaluation de la complexité M_2 a été faite pour huit maquettes de récifs en agrégat (Annexe 3). Le graphique ci-dessous (Figure 11) représente le classement des huit maquettes par ordre croissant de complexité. L'axe des abscisses représente le nom des maquettes utilisées et l'axe des ordonnées les valeurs de complexité associée. Nous observons que la maquette 1 est la moins complexe tandis que la maquette 6 est la plus complexe.

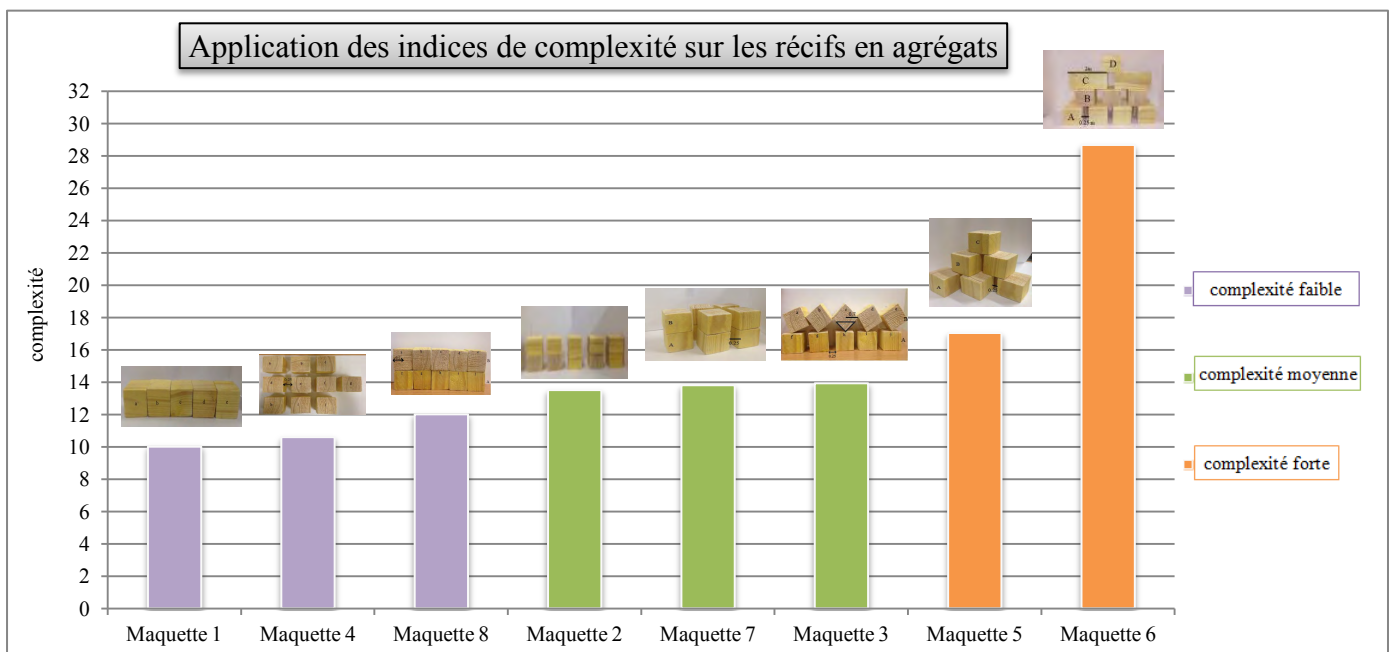


Figure 11 : Classement des 8 récifs en agrégats du moins complexe (maquette 1 à gauche) au plus complexe (maquette 6 à droite).

L'existence de plusieurs niveaux, l'hétérogénéité des modules et la disposition des éléments structuraux influencent fortement la complexité des agrégats.

