



# Projet expérimental de complexification des sites de récifs artificiels existants de Valras-Plage

3D'COMPLEX

# Projet expérimental de complexification des sites de récifs artificiels existants de Valras-Plage

Rapport final - Février 2025



Étude réalisée par la ville de Valras-Plage avec le soutien financier de :



Réalisation technique :

SEABOOST



# 3D'COMPLEX – Rapport final

Février 2025

<b>SEANEO</b> Agence Méditerranée 8 rue Claude Berri 66000 PERPIGNAN France Mobile : +33(0)6 20 11 58 75 Courriel : nicolas.dalias@seaneo.com www.seaneo.com	
<b>SEABOOST</b> 889 rue de la Vieille Poste 34000 Montpellier www.seaboost.fr	

Réalisation de l'étude : Claudie Iborra, Sylvère Robin, Clément Larrouy, Nelly Soulat

Rédaction du rapport : Sylvère Robin Matthieu Lapinski, Rodrigue Rey

Crédits photographiques : SEANEO, PALANA, SEABOOST

Avertissement : Les documents rendus dans le cadre de cette étude, engagent la responsabilité et la crédibilité scientifique du groupement. Ils ne peuvent, pour cette raison, être modifiés sans son accord.

Rédacteur		Vérificateur		Approbateur		Version
Date	Nom/Visa	Date	Nom/Visa	Date	Nom/Visa	
10/12/2024	ROBIN	19/12/2024	SOULAT	14/02/2025	LAPINSKI	1
REVISIONS						
Date	Nature de la modification	Auteurs de la modification		Approbateur		
18/02/2025	Prise en compte des remarques de SEABOOST	IBORRA		IBORRA		2

Ce document doit être cité sous la forme suivante :

Robin S., Lapinski M., Iborra C., Rey R., Larrouy C., Soulat N., 2025. 3D'COMPLEX : Projet expérimental de complexification des sites de récifs artificiels existants de Valras-Plage – Rapport final. Valras-Plage - SEABOOST – SEANEO Publ. Fr., 95 pages.

# Table des matières

Liste des figures .....	5
Liste des tableaux .....	7
<b>PREAMBULE.....</b>	<b>8</b>
<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIFS .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 CONTEXTUALISATION .....</b>	<b>10</b>
1.1.1 Complexifier les récifs artificiels en France et en Occitanie, un besoin d'innovation couplé à la limitation de futures artificialisations .....	10
1.1.2 Valras-Plage : un site historiquement suivi, idéal pour la mise en place d'un démonstrateur expérimental .....	11
<b>1.2 OBJECTIFS .....</b>	<b>14</b>
<b>2. LOT 1 - COMPLEXIFICATION DES CONCESSIONS EXISTANTES.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>17</b>
2.1.1 Description de la phase conception et travaux .....	17
2.1.2 Choix des récifs à complexifier .....	21
2.1.3 Description de la phase conception et de la phase travaux .....	24
2.1.3 Suivi des récifs avant et après la complexification .....	33
2.1.4 Analyses .....	36
<b>2.2 RESULTATS .....</b>	<b>39</b>
2.2.1 Études des paramètres physiques .....	39
2.2.2 Études des paramètres biologiques.....	42
<b>2.3 BILAN .....</b>	<b>55</b>
<b>3. LOT 2 – AMELIORATION DE LA CONNECTIVITE ECOLOGIQUE.....</b>	<b>57</b>
<b>3.1 MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>57</b>
3.1.1 Description de la phase conception et travaux .....	57
3.1.2 Présentation du récif géométrie et matériaux .....	58
3.1.3 Procédé de fabrication.....	62
3.1.4 Déploiement et immersion .....	65
3.1.2 Suivi des digues en enrochements et corps-morts éco-conçus.....	68
<b>3.2 RESULTATS .....</b>	<b>70</b>
3.2.1 Études des paramètres physiques .....	70
3.2.2 Études des paramètres biologiques.....	71
<b>3.3 BILAN ET AXES D'AMELIORATIONS .....</b>	<b>79</b>
<b>4. LOT 3 – ETUDE DES POPULATIONS DE SUBSTRATS MEUBLES EN MILIEU URBAIN .....</b>	<b>81</b>
<b>4.1 MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>81</b>
4.1.1 Pêche.....	82
4.1.2 Tri et biométrie.....	83
<b>4.2 RESULTATS .....</b>	<b>83</b>
4.2.1 Abondance, richesse spécifique et biomasse .....	83

4.2.2 Fréquence d'occurrence des espèces.....	85
4.2.3 Abondances des classes de taille .....	86
<b>4.3 BILAN ET AXES D'AMELIORATIONS .....</b>	<b>87</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>89</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>90</b>
<b>PORTFOLIO .....</b>	<b>93</b>

# Liste des figures

Figure 1 : Photos et dimensions d'une des 35 doubles buses immergées à Valras-Plage.....	12
Figure 2 : Photos historiques de colonisation des doubles buses et récifs de Valras-Plage avant complexification lors du Projet 3D'Complex .....	12
Figure 3 : Schéma d'implantation des récifs artificiels au large de la commune de Valras-Plage dans la concession d'implantation des récifs artificiels établie sur 30 ans (2006 – 2036) par arrêté Préfectoral 2006-01.1989 .....	13
Figure 4 Schéma de synthèse du projet 3D'Complex qui comprend Lot 1 : la complexification de 12 récifs type double buse Lot 2 : l'installation de 8 corps morts écologiques pour le balisage d'un chenal maritime et Lot 3 : le suivi des zones sableuses au sein des plages alvéolaires et à l'extérieur .....	15
Figure 5 : Photo et dimensions d'une double buse .....	17
Figure 6 : Illustration d'une double buse complexifiée par un module 3D'Complex .....	18
Figure 7 : Photo d'un récif double buse complexifié par un module 3D'Complex .....	18
Figure 8 : Plans EXE d'un récif double-buse complexifié par un module 3D'Complex .....	21
Figure 9 : Localisation des récifs double buse en place dans chaque zone et description du plan de complexification .....	23
Figure 10 : Critères de répartition des récifs témoin et des récifs complexifiés et synthèse du schéma expérimental .....	23
Figure 11 : Direction des houles au large selon la hauteur de vague - campagne de mesures Candhis .....	24
Figure 12 : Résultats des calculs de stabilité pour les modules 3D' Complex .....	25
Figure 13 : Répartition des masses sur la structure .....	26
Figure 14 : Principe de ferrailage retenu pour l'arche .....	27
Figure 15 : Principe de ferrailage retenu pour les zones de liaisons.....	27
Figure 16 : Caractéristiques mécaniques du béton préfabriqué bas-carbone retenu .....	27
Figure 17 : Moule de chaudronnerie pour le coulage des modules 3D'Complex .....	28
Figure 18 : Etapes de fabrication des modules de complexification 3D'Complex .....	29
Figure 19 : Mise en place des arches pour réalisation de la liaison du module 3D'Complex. L'ensemble des opérations ont été réalisées en Occitanie.....	30
Figure 20 : Modules 3D'Complex après assemblage. L'ensemble des opérations ont été réalisées en Occitanie	30
Figure 21 : Rappel des zones d'immersion des modules de complexification 3D'Complex .....	31
Figure 22 : Système de repérage amont des double-buses existantes et de leur axe principal avant l'opération de complexification .....	32
Figure 23 : Support de remorquage dédié aux modules de complexification 3D'Complex .....	33
Figure 24 : Plongeurs scientifiques avant immersion (campagne 2024) .....	34
Figure 25 : Paramètres physiques mesurés sur les récifs avec buses (à gauche) et photographie de leur relevé in situ (à droite).....	35
Figure 26 : Schéma des 3 phases principales de comptage consécutives (de gauche à droite ; 1 - des espèces mobiles et difficiles d'approche ; 2 - des espèces à proximité immédiate du récif ; 3 - des espèces vivant à l'intérieur du récif) .....	36
Figure 27 : Évolution temporelle des paramètres physiques selon la catégorie de récif (en m).....	39
Figure 28 : Échantillon d'images de la vie fixée présente sur les modules de complexification 3D'Complex et notamment sur le béton imprimé en 3D .....	43
Figure 29 : Évolution spatio-temporelle de la richesse spécifique moyenne (la ligne pointillée rouge matérialise la complexification en 2022) .....	44
Figure 30 : Evolution de la richesse spécifique moyenne (nombre d'espèce) en fonction de la température de l'eau .....	45
Figure 31 : Évolution spatio-temporelle de l'abondance moyenne (la ligne pointillée rouge matérialise la complexification en 2022) .....	45
Figure 32 : Évolution des indices de diversité et d'équitabilité selon l'année et la catégorie de récif (la ligne pointillée rouge matérialise la complexification en 2022).....	48
Figure 33 : Fréquence d'occurrence des différentes espèces de macrofaune mobile observées entre 2021 et 2024 avec ou sans module des complexification 3D'Complex .....	50
Figure 34 : Fréquence d'occurrence des différentes espèces de macrofaune mobile observées avant 2021. Langoustes et cigales ont toujours été rarement observées au sein de double-buse, tout comme le poulpe ces 10 dernières années.....	51
Figure 35 : Zoom des fréquences d'occurrence sur une sélection d'espèces de macrofaune mobile et cryptiques observées entre 2021 et 2024 communes (sars, blennies, congres, rascasses) avec ou sans module des complexification 3D'Complex et a contrario quasi exclusives aux récifs complexifiés (poulpe, langouste, homard, cigale, labre ver, coquette, araignée de mer) .....	52
Figure 36 : Photos d'espèces observées majoritairement dans les modules de complexification 3D'Complex ....	53
Figure 37 : Abondance des différentes classes de tailles selon l'année et la catégorie de récif .....	54

Figure 38 : Lest LOT 2 Vue en perspective.....	58
Figure 39 : Lest LOT 2 vue de face dimensions enveloppe.....	59
Figure 40 : Lest LOT 2 système d'ancrage.....	59
Figure 41 : Impression des demis modules.....	60
Figure 42 : détail d'un demi module imprimé (détail coupes réalisées).....	60
Figure 43 : Récif et mode d'ancrage - vue perspective.....	61
Figure 44: Tableau de correspondance paramètres /espèces ciblées.....	62
Figure 45 : Réception des impressions.....	63
Figure 46 : Premier coulage avant retournement.....	63
Figure 47 : Récif assemblés.....	64
Figure 48 : Chargement des modules sur le plateau.....	64
Figure 49 : chargement des récifs sur la barge.....	65
Figure 50 : Immersion des récifs.....	66
Figure 51 Plan de situation du balisage des 300m au droit de la commune de Valras-Plage. Les points identifiés de 1 à 8 représentent la position spatiale des corps-morts éco-conçus faisant l'objet de la présente demande d'AOT.....	67
Figure 52: Plan de situation du balisage des 300m au droit de la commune de Valras-Plage. Les points identifiés de 1 à 8 représentent la position spatiale des corps-morts éco-conçus faisant l'objet de la présente demande d'AOT (Carte IGN).....	68
Figure 53 : Cartographie des sites de suivi dans le cadre du Lot 2.....	69
Figure 54: Image d'un lest 3D très ensablé (à gauche) et peu ensablé (à droite) en Août 2024 après 29 mois d'installation.....	70
Figure 55 : Évolution de la richesse spécifique moyenne selon le site et la catégorie. Les lignes verticales en pointillés orange représentent l'année de pose des lests 3D (2022).....	71
Figure 56 : Évolution de l'abondance moyenne selon le site et la catégorie de substrat. Les lignes verticales en pointillés orange représentent l'année de pose des lests 3D (2022).....	72
Figure 57 : Fréquences d'occurrence des différentes espèces selon la catégorie de substrat et l'année. Les Eco-lests étant mis en place à partir de 2022, les comptages de 2021 ont été réalisés le long d'une radiale sableuse.....	75
Figure 58 : Abondance des différentes classes de tailles selon l'année et la catégorie de substrat.....	78
Figure 59 : Cartographie des sites étudiés dans le cadre du Lot 3.....	81
Figure 60 : Image d'une pêche à la senne lors de la campagne 2024 et schéma de l'engin de pêche (FAO).....	82
Figure 61 : Évolution de la richesse spécifique moyenne par site.....	85
Figure 62 : Fréquence d'occurrence des différentes espèces selon la station et l'année.....	86
Figure 63 : Abondance des différentes classes de tailles selon l'année.....	87

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Périodes de réalisation des terrains d'observation. Les croix indiquent les années et les saisons au cours desquelles ont été réalisées les campagnes .....	13
Tableau 2 : Nombre de campagnes de suivis pour chacun des récifs en 2021 avant complexification .....	22
Tableau 3 : Dates de suivis des récifs .....	34
Tableau 4 : Interprétation des valeurs de H' (Shannon et Weaver, 1949) .....	37
Tableau 5 : Paramètres physiques mesurés .....	39
Tableau 6 : Résultats des tests statistiques pour les paramètres physiques .....	40
Tableau 7 : Évolution de l'enfouissement et de l'orientation des récifs suivis dans la zone 1 .....	40
Tableau 8 : Évolution de l'enfouissement et de l'orientation des récifs suivis dans la zone 2 .....	41
Tableau 9 : Espèces fixées présentes sur les récifs .....	42
Tableau 10 : Résultats du modèle de régression binomiale négative effet des variables sur la richesse spécifique .....	44
Tableau 11 : Résultats du modèle de régression binomiale négative effet des variables sur l'abondance des individus .....	46
Tableau 12 : Synthèse de l'évolution de la richesse spécifique entre 2008 et 2021 (avant complexification) puis 2023 et 2024 .....	46
Tableau 13 : Synthèse de l'évolution de l'abondance entre 2008 et 2021 (avant complexification) puis 2023 et 2024 .....	47
Tableau 14 : Synthèse de l'évolution de l'indice de Shannon H' entre 2008 et 2021 (avant complexification) puis 2023 et 2024 .....	49
Tableau 15 : Synthèse de l'évolution de l'indice de Shannon H' entre 2008 et 2021 (avant complexification) puis 2023 et 2024 .....	49
Tableau 16 : Récapitulatif des espèces sensibles à la complexification .....	52
Tableau 17 : Effet des variables sur la proportion d'individus de petite taille .....	54
Tableau 18 : Effet des variables sur la proportion d'individus de taille moyenne .....	55
Tableau 19 : Effet des variables sur la proportion d'individus de grande taille .....	55
Tableau 20 : Détails des suivis réalisés dans le cadre du Lot 2 .....	69
Tableau 21 : Évolution du niveau d'ensablement des lests 3D @ au cours des suivis, le long d'un gradient côte-large .....	70
Tableau 22 : Résultats du modèle de régression binomiale négative effet des variables sur la richesse spécifique .....	72
Tableau 23 : Résultats du modèle de régression binomiale négative effet des variables sur l'abondance .....	73
Tableau 24 : Synthèse de l'évolution de la richesse spécifique et de l'abondance entre 2021 et 2024 .....	73
Tableau 25 : Synthèse des espèces et stades de vie observées entre 2021 et 2024 sur les différentes catégories de substrats .....	77
Tableau 26 : Effet des variables sur la proportion d'individus de petite taille .....	79
Tableau 27 : Effet des variables sur la proportion d'individus de taille moyenne .....	79
Tableau 28 : Effet des variables sur la proportion d'individus de grande taille .....	79
Tableau 29 : Récapitulatif de l'abondance, de la richesse spécifique et de la biomasse pour chacun des coups de pêche à la senne de plage, de 2021 à 2024 .....	84

# PREAMBULE

La ville de Valras-Plage, SEANEO et SEABOOST ont conçu et établi ensemble le projet 3D'COMPLEX au travers un partenariat de R&D dédié. Différentes subventions attribuées à la ville de Valras-Plage notamment via le Programme des Interventions Territoriales de l'Etat (PITE), et la Région Occitanie, mais aussi par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, ont permis la réalisation de ce projet. La ville de Valras-Plage en tant qu'attributaire de ces subventions, est le porteur du projet « 3D'COMPLEX ».

L'objectif du projet 3D'COMPLEX est de renforcer et compléter la démarche historique entreprise par la ville de Valras-Plage en matière de préservation de la biodiversité marine. Le projet développe une approche intégrant les enjeux côtiers et les enjeux du large dans une même continuité, afin d'œuvrer dans le sens d'une reconquête de la biodiversité. Basé sur de l'innovation en ingénierie écologique appliquée au territoire maritime de la commune de Valras-Plage et de la Région Occitanie, le projet vise à restaurer les fonctionnalités écologiques des écosystèmes littoraux altérés par les aménagements côtiers et les activités anthropiques, en proposant une solution de complexification des récifs artificiels déjà en place depuis 2006.

**Le projet intègre ainsi un démonstrateur technologique intégrant la technologie de l'impression 3D à grande échelle pour la complexification de récifs artificiels dits de première génération dans une perspective d'amélioration continue des fonctions écologiques des petits fonds côtiers et de ces ouvrages, tout en limitant l'artificialisation de la concession actuelle.**

La société SEABOOST est une société spécialisée dans la conception, la construction et le déploiement de structures innovantes pour le développement de la biodiversité marine. Ses activités vont de l'intégration écologique d'infrastructures maritimes, au soutien d'activités halieutiques et de loisirs, en passant par la restauration écologique de milieux marins dégradés. Ses compétences couvrent l'ingénierie écologique et l'assistance technique à l'éco-conception, le dimensionnement et les études de stabilité, les méthodes de construction, l'optimisation économique, la fabrication et le déploiement de solutions et de produits. Les produits conçus par SEABOOST sont des structures sur mesure à vocation écologique et technique : équipements de lestage, habitats artificiels, modules d'habillage d'ouvrages, etc.

La société SEABOOST a développé dans le cadre de ce programme de recherche des solutions innovantes de restauration écologique, définies spécifiquement pour répondre aux enjeux de préservation de la biodiversité marine sur différentes infrastructures maritimes de la côte valrassienne : les corps-morts de bouées de balisage de chenal et des 300 m et la complexification des récifs artificiels déjà existants. Ce projet a été l'occasion pour l'entreprise de développer et de tester l'application de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux pour la fabrication d'ouvrages en mer à vocation écologique, notamment l'impression 3D béton.

SEANEO est une entreprise de conseil et de services en environnement littoral et marin, en aquaculture et pêche. SEANEO intervient dans le cadre de projets de surveillance, de cartographie, de gestion et d'études réglementaires sur l'environnement littoral et marin. SEANEO propose du conseil et des services en matière d'aquaculture et de pêche, en synergie avec l'environnement littoral et marin, mais aussi avec les contraintes économiques et réglementaires, dans une perspective de développement durable des activités. SEANEO propose un soutien humain, scientifique et technique, dans le développement de nouvelles technologies et de nouveaux procédés pour la valorisation de l'environnement littoral et marin, de l'aquaculture et de la pêche. SEANEO intervient notamment dans les biotechnologies et la valorisation des ressources marines pour le développement durable. SEANEO a également développé diverses techniques innovantes d'acquisition de données.

Au niveau des récifs artificiels, depuis 2008, SEANEO a réalisé tous les ans des études d'opportunités, de faisabilité, d'incidences sur l'environnement et des suivis scientifiques en France (Méditerranée, Atlantique) et à l'international. Ainsi, SEANEO réalise notamment depuis 16 ans le suivi des récifs artificiels de la commune de Valras-Plage. SEANEO a apporté dans le Projet sa compétence, ses connaissances antérieures, son savoir-faire dans le cadre des suivis écologiques de récifs artificiels, ainsi que des moyens humains et techniques.

La gouvernance du projet et les objectifs de R&D associés sont décrits plus en détail dans la convention de partenariat de R&D 20042021, dans les annexes associées ainsi que dans les différentes demandes de subvention déposées.

Le présent livrable se focalise sur la présentation des résultats des 3 thématiques abordées dans le cadre du projet 3D'Complex à savoir :

**Thématique 1 : Mise au point de techniques innovantes de complexification des concessions existantes (sur récifs artificiels) de Valras-Plage applicables aux autres sites d'Occitanie ;**

**Thématique 2 : Amélioration de la connectivité entre zones de nurserie côtières rocheuses et concessions de récifs artificiels pour les espèces de substrats durs ;**

**Thématique 3 : Amélioration des connaissances sur les fonctions écologiques des biocénoses côtières de substrats meubles et étude des effets potentiels des ouvrages existants.**

# 1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

En offrant des habitats alternatifs pour la faune et en soutenant les fonctions écologiques essentielles, les récifs artificiels jouent un rôle croissant dans la restauration des écosystèmes marins. Cependant, ces structures présentent encore des limites, notamment en matière de design et de bioinspiration ce qui en limite l'efficacité recherchée. Le ratio habitat créé / artificialisation est par ailleurs rarement optimisé.

Le projet 3D'COMPLEX vise à répondre à ces enjeux en développant des solutions innovantes pour améliorer la biodiversité et la fonctionnalité écologique des récifs artificiels d'anciennes générations présentes en France. En s'appuyant sur des technologies avancées, telles que l'impression 3D, et des stratégies d'aménagement, le projet propose une approche intégrée pour optimiser la complexité structurelle, renforcer les corridors écologiques et évaluer leur impact sur la faune marine.

## 1.1 CONTEXTUALISATION

### 1.1.1 Complexifier les récifs artificiels en France et en Occitanie, un besoin d'innovation couplé à la limitation de futures artificialisations

Depuis 40 ans, plus de 30 000 m<sup>3</sup> de récifs artificiels ont été immergés sur le littoral d'Occitanie (Cepalmar, 2015). Si une certaine efficacité écologique a pu être décrite, la majorité des modules utilisés sont issus du monde de l'industrie de la préfabrication et n'ont pas été spécifiquement conçus pour accueillir la faune et la flore marine.

Habituellement utilisées pour le drainage des eaux et la réalisation de réseaux d'assainissement, il y a par exemple **près de 1 000 buses en béton** réparties dans les petits fonds côtiers occitans (Cepalmar, 2015). Or l'absence d'approche biomimétique et de prise en compte de l'éthologie des espèces et stades ciblés et de leur connectivité inter-habitats limitent l'efficacité des récifs immergés d'un point de vue des fonctions écologiques qu'ils pourraient remplir (e.g Pioch, 2008 ; Koeck, 2012).



En 40 ans, 32 000 m<sup>3</sup> de récifs ont été immergés dans les petits fonds d'Occitanie sur 10 sites différents.

Ceci étant dit, différents travaux ont mis en évidence l'intérêt de complexifier les concessions de récifs existantes pour y améliorer et diversifier les fonctions écologiques (e.g Charbonnel et al., 2002). L'approche de complexification de récifs existants, entendue comme « l'ajout de nouveaux modules de nature différente sur un site existant » est de ce fait identifiée comme « justifiée » dans l'actuel document stratégique pour l'implantation de récifs artificiels s'appliquant à la Région Occitanie. Ce projet s'inscrit par ailleurs dans un objectif fort de Zéro artificialisation nette et de la loi européenne sur la Restauration de la Nature, les deux ayant un objectif concomitant nécessitant le développement de nouvelles solutions opérationnelles. Membres du Pôle Mer Méditerranée et acteurs majeurs de la thématique des récifs artificiels en Occitanie, les entreprises SEABOOST et SEANEO se sont associées pour répondre à ces enjeux. Le projet 3D'Complex a pour ambition d'améliorer les savoir-faire techniques et scientifiques associés à la démarche de complexification des concessions de récifs

artificiels en Occitanie par l'expérimentation de technologies innovantes et complémentaires sur la commune de Valras-Plage.

### **1.1.2 Valras-Plage : un site historiquement suivi, idéal pour la mise en place d'un démonstrateur expérimental**

Station balnéaire de l'arrière-pays occitan située à l'embouchure de l'Orb, la commune de Valras-Plage est caractéristique du contexte environnemental et socio-économique du littoral de la Région d'Occitanie. Afin d'accueillir les différents usagers de la mer (tourisme balnéaire, plaisanciers, pêcheurs), le littoral de la commune a été aménagé au cours du temps. Il se caractérise désormais par un linéaire côtier sableux artificialisé comprenant près de 2 km d'épis et de digues en enrochements dont les plus récents ont été réalisés en 2013, des bouées de balisages (zone de baignade, chenaux) et des lests et ancrages.

En 2006, la commune de Valras-Plage a procédé à l'immersion de récifs artificiels. Cette opération qui a reçu le soutien de la Prud'homie des pêcheurs locale, du Conseil Général de l'Hérault, du conseil Régional et du Cépralmar, avait pour objectif de développer la fonctionnalité écologique globale des petits fonds côtiers de la commune par :

- La création de petits fonds de substrats durs ;
- La protection des petits fonds de substrats meubles contre le chalutage illégal.

Deux zones perpendiculaires aux aménagements côtiers de la commune ont été retenues pour l'implantation des récifs artificiels entre - 9 m et - 20 m de profondeur. Ainsi, 46 récifs artificiels de deux types (double-buses de chantier et paniers acier) ont été immergés dans les petits fonds côtiers de la commune (Figure 3). La concession pour les 2 zones d'implantation des récifs artificiels a été établie sur 30 ans (2006 – 2036) par arrêté Préfectoral 2006-01.1989.

Fortement impliquée, la commune de Valras-Plage a mandaté la société SEANEO pour la réalisation des suivis écologiques et techniques de la concession existante de récifs artificiels depuis maintenant seize ans. Il s'agit d'une des seules collectivités d'Occitanie à avoir volontairement maintenu un suivi écologique sur une telle durée.