4.3 Les villages de récifs

Le calcul de l'indice M_3 a été réalisé sur 4 maquettes de villages de récifs construites à partir des maquettes d'agrégats (Annexe 4). Le graphique ci-dessous (Figure 12) représente le classement des 4 villages par ordre croissant de complexité. L'axe des abscisses représente le nom des villages et l'axe des ordonnées les valeurs de complexité associée.

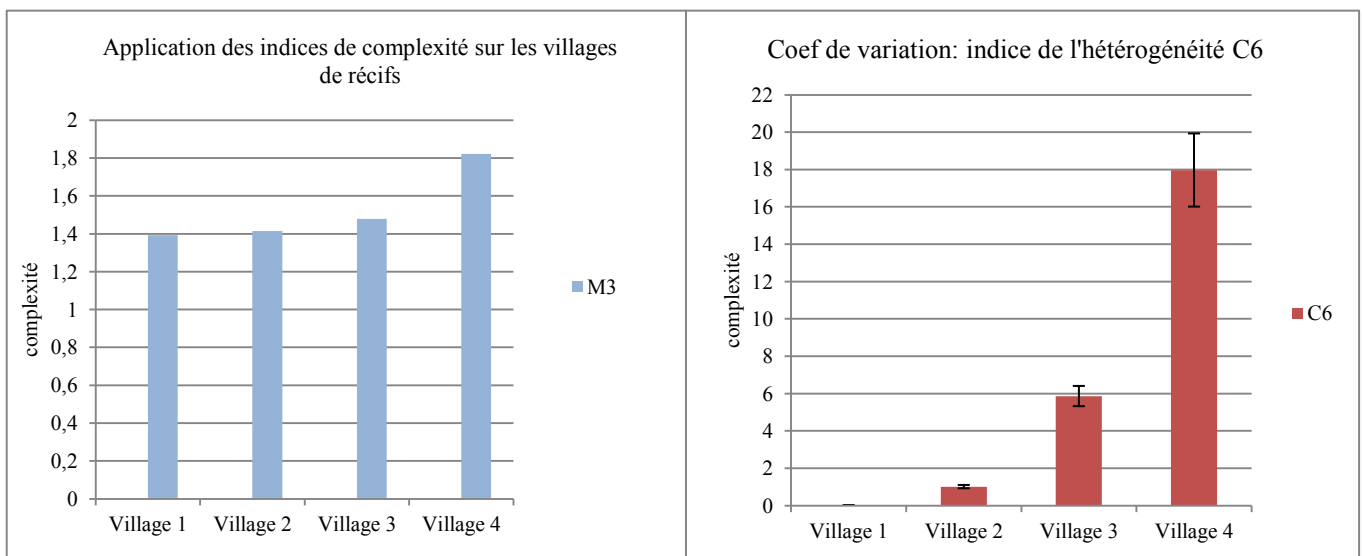


Figure 12 : classement des villages du moins complexe (Village 1 à gauche) au plus complexe (Village 4 à droite).

Avec cet indice M_3 , le village 1 est le moins complexe tandis que le village 4 est le plus complexe, avec une faible différence de complexité entre les trois premiers villages (Figure 12, à gauche). Cependant, l'hétérogénéité des agrégats (indice C_6) composant chaque village est différente. En effet, le village 1 possède un seul type d'agrégat, le village 2 possède 2 types d'agrégats, le village 3 possède 3 types d'agrégats et le village 4 est le plus hétérogène avec 4 types d'agrégats différents (Figure 12, à droite).

4.4 Comparaison des évaluations de complexité entre milieux naturels et récifs unitaires

La complexité des milieux naturels retenus (herbier de posidonie, enrochements et digues) a été évaluée selon les mêmes méthodes. Elle a ensuite été comparée aux valeurs de complexité des récifs unitaires, en particulier en retenant les indices M_1 et C_1 (Figure 13).