Depuis 2008, SEANEO effectue des suivis environnementaux *in situ*, couplés avec les inventaires halieutiques des pêcheurs, dans le but d'analyser l'efficacité écologique et économique des récifs artificiels de Valras-Plage. Il s'agit ainsi d'une des concessions de récifs artificiels les plus étudiées de Méditerranée française. Les 46 récifs artificiels, implantés par la commune de Valras-Plage en 2006, sont principalement des doubles buses en béton (35 unités) immergées entre -9 m et -20 m de profondeur.

Il s'agit d'un assemblage de deux éléments préfabriqués standards, deux canalisations en béton armé emboîtées. La plus grande présente un diamètre externe de 1,92m. 12 d'entre elles reposent sur un tapis anti-affouillement. Cela permet la recréation de deux grandes cavités longitudinales uniques, une configuration peu à pas observée en milieu naturel.

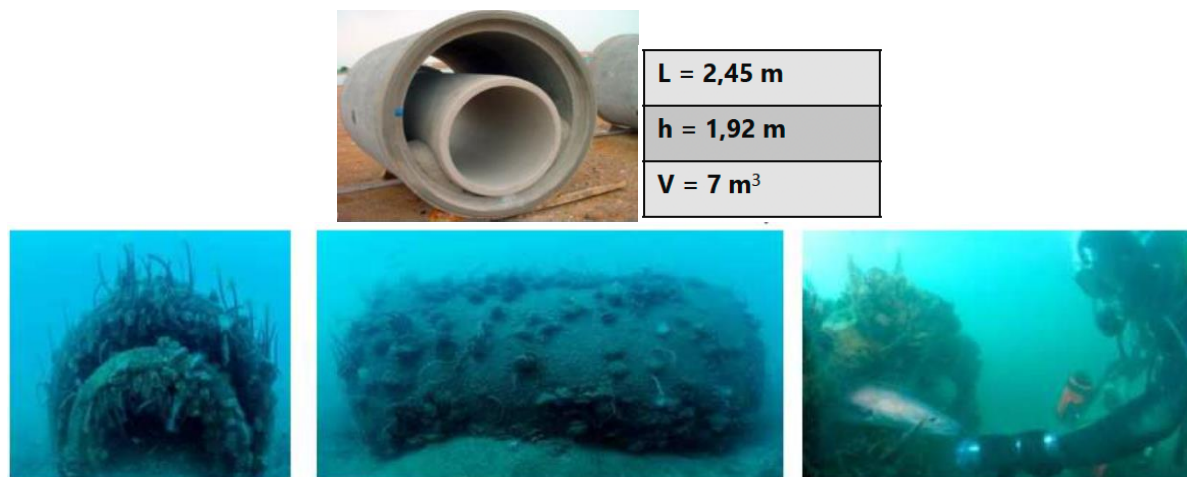


Figure 1 : Photos et dimensions d'une des 35 doubles buses immergées à Valras-Plage

Neuf années de suivi ont été réalisées depuis leur implantation : 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2014, 2016, 2018 et 2021 (Tableau 1). Cette concession de récifs artificiels est ainsi l'une des plus étudiées de Méditerranée française.

Sur le plan physique, la tenue à la mer des récifs artificiels est satisfaisante, l'enfouissement ou le changement d'orientation à travers le temps étant relativement faibles, sauf dans les plus petits fonds ou certaines buses peuvent périodiquement disparaître (Dalias et al., 2018). Biologiquement, la mise en place d'un substrat dur disponible pour la faune et la flore a permis une installation de peuplements relativement diversifiés (vertébrés et invertébrés) malgré un design peu adapté. Ces suivis historiques ont permis de mettre en évidence une diversification de la fonctionnalité écologique des petits fonds de la commune de Valras-Plage au cours du temps associée à l'apparition d'espèces caractéristiques des substrats durs (capelans, congres, sars, loups langouste, homard, etc.). Une fonction d'habitat pour les stades juvéniles en phase de recrutement vers les populations adultes a pu être décrite pour certaines espèces comme le sar commun, observé à des stades immatures. Une fonction de reproduction a également été mise en évidence pour différents taxons, notamment les céphalopodes (seiches, calmars) (Dalias et al., 2018).



Figure 2 : Photos historiques de colonisation des doubles buses et récifs de Valras-Plage avant complexification lors du Projet 3D'Complex

Tableau 1 : Périodes de réalisation des terrains d'observation. Les croix indiquent les années et les saisons au cours desquelles ont été réalisées les campagnes

		ANNÉE													
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
SAISON	Froide	X	X	X	X	X									
	Chaude	X	X	X	X	X		X		X		X			X

Les récifs artificiels ont été déployés en 2 zones sur un fond sablo-vaseux entre -9 et -25 m de profondeur, à environ 1km de la côte (Figure 3). Dans chaque zone, la distance entre 2 unités (tuyaux ou cages en acier) est d'environ 220 m. Ces deux zones (zone 1 et zone 2) correspondent à deux bandes, perpendiculaires à la côte, à l'intérieur desquelles ont été immergés :

En zone 1 :

- 18 récifs artificiels type double-buse (dont 7 avec tapis anti-affouillement)

En zone 2 :

- 17 récifs artificiels type double-buse (dont 6 avec tapis anti-affouillement)

Si ces récifs artificiels type double-buse sont certainement les plus nombreux actuellement immergés en Occitanie, les résultats de suivis écologiques montrent également que leur manque de complexité limite leur potentiel écologique au regard des écosystèmes naturels avoisinants ou d'autres types de récifs artificiels immergés à proximité.



Figure 3 : Schéma d'implantation des récifs artificiels au large de la commune de Valras-Plage dans la concession d'implantation des récifs artificiels établie sur 30 ans (2006 – 2036) par arrêté Préfectoral 2006-01.1989

## 1.2 OBJECTIFS

Les résultats du suivi technique et écologique réalisé par SEANEO et la commune de Valras-Plage depuis 15 ans entre 2006 et 2018 amènent à plusieurs constats et pistes d'amélioration formulées lors du montage du présent projet :

- Parmi les récifs immergés à Valras les doubles buses sont les plus nombreuses et présentent une faible complexité en raison de l'important volume de vide et de l'absence de petites cavités. Une complexification du récif pourrait être mise en place afin d'optimiser leur intérêt écologique.
- Il n'existe pas de connaissances sur la connectivité des zones potentielles de nurseries de la côte (épis en enrochements) avec les concessions de récifs artificiels au large ciblant les stades adultes à 1km au large.
- Il n'existe pas de donnée sur les espèces et stades de vie ciblant la zone sableuse entre les épis en enrochements et potentiellement protégées par les récifs artificiels du large.

Le projet 3D'COMPLEX est un projet expérimental structuré autour de trois grandes thématiques complémentaires visant à adresser sur le court terme les enjeux énoncés ci-dessus.

### • **Thématique 1 : Complexification des concessions existantes**

Ce volet vise à développer et mettre en œuvre des techniques innovantes pour la complexification des récifs artificiels déjà en place à Valras-Plage, avec l'objectif de les rendre applicables à d'autres sites en région Occitanie tout en limitant à l'avenir le taux d'artificialisation au sein des concessions existantes dédiées.

12 double buses historiquement suivies ont été complexifiées par l'association de technologies et matériaux complémentaires dont l'impression 3D béton et étudiées pendant deux années. Les modules de complexification consistent en des éléments de différentes natures : superstructure préfabriquée en béton, modules récifaux imprimés en 3D béton, gabions remplis de matériaux coquilliers recyclés. Ces derniers habilleront les parties internes et externes des doubles buses actuelles de façon à en améliorer l'intérêt écologique et ce, altérer les peuplements déjà en place. L'intérêt de la complexification sera étudié en comparant les résultats obtenus sur ces 12 récifs habillés aux résultats passés (récifs suivis depuis plus de 10 ans). En parallèle, 12 récifs doubles buses non complexifiés continueront d'être suivis.

### • **Thématique 2 : Amélioration de la connectivité écologique**

8 corps-morts éco-conçus recréant des substrats durs ont été installés pour le balisage d'un chenal maritime et étudiés pendant deux années. Les espèces et stades de vie observés seront comparés aux observations réalisées à la côte dans les épis en enrochements existants et sur les zones de sable avoisinantes. Un intérêt particulier sera porté aux espèces de substrat meuble et aux stades juvéniles. D'un point de vue économique, l'installation, la désinstallation et l'entretien des balisages constituent un poste de dépense non négligeable pour la collectivité (coût des fournitures pour l'entretien ou le remplacement des balises et de leurs ancrages à vis ensevelis ou perdus, coûts des contrats de travaux si externalisés, coût des moyens nautiques et de mobilisation des agents si réalisé en interne, etc.).

### • **Thématique 3 : Étude des populations de substrats meubles en milieu urbain**

Ce lot n'est pas concerné par l'immersion d'habitats artificiels et fait l'objet d'une demande d'autorisation spécifique auprès de la DIRM. Ce dernier est décrit afin d'avoir une vision plus globale des objectifs du projet. La commune de Valras-Plage souhaite en effet adopter une démarche complémentaire d'amélioration des connaissances sur les zones de nurserie de son littoral historiquement urbanisé et plus particulièrement des petits fonds sableux. L'immersion de récifs artificiels (effet de protection physique et de dissuasion contre le chalutage illégal dans la bande des 3 miles) et la présence d'épis en enrochements le long des plages pourrait avoir

bénéficié à certaines espèces au stade juvénile (poissons, crustacés, céphalopodes...) dont potentiellement des espèces inféodées aux substrats meubles. Des pêches expérimentales (sennes tirées depuis les plages) ciblant les stades juvéniles ont été réalisées dans les zones potentiellement sous l'influence de la protection des récifs artificiels à l'intérieur des plages alvéolaires. Des comparaisons ont été effectuées sur les mêmes profondeurs en dehors des zones potentielles d'influence et de protection des récifs artificiels et épis existants. Ce dernier volet vise ainsi à approfondir les connaissances sur les fonctions écologiques des biocénoses côtières associées aux substrats meubles, ainsi que sur l'effet potentiel des digues en enrochements et épis dans la protection et la valorisation des zones sableuses.

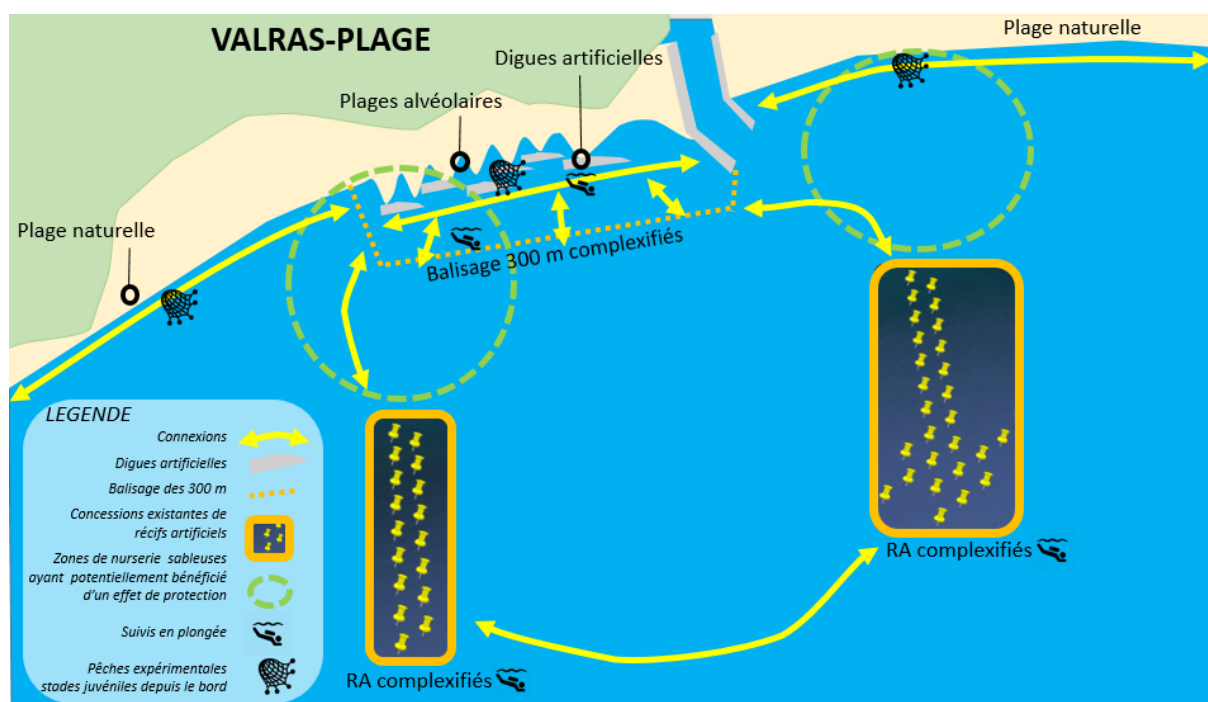


Figure 4 Schéma de synthèse du projet 3D'Complex qui comprend Lot 1 : la complexification de 12 récifs type double buse Lot 2 : l'installation de 8 corps morts écologiques pour le balisage d'un chenal maritime et Lot 3 : le suivi des zones sableuses au sein des plages alvéolaires et à l'extérieur

Le projet 3D'COMPLEX développe une approche intégrant les enjeux côtiers et les enjeux du large dans une même continuité. Basé sur de l'innovation en ingénierie écologique appliquée au territoire maritime de la commune de Valras-Plage, le projet vise à mieux comprendre les fonctionnalités écologiques des ouvrages artificiels au sein des écosystèmes littoraux altérés par les aménagements côtiers et les activités anthropiques.

**Le projet se focalise donc sur un axe stratégique majeur : considérer les concessions de récifs artificiels et de balisage de la collectivité comme des écosystèmes à part entière, et agir de sorte à ce que leur potentiel écologique soit pleinement connu et si possible, optimisé, tout en limitant l'artificialisation futurs des littoraux d'Occitanie.**

**A l'échelle de la collectivité, le projet vise à :**

- Dynamiser le tissu économique local tourné vers les activités de pêche et les activités récréatives sous-marines, par la complexification des structures en place ;
- Assurer la préservation des habitats marins les plus vulnérables (nourricerie de petits fonds sableux) ;

- Une meilleure intégration sous-marine par la mise en place de structures artificielles paysagères.

**Le projet comporte également plusieurs objectifs économiques pour les entreprises partenaires :**

- Développer un outil de complexification modulable des concessions existantes, et ainsi extensible à l'ensemble des collectivités littorales d'Occitanie et de Méditerranée française ;
- Développer une offre innovante en matière d'habitats artificiels de nurseries de substrat dur ;
- Optimiser les coûts de fabrication et de pose des micro-habitats de nurseries ;
- Développer de nouvelles méthodologies de suivis adaptées à la thématique.

## 2. LOT 1 - COMPLEXIFICATION DES CONCESSIONS EXISTANTES

Le lot 1 consiste en la mise au point de techniques innovantes de complexification des concessions existantes des récifs artificiels de Valras-Plage augmentant la performance écologique des solutions en place et pouvant être répliquables aux autres concessions de récifs artificiels d'Occitanie.

### 2.1 MÉTHODOLOGIE

#### 2.1.1 Description de la phase conception et travaux

Les récifs « doubles buses » sont constitués de deux cavités longitudinales uniques (Figure 5). Elles n'ont pas particulièrement été conçues pour accueillir la vie marine même si certaines espèces opportunistes ont bel et bien colonisé les ouvrages depuis une quinzaine d'années (ex : congres, tacauds).

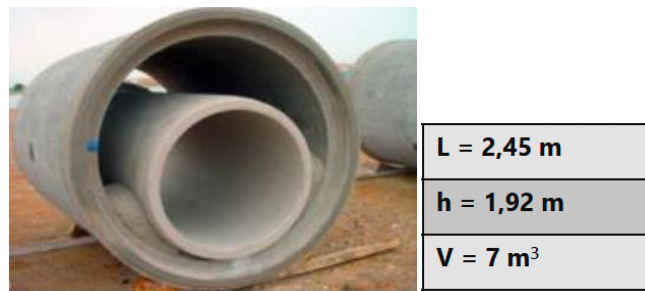


Figure 5 : Photo et dimensions d'une double buse

L'objectif n'est pas de densifier en créant de nouveaux récifs mais bien de complexifier ces doubles buses afin d'étudier les potentiels impacts positifs sur les fonctions suivantes : habitat / nurserie / reproduction / alimentation tout en limitant le taux d'artificialisation complémentaire au sol.

Dans une optique d'innovation et de répliquabilité, l'impression 3D béton a été privilégiée notamment pour limiter :

- Le volume de matériaux immergés ;
- L'emprise au sol ;
- Le poids sur les structures existantes ;
- L'empreinte carbone d'une action de complexification (ratio optimisé de complexité créée et du volume Immergé).

Ainsi SEABOOST a développé des arches de complexification appelées « 3D'Complex ». Ces arches ont été immergées et positionnées sur 12 récifs double-buse existants (Figure 6 et Figure 7).

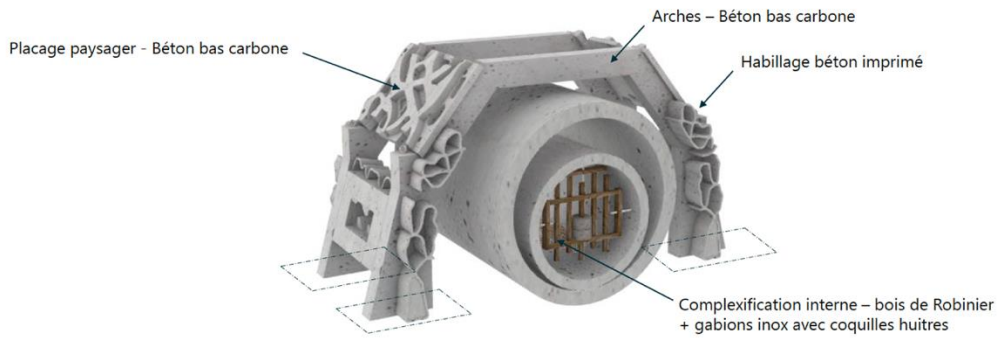
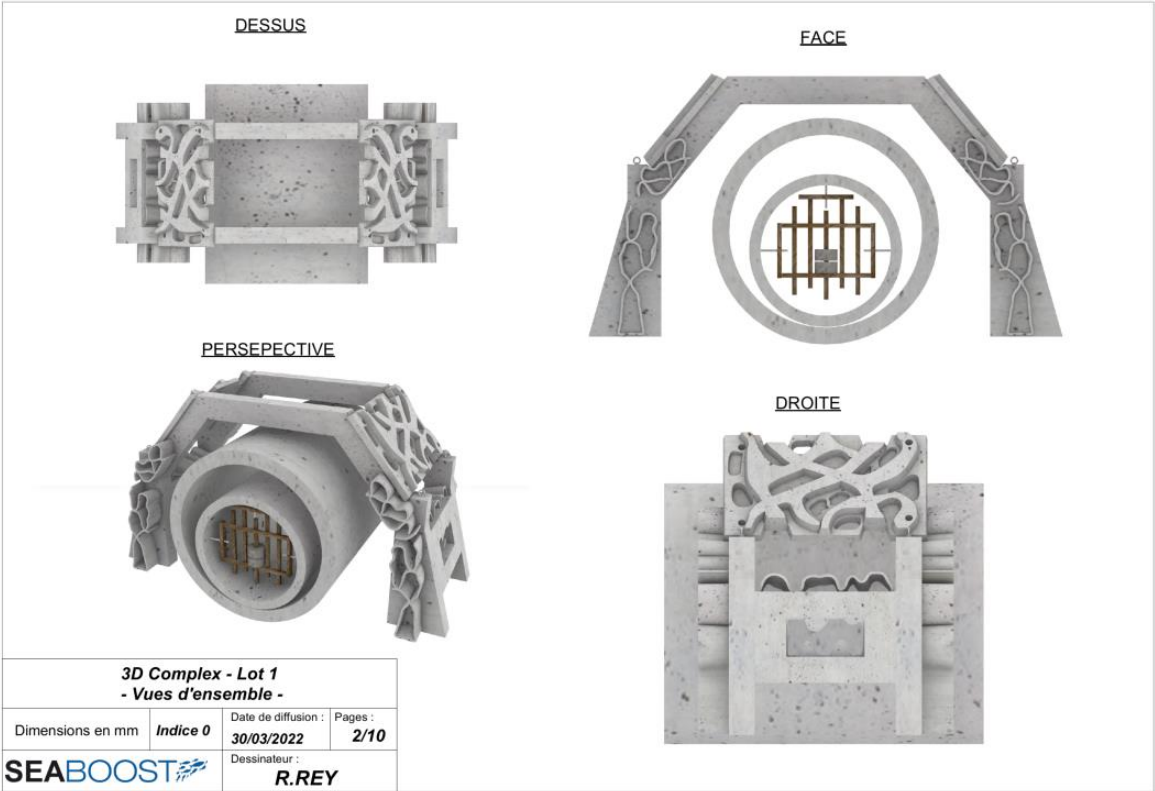
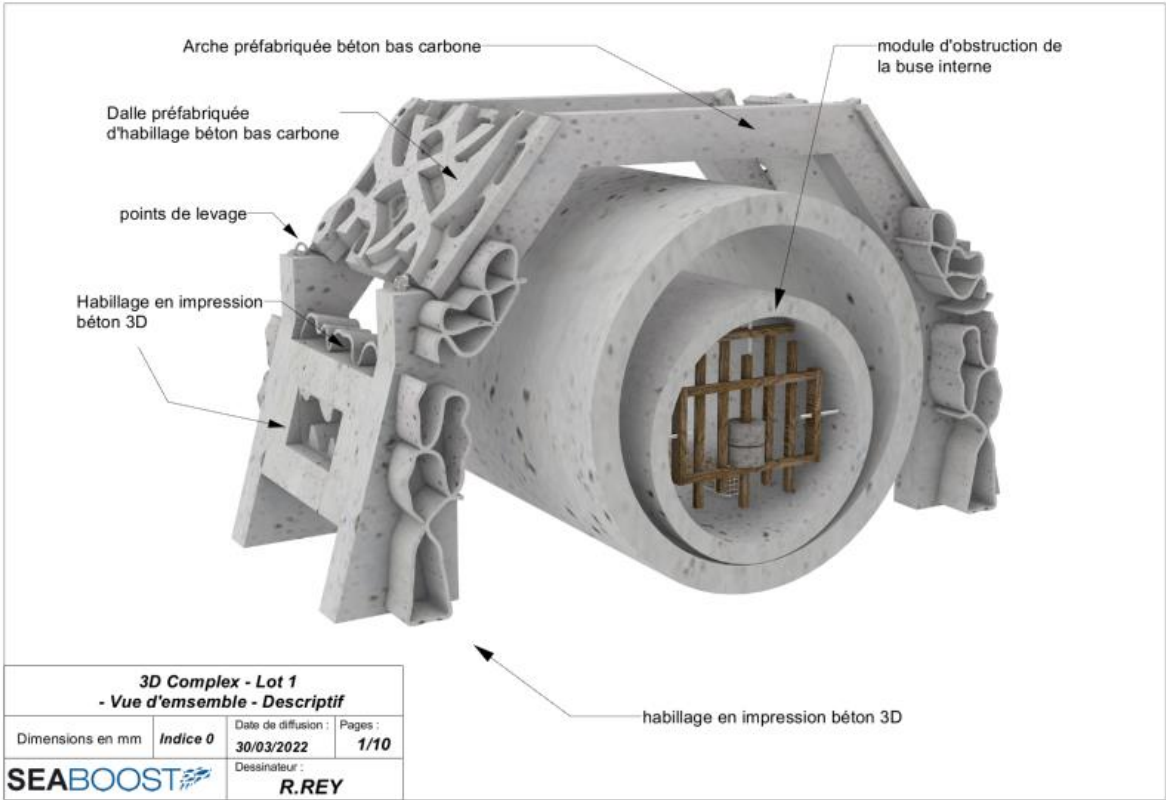