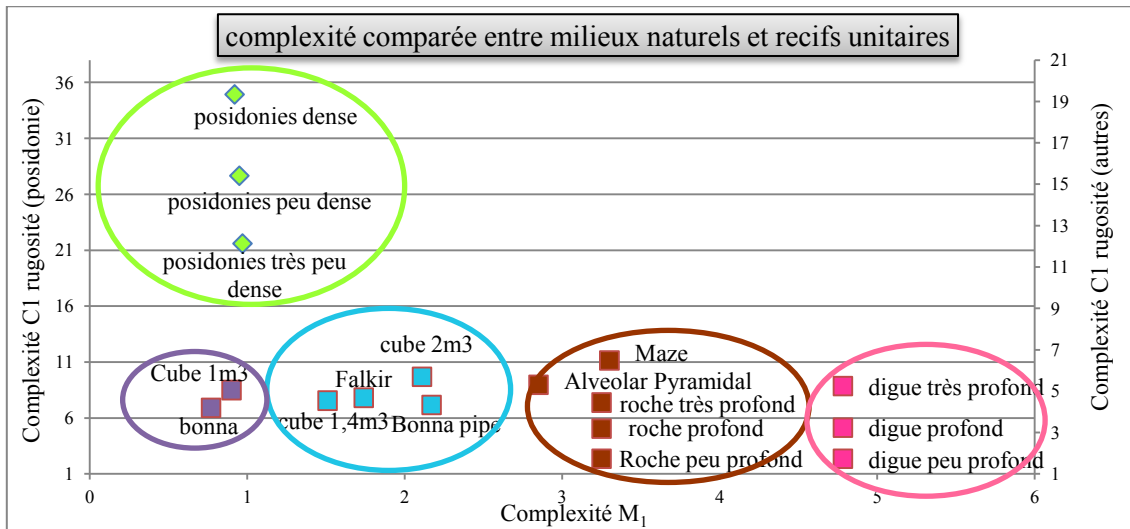


Figure 13 : Comparaison de la complexité calculée pour les milieux naturels et les récifs unitaires

Le Maze et l'Alveolar Pyramidal ont une complexité similaire à celle des enrochements. Cinq groupes distincts de complexité peuvent être identifiés (Figure 13, Table 6).

Table 6 : Classes de complexité en fonction des indices M_1 et C_1 de complexité

M_1	C_1
$0 < C_1 < 1 =$ Faible	$0 < C_2 < 10 =$ Faible
$1 < C_1 < 2,5 =$ Moyenne	$10 < C_2 < 20 =$ Moyenne
$2,5 < C_1 < 4 =$ Elevée	$C_2 > 20 =$ Elevée
$4 < C_1 < 6 =$ Très élevée	

Ces cinq groupes se caractérisent par les couples de valeurs M_1 et C_1 suivants: M_1 faible et C_1 élevée, M_1 faible et C_1 faible, M_1 moyen et C_1 faible, M_1 élevée et C_1 faible et M_1 très élevée et C_1 faible.

4.5 Effet de la taille sur les indices de complexité

En retenant les enrochements comme milieu naturel ou le récif unitaire de type cube $1m^3$ comme artificiel, l'indice M_1 a été calculé pour 3 tailles différentes en faisant changer les profondeurs de cavité ou la taille d'une arête (Table 7).

Table 7 : Mise en évidence de l'indépendance à la taille de l'indice M_1

	milieu naturel : enrochement			récif artificiel : cube $1m^3$		
	ech 1 : petit	ech 2 : moyen	ech 3 : grand	ech 1 : petit	ech 2 : moyen	ech 3 : grand
volume vide	0,03	0,09	0,15	0,90	7,20	24,30
volume plein	0,1	0,3	0,5	1	8	27
rapport V_v/V_p	0,30	0,30	0,30	0,90	0,90	0,90
Shannon	2,95	2,95	2,95	0,00	0,00	0,00
Indice M_1	3,25	3,25	3,25	0,90	0,90	0,90

Autant au niveau du milieu naturel que du récif artificiel, il a été observé un indice M_1 de valeur égale pour les 3 tailles différentes considérées.