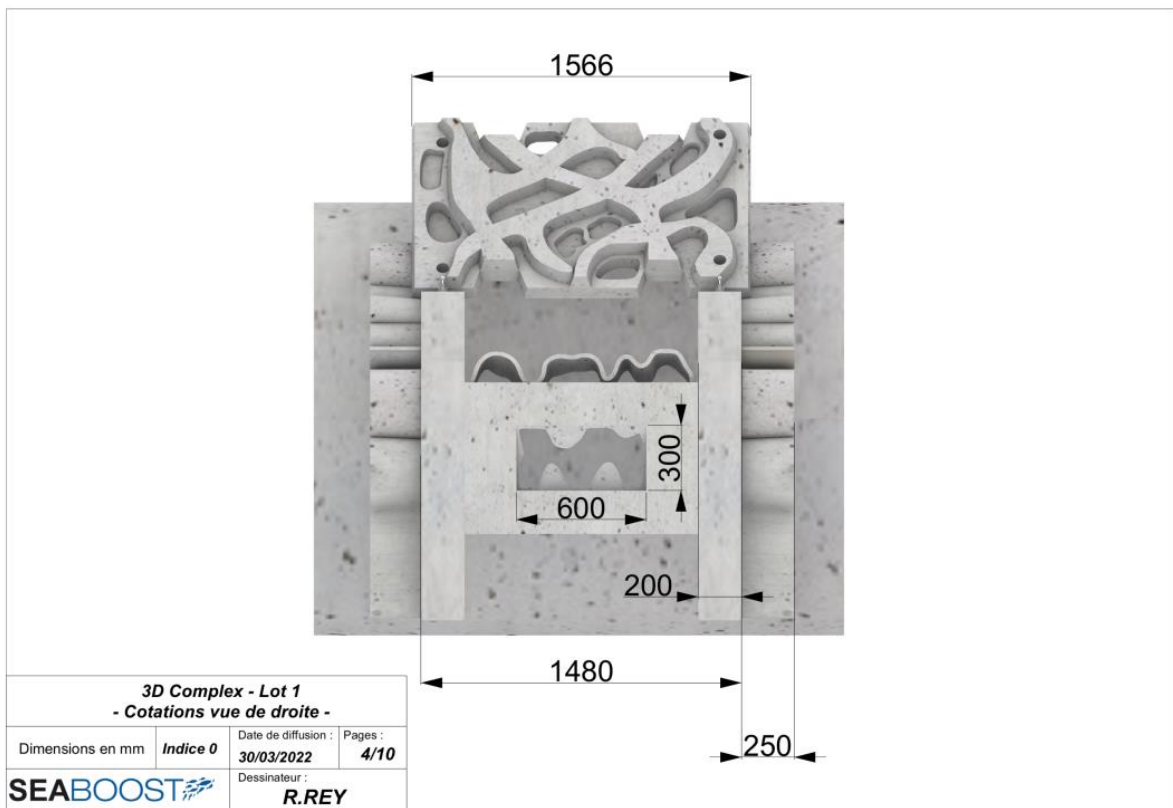
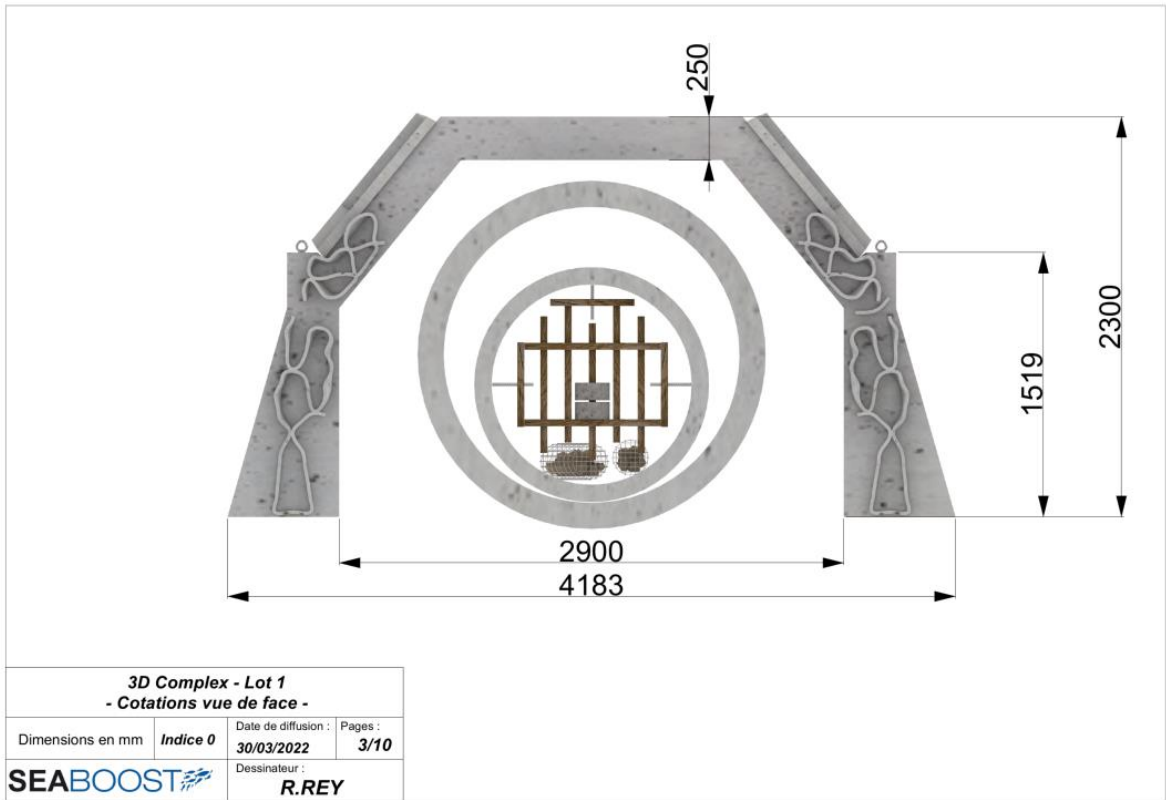
Figure 6 : Illustration d'une double buse complexifiée par un module 3D'Complex



Figure 7 : Photo d'un récif double buse complexifié par un module 3D'Complex

Les plans de conception EXE aux pages suivantes illustrent les arches de complexification « 3D'Complex » utilisées (Figure 8).





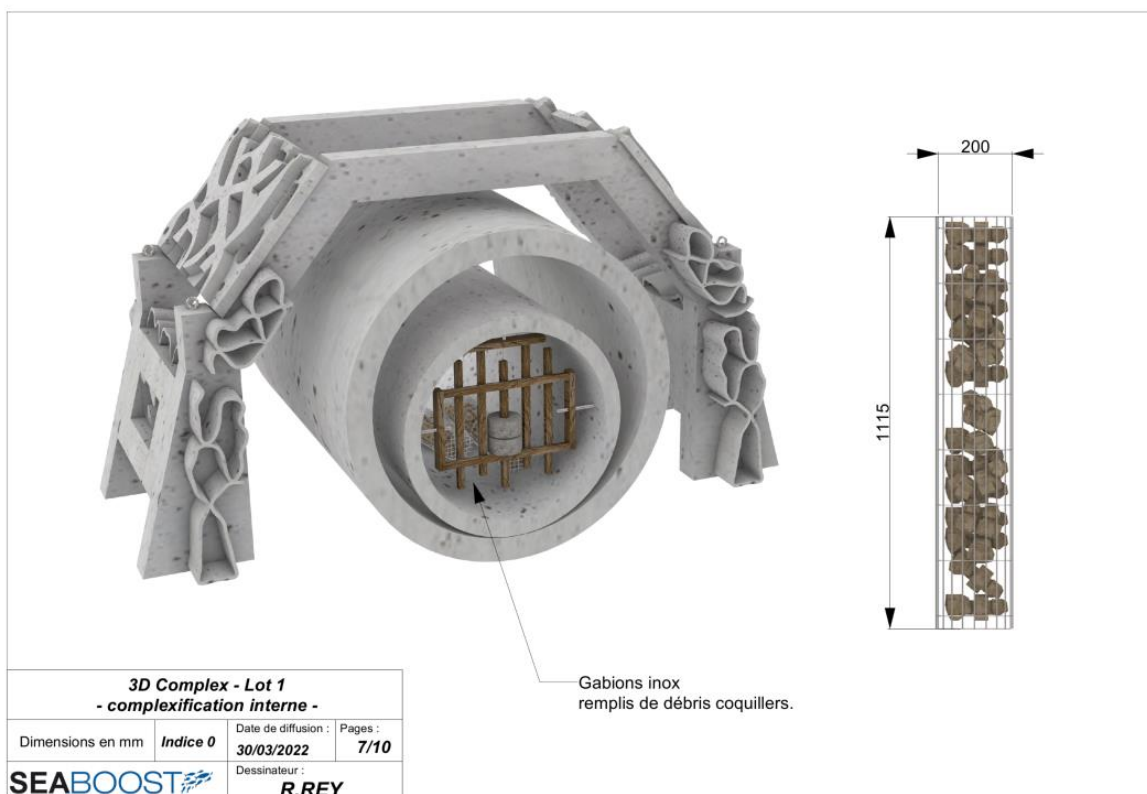


Figure 8 : Plans EXE d'un récif double-buse complexifié par un module 3D'Complex

## 2.1.2 Choix des récifs à complexifier

Les récifs à complexifier ont été sélectionnés en fonction du nombre de suivis écologiques et scientifiques historiquement réalisés afin d'étudier au mieux l'effet Avant/Après d'une action de complexification. Parmi les récifs disposant d'un historique de suivi le plus complet (Tableau 2), six ont été choisis dans chaque zone d'étude (zone 1 et zone 2) afin d'obtenir un équilibre dans l'échantillonnage.

Tableau 2 : Nombre de campagnes de suivis pour chacun des récifs en 2021 avant complexification

Zone	Module	Code	Traitement	Nombre de campagnes totales réalisées depuis 2008
Zone 1	Buse (+Tapis)	Z1T13	A complexifier	13
Zone 1	Buse (+Tapis)	Z1T15	A complexifier	13
Zone 1	Buse	Z1T22	A complexifier	10
Zone 1	Buse	Z1T24	A complexifier	10
Zone 1	Buse	Z1T27	A complexifier	10
Zone 1	Buse (+Tapis)	Z1T11	A complexifier	0
Zone 1	Buse (+Tapis)	Z1T14	Témoin	0
Zone 1	Buse (+Tapis)	Z1T16	Témoin	0
Zone 1	Buse	Z1T23	Témoin	0
Zone 1	Buse	Z1T25	Témoin	0
Zone 1	Buse	Z1T26	Témoin	0
Zone 1	Buse	Z1T28	Témoin	0
Zone 2	Buse (+Tapis)	Z2T12	A complexifier	13
Zone 2	Buse (+Tapis)	Z2T14	A complexifier	13
Zone 2	Buse	Z2T27	A complexifier	12
Zone 2	Buse	Z2T24	A complexifier	11
Zone 2	Buse	Z2T21	A complexifier	10
Zone 2	Buse (+Tapis)	Z2T13	A complexifier	0
Zone 2	Buse (+Tapis)	Z2T15	Témoin	0
Zone 2	Buse (+Tapis)	Z2T16	Témoin	0
Zone 2	Buse	Z2T22	Témoin	0
Zone 2	Buse	Z2T23	Témoin	0
Zone 2	Buse	Z2T26	Témoin	0
Zone 2	Buse	Z2T29	Témoin	0

Code couleur	
	Non suivi
	Module suivi jusqu'à l'année 5
	Module suivi jusqu'à l'année 11
	Module suivi jusqu'à l'année 5 puis en année 11
	Module suivi jusqu'à l'année 5 puis en années 9 et 11

Les zones 1 et 2 contiennent donc respectivement six récifs complexifiés et six récifs témoins. Sur ces 6 récifs par zone, 3 modules sont répartis en zone profonde (>15 m) et 3 autres en zone moins profonde (<15 m) (Figure 9, Figure 10).

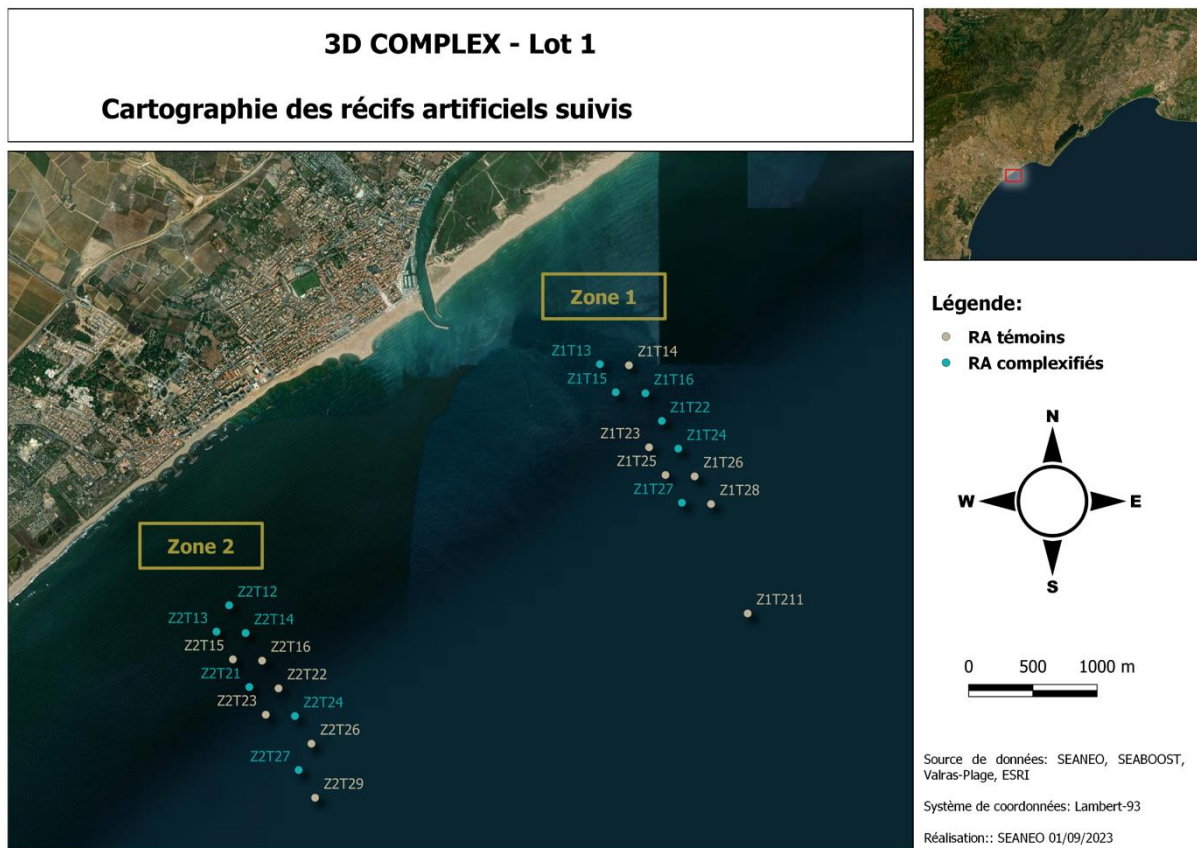


Figure 9 : Localisation des récifs double buse en place dans chaque zone et description du plan de complexification

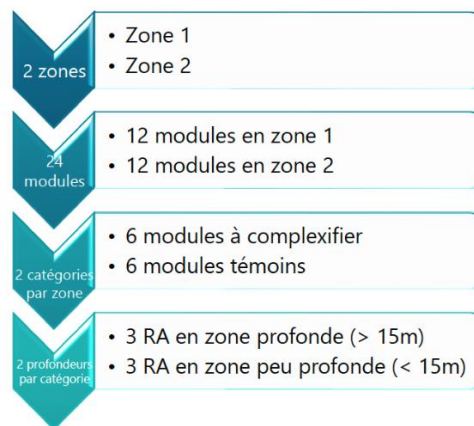


Figure 10 : Critères de répartition des récifs témoin et des récifs complexifiés et synthèse du schéma expérimental

## 2.1.3 Description de la phase conception et de la phase travaux

### 2.1.3.1 Conception et dimensionnement

La première étape de la conception a été de recueillir des données sur les doubles buses existantes pour appréhender au mieux leur état structurel, leur niveau de colonisation, leur potentiel enfouissement, l'état de l'environnement direct autour de la buse (sable, sol rocheux, obstacles) et faire un relevé de leur géométrie.