5 Discussion

Les récifs artificiels unitaires représentent la base de la complexité et nous axerons notre discussion uniquement à ce niveau. Les indices développés reposent sur des idées simples, s'appuyant fortement sur des concepts écologiques classiques (rugosité, variance, diversité au sens de Shannon). Un module constitué d'un unique type de cavité comme le *Bonna* ne peut avoir une complexité élevée même si la valeur de volume de vide est relativement importante. A l'inverse, un module comme le *Maze* composé de différentes tailles d'ouverture autant à l'intérieur du récif qu'à la périphérie et possédant des cavités fermées mais aussi traversantes présente au contraire une complexité plus élevée. Sans que cela constitue une validation des indices proposés, il a été demandé à une dizaine de chercheurs de tous horizons de classer d'après eux, à dire d'expert, les huit récifs unitaires par ordre croissant de complexité (Table 8).

Table8 : Classement des 8 récifs unitaires à dire d'expert et d'après l'indice M_1 proposé

Nom des récifs unitaires	Rang à dire d'expert	Rang d'après M_1
<i>Cube 1m³</i>	1	2
<i>Cube 1.4m³</i>	2	3
<i>Bonna pipe</i>	3	6
<i>Cube 2m³</i>	4	5
<i>Falkir electric piles</i>	5	4
<i>Bonna</i>	6	1
<i>Maze</i>	7	8
<i>pyramidal</i>	8	7

Le classement entre les résultats présentés dans cette étude et le dire d'expert diffère fortement mais est très intéressante. A dire d'expert, les modules sont quasiment classés du plus petit au plus grand. Pour la plupart, les personnes interrogées ont justifié leur classement en se référant à la taille des modules. Or, l'indice M_1 développé, comme d'autres, est indépendant de la taille du récif unitaire. Seuls 8 récifs unitaires différents ont été considérés dans la présente étude. Cela n'est donc pas représentatif de la totalité des récifs artificiels utilisés en Méditerranée française (Tessier *et al.*, 2015). De même, la prise en compte des milieux naturels est très sommaire, mais elle permet d'apprécier leur complexité relative vis-à-vis des récifs unitaires considérés. Il est alors intéressant de souligner que le classement des complexités mesurées à l'aide des indices C_1 et M_1 pour les récifs artificiels et les milieux naturels identifie deux tendances : (i) des éléments à fort C_1 mais faible M_1 et (ii) des éléments à faible C_1 et fort M_1 . Chacun se référant à une fonction écologique

différente (surfaces pour C_1 et cavités pour M_1), il ressort de cette première analyse qu'il faudrait développer un récif unitaire présentant un C_1 et un M_1 élevé pour proposer des modules susceptibles d'accueillir un peuplement abondant, riche et diversifié.

6 Conclusion/perspective

Les six composantes de la complexité identifiées dans la littérature scientifique ont été traduites en indices afin de pouvoir évaluer quantitativement la complexité d'un habitat, récif artificiel ou habitat naturel. Pour valider cet ensemble d'indices, il conviendrait de les tester sur le terrain, en plongée sous-marine, sur une large gamme d'habitats. De plus, dans cette étude, il n'y a pas eu d'application de la méthode sur des milieux naturels au dessus du type unitaire. Dans un premier temps, à l'aide d'un SIG, les indices M_2 et M_3 pourraient être calculés à partir de cartographies existantes présentant une mosaïque d'habitats différents (herbier de posidonies, sable, roches, etc.).

Enfin, une perspective intéressante serait de développer un design particulier de récifs artificiels afin d'atteindre un niveau souhaité de complexité, en modifiant telle ou telle partie du module en fonction des valeurs respectives de C_1 ou M_1 voulues. Cela permettrait alors de réellement analyser quantitativement le lien entre diversité biologique et structure du récif afin d'en faire de véritables outils de gestion des fonds en zone littorale.

7 Bibliographie

Beck, M. W., 2000. Separating the elements of habitat structure: independent effects of habitat complexity and structural components on rocky intertidal gastropods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 249: 29–49.

Bell, S. S., E. D. McCoy & H. R. Mushinsky, 1991. *Habitat Structure: the physical arrangement of objects in space*. Chapman and Hall, London.

Bonhsack, J.A., A.M. Ecklund & A.M. Szmant. 1997. Artificial reef research: is there more than the attraction-production issue? *Fisheries* 22: 14–16.

Caley, M. J. & St John, J. (1996). Refuge availability structures assemblages of tropical reef fishes. *Journal of Animal Ecology* 65, 414–428.

Charbonnel, E., C. Serre, S. Ruitton, J.-G. Harmelin & A. Jensen, 2002. Effects of increased habitat complexity on fish assemblages associated with large artificial reef units (French Mediterranean coast). *ICES Journal of Marine Science* 59: 208–213.

Dean, R. L. & J. H. Connell, 1987. Marine invertebrates in an algal succession III. Mechanisms linking habitat complexity with diversity. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 109: 249–273.

Downes, B. J., Lake, P. S., Schreiber, E. S. G. et al. 1998. Habitat structure and regulation of local species diversity in a stony, upland stream. *Ecol. Monogr.* 68: 237–257.

Ferreira, C. E. L., Goncalves, J. E. A. & Coutinho, R. (2001). Community structure of fishes and habitat complexity on a tropical rocky shore. *Environmental Biology of Fishes* 61, 353–369.

- Gorham, J. C. & Alevizon, W. S. (1989). Habitat complexity and the abundance of juvenile fishes residing on small scale artificial reefs. *Bulletin of Marine Science* 44, 662–665.
- Grossman, G.D., G.P. Jones & W.J. Seaman, Jr. 1997. Do artificial reefs increase regional fish production? A review of existing data. *Fisheries* 22: 17–23.
- Hackradt, C. W., F. C. Fe'lix-Hackradt & J. A. Garcia-Charton, 2011. Influence of habitat structure on fish assemblage of an artificial reef in southern Brazil. *Marine Environmental Research* 72: 235–247.
- Harding, J. M. & Mann, R. (2001). Oyster reefs as fish habitat: Opportunistic use of restored reefs by transient fishes. *Journal of Shellfish Research* 20, 951–959.
- Heck, K. L. J. & L. B. Crowder, 1991. Habitat structure and predator-prey interactions in vegetated aquatic systems. In Bell, S. S., E. D. McCoy & H. R. Mushinsky (eds), *Habitat structure: the physical arrangement of objects in space*. Chapman and Hall, London: 281–299.
- Horan, D. L., Kershner, J. L., Hawkins, C. P. & Crowl, T. A. (2000). Effects of habitat area and complexity on Colorado River cutthroat trout density in Uinta Mountain streams. *Transactions of the American Fisheries Society* 129, 1250–1263.
- Hunter, W. R. & M. D. J. Sayer, 2009. The comparative effects of habitat complexity on faunal assemblages of northern temperate artificial and natural reefs. *ICES Journal of Marine Science* 66: 691–698.
- Jeffries, M., 1993. Invertebrate colonization of artificial pondweeds of differing fractal dimension. *Oikos* 67: 142–148.
- Jennings, S., Boulle, D. P. & Polunin, N. V. C. (1996). Habitat correlates of the distribution and biomass of Seychelles reef fishes. *Environmental Biology of Fishes* 46, 15–25.
- Kelaher, B. P. & J. C. Castilla, 2005. Habitat characteristics influence macrofaunal communities in coralline turf more than mesoscale upwelling on the coast of Northern Chile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 63: 155–165.
- Lawton, J. H., 1986. Surface availability and insect community structure: the effects of architecture and the fractal dimension of plants. In Juniper, B. E. & T. R. E. Southwood (eds), *Insects and the Plant Surface*. Edward Arnold, London: 317–331.
- Luckhurst, B. E. & Luckhurst, K. (1978). Analysis of the influence of substrate variables on coral reef fish communities. *Marine Biology* 49, 317–323.
- MacArthur, R. H. & J. W. MacArthur, 1961. On bird species diversity. *Ecology* 42: 594–598.
- Matias, M. G., A. J. Underwood, D. F. Hochuli & R. A. Coleman, 2010. Independent effects of patch size and structural complexity on diversity of benthic invertebrates. *Ecology* 91: 1908–1915.
- McClanahan, T. R. (1994). Kenyan coral reef lagoon fish: effects of fishing, substrate complexity, and sea urchins. *Coral Reefs* 13, 231–241.
- McCoy, E. D. & S. S. Bell, 1991. Habitat structure: the evolution and diversification of a complex topic. In Bell, S. S., E. D. McCoy & H. R. Mushinsky (eds), *Habitat Structure: the physical arrangement of objects in space*. Chapman and Hall, London: 3–27.
- Mcnett, B. J. and Rypstra, A. L. 2000. Habitat selection in a large orb-weaving spider: vegetational complexity determines site selection and distribution. *Ecol. Entomol.* 25: 423–432.
- Menge, B. A., J. Lubchenko & L. R. Ashkenas, 1985. Diversity, heterogeneity and consumer pressure in a tropical rocky intertidal community. *Oecologia* 65: 394–405.
- Molles, M. C. (1978). Fish species diversity on model and natural reef patches: experimental insular biogeography. *Ecological Monographs* 48, 289–305.
- Ohman, M. C. & Rajasuriya, A. (1998). Relationships between habitat structure and fish communities on coral and sandstone reefs. *Environmental Biology of Fishes* 53, 19–31.