Les plongées de reconnaissances effectuées en 2021 en amont de la conception du récif de complexification du lot 1 ont notamment permis d'observer un niveau de colonisation important sur certaines buses qui sont présentes sur le site depuis déjà un certain nombre d'années. Il a donc été choisi de ne pas intervenir directement au contact de l'ouvrage existant, principalement pour deux raisons :

- Ne pas dégrader la colonisation déjà présente sur certaines structures.
- Ne connaissant pas l'état structurel des buses (du béton et des armatures), il semblait peu sécuritaire de les utiliser comme support pour un ouvrage complémentaire de complexification à grande échelle.

La structure à concevoir devait donc envelopper la double buse. La forme d'Arche s'est donc imposée au cours de l'étude de conception. Cela mène toutefois à plusieurs difficultés qui ont fait l'objet d'études approfondies :

- Gestion de la stabilité d'un ouvrage « haut et élancé »
- Gestion de la position des centres de masses pour rendre possible l'immersion sans retournement.

#### SYNTHESE ETUDE HYDRODYNAMIQUE :

La conception en phase étude commence nécessairement par une compréhension du contexte hydrodynamique du site. Direction principale de houle, profondeur, hauteur de vague. Tels sont les paramètres essentiels aux vérifications de stabilité de la structure (Figure 11).

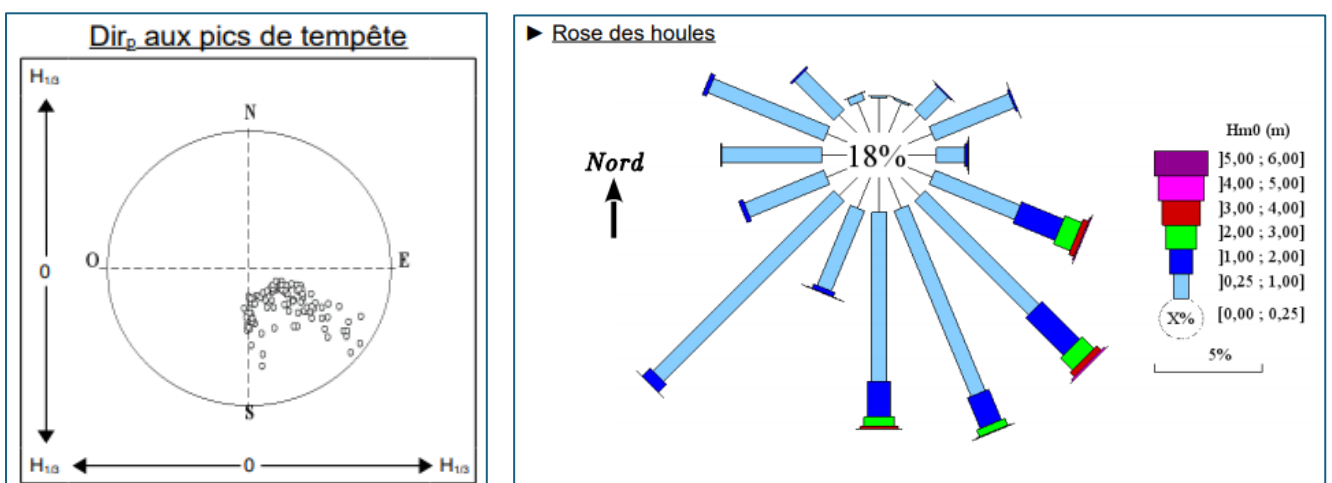


Figure 11 : Direction des houles au large selon la hauteur de vague - campagne de mesures Candhis

Il en résulte une houle dominante de direction **Sud / Sud-Est**

On calcule ensuite la hauteur de vague correspondante en fonction de la profondeur d'installation des récifs :

Profondeur 10m : Hs 7.09 m  
 Profondeur 15m : Hs 9.53 m  
 Profondeur 20m : Hs 10.24 m

Ces hauteurs de vagues permettent de calculer analytiquement les efforts qui s'appliquent sur le récif modélisé par un volume enveloppe simplifié. Les conclusions sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Profondeur P	Sens // à la buse	Sens ⊥ à la buse	Nombre de µpieu	Modèle de µpieu	Nombre de buse concerné	N° de buse concernée						Nombre de TF M20 de 1ml	Nombre de BO M10-M12
						Sans TAP			Avec TAP				
<i>en m</i>	<i>besoin</i>	<i>besoin</i>	<i>u</i>	<i>mm</i>	<i>u</i>							<i>u</i>	<i>u</i>
P<15m	µpieu	µpieu	4	M20	6	Z1T13	Z1T15	Z1T16	Z2T12	Z2T13	Z2T19	24	48
15m<P<20m	-	µpieu	4	M20	6	Z1T22	Z1T24	Z1T27	Z2T21	Z2T27	Z2T29	24	48
P>20m	-	-	0	-	0							0	0
TOTAUX	-	-		-	12							48	96

Figure 12 : Résultats des calculs de stabilité pour les modules 3D' Complex

Pour les profondeurs supérieures à 20m le module de complexification est dit « auto-stable », leur masse est donc suffisante pour compenser les moments de retournement, soulèvement et glissement calculés. Pour les profondeurs inférieures, le glissement n'est pas validé sous les hypothèses prises. SEABOOST a donc proposé l'ajout de micro pieux en partie basse de la structure (au niveau des pied) qui, en mobilisant un cône de sable supplémentaire dans le substrat accroissent la tenue de la structure vis-à-vis du glissement. Les buses concernées par l'ajout de micro pieux sont spécifiées dans le tableau des résultats.

**Conclusion :**

La structure est validée vis-à-vis des contraintes hydrodynamiques, un ajout de micropieux est préconisé au regard des efforts de glissement trop important sur certaines double buses.

**SYNTHESE ETUDE STRUCTURELLE :**

Une fois l'étude hydrodynamique réalisée, on connaît l'ordre de grandeur de la masse à respecter et les dimensions enveloppe de l'ouvrage à concevoir pour valider la tenue du module de complexification. La répartition des masses a été un réel enjeu pour la fabrication de ce récif. D'autant plus que les intérêts écologiques ne convergeaient pas avec les besoins de stabilité de l'ensemble. En effet il apparait pertinent de complexifier la partie haute de la structure, elle présente une meilleure exposition et un potentiel de colonisation plus élevé. En revanche il est préférable d'ajouter de la masse en partie basse du récif pour favoriser une bonne stabilité. L'emprise de la partie basse doit cependant être minimisée afin de limiter le taux d'artificialisation des fonds marins.

Le compromis trouvé a été d'affiner au maximum la section de l'arche en partie haute pour que la masse soit apportée uniquement par des éléments de complexification ayant un rôle écologique. Dans la partie basse, se concentrent les fonctions structurelles : levage, retournement et ferrailage plus important.

Les équipes de conception ont notamment utilisées des matériaux innovants pour alléger la structure en partie haute. En effet les placages paysager ont été ferrailés à l'aide de barres de fibre de verre, cette technologie offre deux avantages majeurs. Tout d'abord, cette matière n'est pas soumise à la corrosion, ainsi les règles d'enrobages qui s'appliquent pour les armatures en acier ne sont pas une contrainte ici. Le placage a donc pu être aminci de manière à ne conserver que la partie matricée,

fonctionnelle pour le développement des organismes, associée à une dalle fine comportant les armatures pour assurer l'intégrité structurelle de cet ensemble. Par ailleurs les performances mécaniques de la fibre de verre permettent d'assurer une durabilité importante pour cet élément préfabriqué. L'équipe de conception devait également maximiser l'utilisation de l'impression 3D. On retrouve donc cette technologie sur toutes les faces exposées de la structure.

Le schéma ci-dessous montre la position du centre de masse en fonction de la ligne passant par les points de levage. Cela permet de s'assurer que la structure ne se retourne pas durant la phase de remorquage sous l'eau ou pendant les manipulations terrestres.

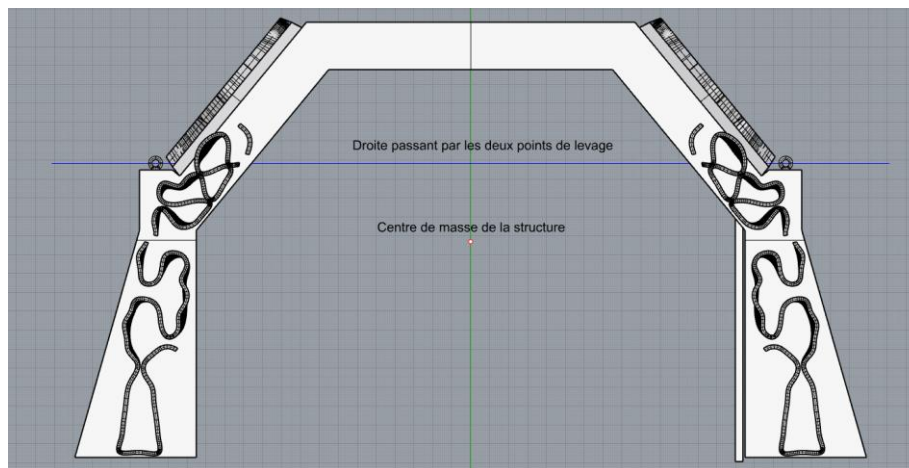


Figure 13 : Répartition des masses sur la structure

L'étape essentielle une fois la géométrie conçue est de s'assurer que les sections supportent les contraintes structurelles qui s'appliquent durant le cycle de vie de la structure. Après analyse des efforts structurels, il s'avère que la phase la plus contraignante pour la structure est la manutention. Les hypothèses sont les suivantes :

**$Poids\ considéré\ (N) = Masse\_propre\ (kg) \times 9.81 \times coeff.dynamique \times coeff.élingage$**

Cette donnée est le point d'entrée pour le dimensionnement des sections et de leur ferrailage. Au regard des contraintes et de la géométrie de la structure, il va sans dire qu'il était nécessaire d'armer le béton pour reprendre les moments de flexion qui s'exerçaient dans les parties les plus fines de la structure essentiellement en partie hautes des arches 3D'Complex.