- Raffaelli, D., Hall, S., Emes, C. et al. 2000. Constraints on body size distributions: an experimental approach using a small scale system. *Oecologia* 122: 389–398.
- Risk, M. J. (1972). Fish diversity on a coral reef in the Virgin Islands. *Atoll Research Bulletin* 153, 1–6.
- Gorman, O. T. & Karr, J. R. (1978). Habitat structure and stream fish communities. *Ecology* 59, 507–515.
- Roberts, C. M. & Ormond, R. F. G. (1987). Habitat complexity and coral reef fish diversity and abundance on Red Sea fringing reefs. *Marine Ecology Progress Series* 41, 1–8.
- Ruitton S, Francour P and Boudouresque. C.F. 1999. Relationships between Algae, Benthic Herbivorous Invertebrates and Fishes in Rocky Sublittoral Communities of a Temperate Sea (Mediterranean). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (2000) 50, 217–230
- Schmid, P. E., Tokeshi, M. and Schmid-Araya, J. M. 2002. Scaling in stream communities. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. B* 269: 2587–2594.
- Sher-Kaul, S., B. Oertli, E. Castella & J. Lachavanne, 1995. Relationship between biomass and surface area of six submerged aquatic plant species. *Aquatic Botany* 51: 147–154.
- Sherman, R. L., D. S. Gilliam & R. E. Spieler, 2002. Artificial reef design: void space, complexity, and attractants. *ICES Journal of Marine Science* 59: 196–200.
- Taniguchi, H., S. Nakano & M. Tokeshi, 2003. Influences of habitat complexity on the diversity and abundance of epiphytic invertebrates on plants. *Freshwater Biology* 48: 718–728.
- 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.
- Tokeshi, M. & S. Arakaki, 2011. Habitat complexity in aquatic systems: fractals and beyond. *Hydrobiologia*.
- Walters, L. J. & D. S. Wethey, 1996. Settlement and early postsettlement survival of sessile marine invertebrates on topographically complex surfaces: the importance of refuge dimensions and adult morphology. *Marine Ecology Progress Series* 137: 161–171.
- Warfe, D. M., L. A. Barmuta & S. Wotherspoon, 2008. Quantifying habitat structure: surface convolution and living space for species in complex environments. *Oikos* 117: 1764–1773.