Plusieurs étapes de calcul ont permis de mener à la réalisation du schéma de ferrailage suivant associé à un matériau décrit ci-après :

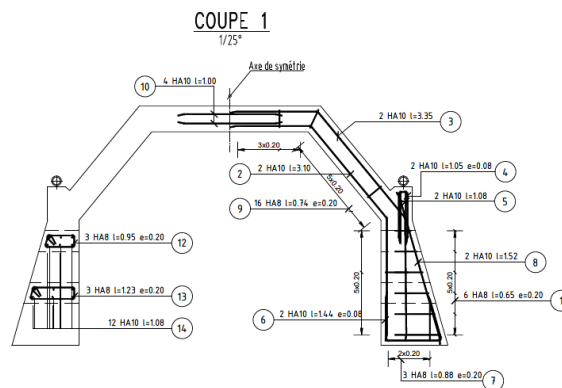


Figure 14 : Principe de ferrailage retenu pour l'arche

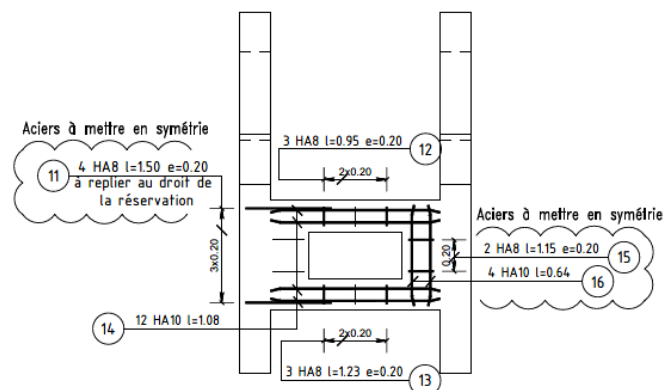


Figure 15 : Principe de ferrailage retenu pour les zones de liaisons

#### Matériau retenu et composition du béton :

- Granulats 4/8
- Sable 0/4
- Ciment : CEM III 52.5N PM-ES (ciment prise mer avec % de clinker faible, bilan carbone amélioré)

fck =	50	Mpa
fcm =	58	Mpa
$\gamma_c$ =	1,5	
fcd =	33,3	Mpa
fctm =	4,07	Mpa
fctm,fl =	6,03	Mpa
fctk0,05 =	2,85	Mpa
fctk0,95 =	5,29	Mpa
fctd =	1,90	Mpa

Figure 16 : Caractéristiques mécaniques du béton préfabriqué bas-carbone retenu

**A noter que l'emprise finale unitaire de chaque module de complexification 3D'Complex se limite aux 4 pieds des arches de 0.64 m x 0.2 m, soit un total de 0,51m<sup>2</sup> par module et 6,12 m<sup>2</sup> pour l'ensemble du démonstrateur.**

#### Conclusion :

Les points suivants de la structure ont fait l'objet d'un dimensionnement sous le chargement le plus contraignant et ont été validé par des méthodes analytiques :

- Section béton des poutres

- Dispositif de levage (profondeur d'ancrage et dimensionnement des sections d'aciers)
- Ferrailage adapté (section, schéma de mise en œuvre)
- Formulation bas carbone adaptée
- La conception optimisée du module 3D'Complex est associée à une emprise d'artificialisation supplémentaire de 0,51 m<sup>2</sup> par module.

### 2.1.3.2 Procédé fabrication, assemblage et transport

La suite du procédé de conception de la structure de complexification se porte sur la partie de la fabrication. Les équipes de conception doivent réaliser l'ensemble des accessoires nécessaires à la production des modules de complexification 3D'Complex, en particulier le moule permettant de couler les arches. Il se présente sous la forme de joues réalisées par pliage de tôles. Les nuances d'acier sont sélectionnées pour limiter le phénomène d'abrasion et préserver le moule lors des nombreux coulages.

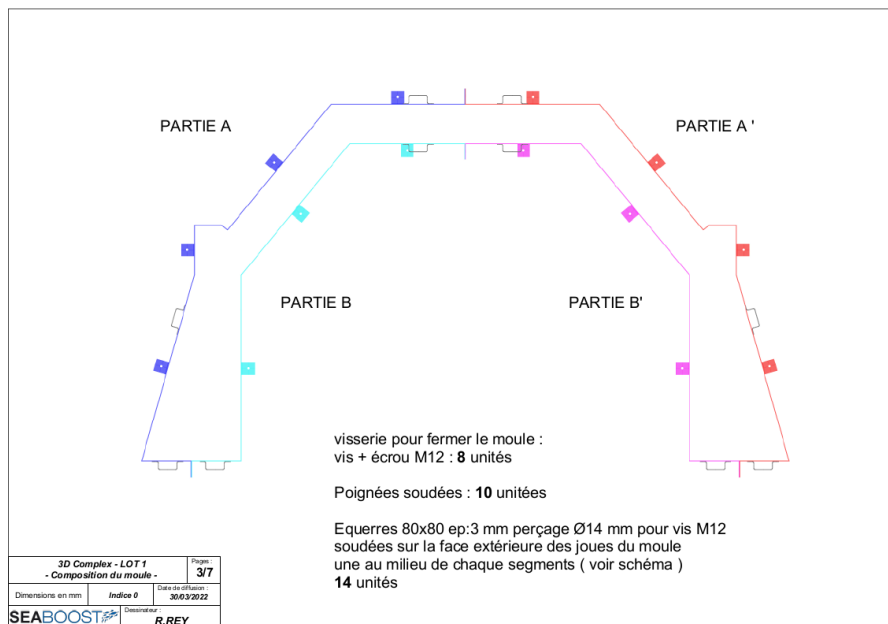


Figure 17 : Moule de chaudronnerie pour le coulage des modules 3D'Complex



Figure 18 : Etapes de fabrication des modules de complexification 3D'Complex

Etapes de production d'un module de complexification 3D'Complex :

- 1 – Préparation des ferrillages sur mesure
- 2 – Montage des différentes parties du moule
- 3 – Mise en place des armatures et contrôle des enrobages.
- 4 – Coulage et insertion des parties 3D dans le béton fraîchement coulé.
- 5 – Temps d'attente pour séchage (1 jour)
- 6 – Décoffrage et redressage de l'arche.

Une fois les arches redressées, il faut les mettre deux à deux face à face pour pouvoir mettre en place les armatures de liaisons. Une cage vient ensuite compléter la zone de liaison, les faces latérales sont coffrées de manière à pouvoir couler les « murs » de liaisonnement.

L'étape de redressage et de mise en place est visible sur l'image suivante :



Figure 19 : Mise en place des arches pour réalisation de la liaison du module 3D'Complex. L'ensemble des opérations ont été réalisées en Occitanie.

Les illustrations suivantes décrivent le module de complexification « 3D'Complex » avant les immersions.



Figure 20 : Modules 3D'Complex après assemblage. L'ensemble des opérations ont été réalisées en Occitanie

### 2.1.3.3 Opérations maritimes

Le déploiement en mer des modules de complexification a nécessité l'élaboration d'un phasage dédié. En effet chacune des arches de complexification avait une masse relativement importante +/- 5 T. la précision nécessaire à la pose était de +/- 45 cm en latéral afin de s'assurer que l'arche n'heurte pas le récif déjà en place.

Les zones de pose sont relativement éloignées de la côte (du moins pour effectuer du remorquage) et les structures doivent être posées sur 10 à 20 m de fond. Ces contraintes ont également été prises en compte pour la conception du phasage de déploiement.



Figure 21 : Rappel des zones d'immersion des modules de complexification 3D'Complex

Deux approches ont été étudiées.

#### Première approche :

Effectuer un largage des récifs à proximité des doubles buses à l'aide d'une barge équipée d'une grue avec croc largable. Par la suite une équipe de plongeurs déplaçait l'arche en fixant sur les points de levage des parachutes de relevage sous-marin. Les problématiques identifiées étaient les suivantes :

- Besoin de parachutes de grande dimensions, nécessité d'ancrer la barge pour effectuer le gonflage via compresseur embarqué.
- Manque de contrôle de la charge dans le cas de déséquilibre des volumes d'air dans les parachutes. Et donc risque de retournement important en cas d'incident avec un des parachutes.
- La visibilité parfois extrêmement mauvaise ne permettait pas de retrouver facilement les doubles buses pour le positionnement des récifs.

Cette approche a été écartée pour laisser place à un process a priori moins rapide car les modules de complexification seraient pris un à un mais plus sécuritaire et avec un meilleur contrôle de la charge.

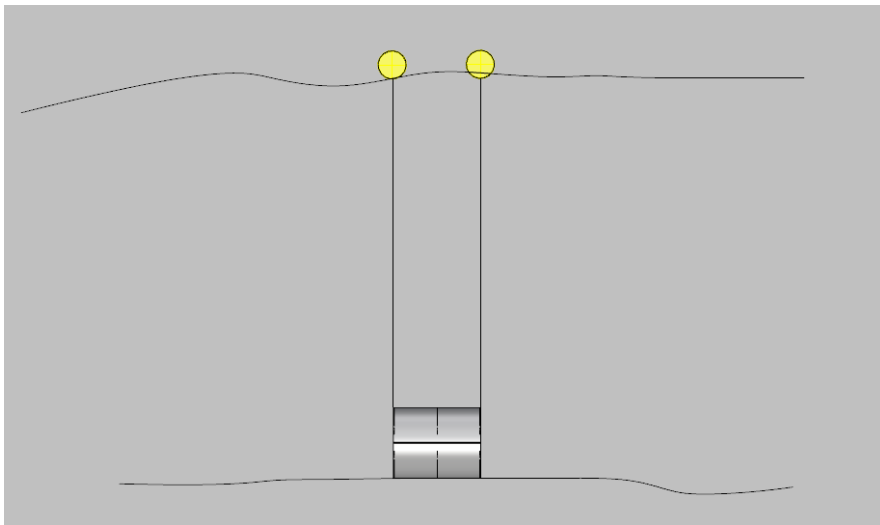
### Seconde Approche :

Les modules de complexification seraient descendus à l'aide d'un treuil embarqué sur la barge des scaphandriers jusqu'à leur position finale autour de la buse. Un plongeur en liaison directe avec le pilote guiderait la descente de l'arche jusqu'à sa position finale.

Les arches ont préalablement été repérées en surface par des marqueurs. Cela permettrait à l'embarcation de venir se positionner au-dessus des buses avec une orientation correcte.

La barge descend ensuite le récif au treuil au-dessus de la structure existante. Une fois en position le plongeur désélingue le récif, plante les micro-pieux à la masse dans les emplacements prévus et remonte vers l'embarcation.

Il n'y a pas de manipulation au parachute sous l'eau par les plongeurs scaphandriers.



*Figure 22 : Système de repérage amont des double-buses existantes et de leur axe principal avant l'opération de complexification*

Pour permettre le remorquage des récifs, une plateforme a été créée spécialement pour le projet. Elle se compose de deux pontons flottants reliés entre eux par une arche métallique qui se comporte comme une potence permettant par un jeu de poulie de manipuler les structures de complexification. Une embarcation sert de pousseur et de support de plongée pour l'équipe de scaphandrier.

L'installation est celle visible ci-dessous :



Figure 23 : Support de remorquage dédié aux modules de complexification 3D'Complex

Les opérations d'immersion ont eu lieu lors d'une période non favorable à l'observation de bonnes conditions météorologiques (hors période estivale afin de ne pas impacter les activités balnéaires de la commune de Valras-Plage). Elles se sont de ce fait étalées sur deux créneaux météo entre 31/10/22 et le 04/11/22 puis du 23 au 24/11/22. Une cadence maximale de 3 complexifications de modules par jour a été observée.

### **Conclusion :**

Création d'une plateforme de remorquage pour déplacer les récifs un à un. Guidage sécurisé tout au long de la descente des modules jusqu'à leur position finale. Risque de retournement évité par l'absence d'utilisation de parachutes sous l'eau. Niveau de précision maximal atteint grâce à un contrôle visuel par plongeur et une communication directe avec le pilote du treuil et de l'embarcation.

### **2.1.3 Suivi des récifs avant et après la complexification**

La complexification des récifs a eu lieu au cours de l'automne 2022. Une première campagne de suivis a été effectuée avant complexification en 2021 (T0), puis en 2023 à T+1 an et en 2024 à T+2 ans (Tableau 3). Ils sont réalisés via des observations visuelles en plongée et nécessitent des conditions

météorologiques adaptées, notamment une mer calme et pas d'épisodes tempétueux les jours précédents les suivis afin d'avoir une visibilité optimale sur site.

Les paramètres mesurés sont à la fois physiques et biologiques.

Tableau 3 : Dates de suivis des récifs

	1 <sup>ère</sup> campagne de suivi	Complexification	2 <sup>ème</sup> campagne de suivi	3 <sup>ème</sup> campagne de suivi
Date	30/08/21 - 01/09/21	Novembre 2022	22/08/23 – 24/08/23	20/08/24 – 22/08/24

### 2.1.3.1 Phase de repérage des récifs artificiels

Les points GPS des récifs complexifiés et non complexifiés sont rentrés en amont de la mission dans un GPS. La méthode employée consiste à se placer sur la position théorique du module et de tourner autour de cette position jusqu'à ce que l'écho caractéristique du module apparaisse au sondeur. Une fois l'écho validé sur l'écran de l'échosondeur, une bouée est alors mise à la mer afin de baliser la zone et de guider les plongeurs jusqu'au récif artificiel.

La date, l'heure de mise à l'eau et de sortie de l'eau, la température, la profondeur, la visibilité, le type et code du récif, l'observateur des paramètres physiques et celui des paramètres biologiques sont relevés pour chaque plongée.