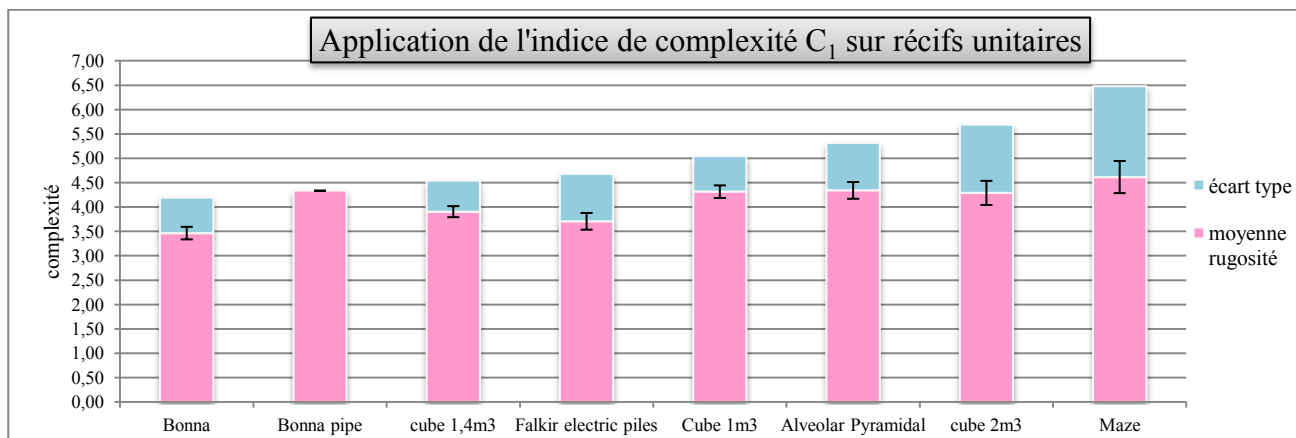
Annexes

Annexe 1 : Résultats obtenus sur les 8 récifs unitaires en appliquant la méthode d'évaluation de la complexité M_1

	Bonna	Cube 1m³	Cube 1,4m³	Falkir electric piles	cube 2m³	Bonna pipe	Alveolar Pyramidal	Maze
C₂	0,77	0,90	0,78	0,93	0,74	0,65	0,78	0,78
C₃	0,00	0,00	0,72	0,81	1,38	1,52	2,07	2,52
M₁	0,77	0,90	1,51	1,74	2,11	2,17	2,85	3,30

Annexe 2 : Résultats obtenus sur les 8 récifs unitaires en appliquant l'indice de rugosité C_1

	Bonna	Cube 1m ³	cube 1,4m ³	Falkir electric piles	cube 2m ³	Bonna pipe	Alveolar Pyramidal	Maze
moy rugosité	3,46	4,31	3,90	3,71	4,29	4,33	4,34	4,61
écart-type	0,73	0,73	0,64	0,97	1,40	0,00	0,97	1,87
C_1	4,19	5,05	4,54	4,68	5,69	4,33	5,31	6,48



Annexe 3 : Résultats obtenus sur les huit maquettes de récifs en agrégat en appliquant la méthode d'évaluation de la complexité M_2 :

		Maquette 1	Maquette 4	Maquette 8	Maquette 2	Maquette 7	Maquette 3	Maquette 5	Maquette 6
Indice	$(1+C_4) * C_5$	1	1,59	3	4,5	4,8	4,92	8,03	12,34
Nombre de récifs	Cube 1m³	10	10	10	10	10	10	10	5
	Falkir electric piles								3
	Maze								2
Indice M_1 (C_2+C_3)	Cube 1m³	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	Falkir electric piles								1,74
	Maze								3,3
Indice M_2		10	10,59	12	13,5	13,8	13,92	17,03	28,66

Annexe 4 : Résultats obtenus sur les quatre villages de récifs en appliquant la méthode d'évaluation de la complexité M_3 :

village	Village 1	Village 2	Village 3	Village 4
indice M_3	1,39	1,41	1,48	1,82

village	Village 1	Village 2	Village 3	Village 4
moyenne indice M_2	34,66	35,24	36,99	43,63
variance	0,00	0,13	4,70	61,44
écart-type	0	0,36	2,17	7,84
pourcentage	100	100	100	100
coefficient de variation C_6	0	1,02	5,86	17,97

Résumé

Mots clés : Complexité, Récifs artificiels, Evaluation, Quantitative, Méthode

La dernière synthèse publiée sur les récifs artificiels en France (Tessier & al., 2015) soulignent que la complexité structurale ou complexité tridimensionnelle influence fortement la colonisation des récifs artificiels et leur efficacité en tant que nouvel habitat pour les espèces animales vagiles (poissons, crustacés en particulier). Or, comme le soulignent ces auteurs, l'évaluation de la complexité des récifs artificiels n'a encore jamais été réalisée de façon quantitative et standardisée. D'après les différentes méthodes semi-quantitatives employées pour évaluer la complexité de l'habitat, il existe au moins six éléments reconnus de complexité qui sont : la variété de taille des cavités de refuge (Roberts & Ormond, 1987), la rugosité du substrat (Risk, 1972; Roberts & Ormond, 1987; Jennings & al., 1996; Ohman & Rajasuriya, 1998), l'hétérogénéité du substrat (Ohman & Rajasuriya, 1998), la hauteur de l'habitat (Luckhurst & Luckhurst, 1978; Molles, 1978), la disposition des éléments structuraux (Tokeshi & Arakaki, 2011) et le volume de cavités occupé (Ruitton & al., 1999). L'objectif de cette étude étant de proposer une méthode d'évaluation quantitative de la complexité structurale des récifs artificiels, il convient donc de considérer les six éléments reconnus de la complexité de l'habitat et de développer des indices indépendants de la taille/surface des habitats considérés. Les six composantes de la complexité identifiées dans la littérature scientifique ont donc été traduites en indice reposant sur des idées simples et s'appuyant sur des concepts écologiques classiques afin de pouvoir évaluer quantitativement la complexité d'un habitat, récif artificiel ou habitat naturel. Pour valider cet ensemble d'indices, il conviendrait par la suite de les tester sur le terrain, en plongée sous-marine, sur une large gamme d'habitats.

Abstract

Keywords : Method, Evaluation, Complexity, Artificial reefs, Quantitative

The final synthesis published on artificial reefs in France (Tessier et al., 2015) point out that the structural complexity or three-dimensional complexity strongly influences the colonization of artificial reefs and their effectiveness as a new habitat for motile animal species (fish, crustaceans in particular). However, as pointed out to the authors, the evaluation of the complexity of artificial reefs has never been carried out quantitative and standardized way. According to different semi-quantitative methods used to evaluate habitat complexity, there are at least six known elements of complexity that are: variety of sizes refuge cavities (Roberts & Ormond 1987), the rugosity of the substrate (Risk 1972; Roberts & Ormond 1987; Jennings et al., 1996; Ohman & Rajasuriya 1998), heterogeneity substrate (Ohman & Rajasuriya, 1998), the height of the habitat (Luckhurst & Luckhurst, 1978; Molles, 1978), the arrangement of structural elements (Tokeshi & Arakaki, 2011) and the cavity volume occupied (Ruitton et al., 1999). The objective of this study is to provide a method of quantitative evaluation of the structural complexity of artificial reefs. so you have to consider the six elements recognized the complexity of the habitat and develop independent indices of the size / surface considered habitats. The six components of the complexity identified in the scientific literature have therefore been translated into index based on simple ideas and on classic ecological concepts in order to quantitatively evaluate the complexity of a habitat, artificial reef or natural habitat. To validate this set of index, it would then test them in the environment, of scuba diving, on a wide range of habitats.