Figure 24 : Plongeurs scientifiques avant immersion (campagne 2024)

### 2.1.3.2 Mesures in situ : paramètres physiques

Les mesures physiques suivantes du récif (complexifié ou non) sont relevées (Figure 25) :

- Profondeur maximale : profondeur mesurée au point le plus profond à proximité du récif ;
- Profondeur minimale : profondeur mesurée au point le moins profond du récif, généralement la partie supérieure de celui-ci ;
- Profondeur extérieure : profondeur mesurée à quelques mètres du récif ;
- Hauteur du récif : hauteur totale de la partie visible de la double buse non ensablée ;
- Orientation : orientation cardinale du récif artificiel ;
- Profondeur minimale de l'arche : profondeur mesurée sur la partie supérieure de l'arche si elle est présente.

Pour relever ces grandeurs physiques, les plongeurs disposent d'un profondimètre digital donnant la mesure en mètres à dix centimètres près et de plusieurs décamètres et pentamètres. L'orientation est mesurée à l'aide d'un compas. Ces données permettent également de renseigner la profondeur d'enfouissement des récifs artificiels et modules de complexification associés si présents.

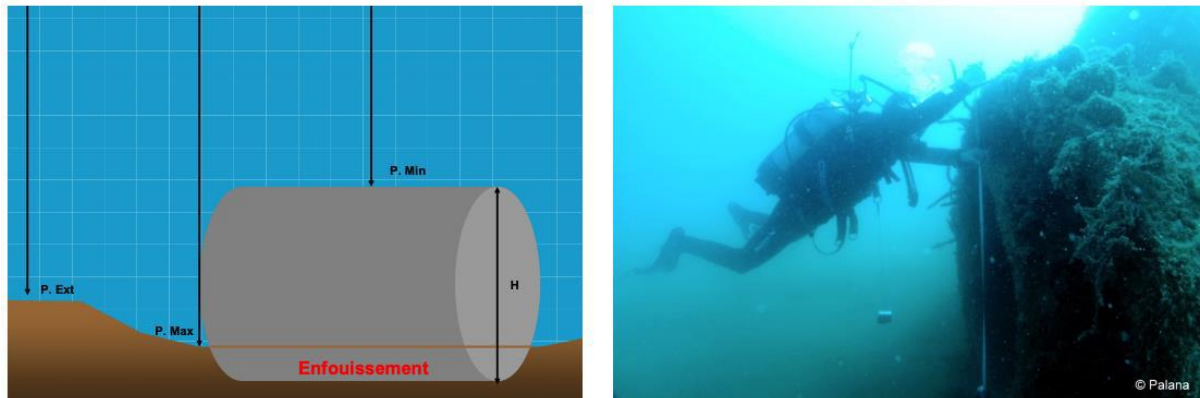


Figure 25 : Paramètres physiques mesurés sur les récifs avec buses (à gauche) et photographie de leur relevé in situ (à droite)

A partir de ces mesures seront aussi déterminées :

- La profondeur de la cuvette (Profondeur extérieur - Profondeur maximum) ;
- La hauteur de l'arche (Profondeur maximum – Profondeur de l'arche).

### 2.1.3.3 Mesures in situ : paramètres biologiques

Afin de ne pas perturber les peuplements ichthyens des récifs, un seul observateur de la palanquée réalise les comptages, les mesures des paramètres physiques sont réalisées dans un second temps. L'approche et le déplacement sont réalisés strictement de la même façon à chaque inventaire. Quatre types de distribution des espèces mobiles sont suivis (Figure 26) :

- Les espèces très mobiles et difficiles d'approche (sars, bars, pageots). Elles sont comptées en premier ;
- Les espèces à proximité immédiate du récif (poissons : Labridae, Serranidae ; invertébrés : calmars, seiches) sont dénombrées ;
- Les espèces inféodées aux récifs (poissons : congres, mostelles, rascasses, blennies, gobies ; invertébrés : poulpes, langoustes, etc.) sont répertoriées en explorant consciencieusement toutes les cavités ainsi que les zones internes à l'aide de phares sous-marins ;
- Les espèces grégaires de pleine eau, peu craintives, souvent très abondantes (bogues, tacauds, athérines) sont estimées en dernier.

La difficulté de l'étude peut être directement liée aux conditions météorologiques et environnementales (visibilité faible, fort vent, courant). Une estimation de la visibilité est réalisée par rapport à l'éloignement du récif. La méthodologie de comptage est adaptée en fonction des sites et des conditions environnementales. Cette méthodologie est clairement consignée pour être facilement reproduite.

Lorsque la visibilité le permet, des enregistrements vidéo ou des photographies sont réalisés sur chaque récif par le deuxième plongeur, à partir d'un Sony RX100.

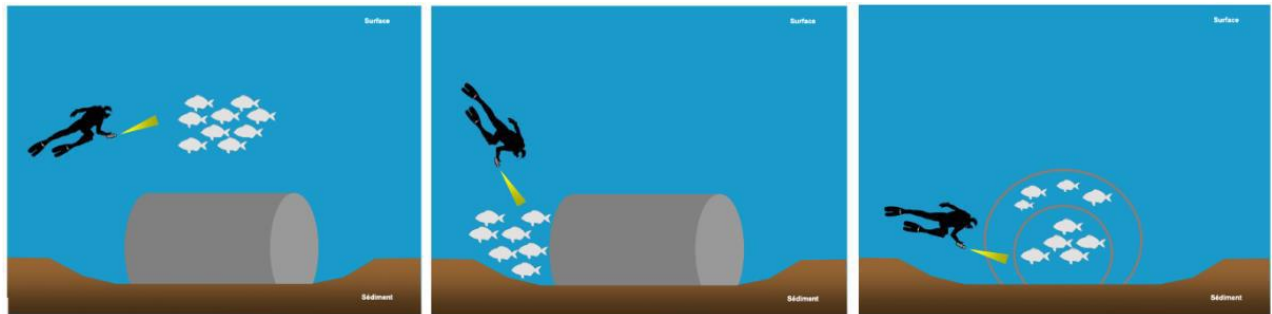


Figure 26 : Schéma des 3 phases principales de comptage consécutives (de gauche à droite ; 1 - des espèces mobiles et difficiles d'approche ; 2 - des espèces à proximité immédiate du récif ; 3 - des espèces vivant à l'intérieur du récif)

A chaque immersion, les mesures biologiques suivantes sont relevées :

- Espèces observées dans ou autour du récif artificiel (vertébrés ou invertébrés) ;
- Zone d'observation des espèces en présence au sein du récif artificiel (dans la buse centrale, entre les buses, sur l'arche, etc.)
- Classe de taille de la faune observée, relativement à la taille de son espèce (petit, moyen ou gros) (Bauchot et Pras, 1980) (Whitehead et al., 1986) (Fischer et al., 1987).
- Nombre d'individus d'une espèce et d'une classe de taille observés au cours de la plongée.

## 2.1.4 Analyses

### 2.1.4.1 Indices de mesure de diversité

Concernant l'analyse spatio-temporelle des récifs artificiels, les indicateurs écologiques historiquement utilisés à Valras-Plage afin de caractériser la diversité au sein des communautés ichtyologiques et de macro-invertébrés ont été retenus. Ces indicateurs sont les suivants :

- Richesse spécifique : nombre d'espèces différentes relevées sur un récif ;
- Indice de Shannon : indice permettant de mesurer la diversité spécifique d'un récif ;
- Indice de Pielou : indice d'équipartition des espèces d'un récif ;
- Abondance totale : nombre total d'individus observés sur un récif ;
- Abondance par classe de taille : nombre d'individus observés en fonction de leur classe de taille.

La richesse spécifique correspond au nombre d'espèces différentes observées sur un récif. Cet indicateur est essentiel pour évaluer la diversité brute d'un écosystème, sans tenir compte de la répartition des individus entre les espèces. Il fournit une mesure simple et directe de la biodiversité et permet de suivre les variations spatio-temporelles des communautés.

L'indice de Shannon (H') permet d'exprimer la diversité spécifique d'un peuplement d'une autre manière que la richesse spécifique, car il prend en compte les abondances relatives de chaque espèce en plus de la richesse spécifique :

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

N = nombre d'espèces

P<sub>i</sub> = fréquence relative de l'espèce i dans le prélèvement

P<sub>i</sub> = N<sub>i</sub>/N

N<sub>i</sub> = nombre d'individus de l'espèce i

N = nombre total d'individus dans le prélèvement

Cet indice communique une information synthétique sur la richesse spécifique et l'équilibre du peuplement considéré. Il varie généralement entre 0 et 5, mais n'a en théorie pas de maximum (

Tableau 4).

Tableau 4 : Interprétation des valeurs de H' (Shannon et Weaver, 1949)

Valeur de H'	Interprétation
[0-1[	Peuplement très peu diversifié
[1-2[	Peuplement peu diversifié
[2-3[	Peuplement diversifié
[3-4[	Peuplement très diversifié
[4-+∞[	Peuplement extrêmement diversifié

Toutefois, parce qu'il dépend à la fois du nombre d'espèces et de leurs abondances relatives, une faible valeur d'indice peut traduire deux situations différentes :

- Soit un faible nombre d'espèces ;
- Soit un nombre élevé d'espèces mais avec quelques espèces dominant fortement le peuplement.

Afin de préciser l'information donnée par H', l'indice d'équitabilité de Pielou (J'), rapport de la diversité observée sur la diversité maximale, est calculé selon la formule :

$$J' = H' / H'_{\max}$$

H'\_{\max} = \log N

N : nombre total d'espèces

Cet indice renseigne sur l'état d'équilibre des peuplements. Un peuplement est considéré comme équilibré lorsque l'indice est égal à 1. La valeur 0 témoigne d'un déséquilibre, où la population est fortement dominée par une espèce.

L'abondance totale correspond au nombre total d'individus observés sur un récif, indépendamment des espèces ou des tailles. Cet indicateur est un reflet direct de la densité de peuplement d'un récif, utile pour évaluer son attractivité ou sa capacité d'hébergement pour la faune.

L'abondance par classe de taille mesure le nombre d'individus par classe de taille. Il est particulièrement pertinent pour analyser la structure démographique des populations et identifier la présence de juvéniles, d'adultes, ou de classes de tailles intermédiaires. Il permet également d'évaluer la fonction de nurserie ou d'habitat pour des espèces spécifiques.

## 2.1.4.2 Analyses statistiques

### Test de Kruskal-Wallis :

Afin de comparer les séries de données issues des différentes stations ou des différentes campagnes, le test de Kruskal-Wallis (KW) est utilisé. C'est un test statistique non paramétrique, étant donné que les conditions de normalité des échantillons ne sont pas respectées.

Le test de Kruskal-Wallis permet de tester si  $k$  échantillons ( $k > 2$ ) proviennent de la même population ou de populations ayant des caractéristiques identiques, au sens d'un paramètre de position (le paramètre de position est conceptuellement proche de la médiane, mais le test de Kruskal-Wallis prend en compte plus d'informations que la position au seul sens de la médiane).

Comme tout test non paramétrique, le test de Kruskal-Wallis compare des rangs de données. Chaque échantillon est ainsi traduit en classe et en fréquence, puis les distributions sont comparées entre elles pour savoir si une ou plusieurs diffèrent. L'hypothèse alternative « les distributions sont différentes » est retenue si la  $p$ -value est inférieure à 0,05.

### Modèles linéaires généralisés :

Des modèles linéaires généralisés (GLM) sont utilisés afin d'étudier la variabilité spatio-temporelle des paramètres écologiques (richesse spécifique et abondance). Ils permettent de tester si les paramètres Année, Catégorie de récif (buses, buses complexifiées), Zone (zone 1 et zone 2), Profondeur (<15m ou >15m), Température, Visibilité (moyenne, mauvaise) peuvent expliquer les variations de chaque paramètre écologique.

Cette approche a été privilégiée en raison de la nature des données disponibles. En effet, les données obtenues en écologie marine ne suivent généralement pas une distribution normale (type gaussienne), ce qui empêche d'avoir recours aux techniques d'analyse classique telles que l'ANOVA (Bolker, 2008). Par ailleurs, les observations successives des populations de poissons et de macro-invertébrés peuvent être considérées comme non-indépendantes, étant donné que les suivis ont été réalisés sur les mêmes récifs artificiels chaque année.

Pour cette étude, l'ensemble des analyses ont été réalisées à l'aide du package « MASS » de R (v 4.1.2). Les paramètres écologiques ont été modélisées à partir d'une distribution de Poisson (pour le paramètre Richesse spécifique) ou bien d'une binomiale négative (pour le paramètre Abondance) lorsque la distribution des données ne suivait pas une loi normale (Shapiro-Wilk,  $p < 0,05$ ) et présentait une forte hétérogénéité des variances (Levene,  $p < 0,05$ ). En effet, dans le cas d'une surdispersion des données, la loi de distribution de Poisson n'est pas appropriée.

## 2.2 RESULTATS

### 2.2.1 Études des paramètres physiques

Au cours des différentes campagnes de suivi, aucun signe particulier de dégradation importante des modules n'a été observé ce qui souligne la bonne tenue à la mer, à moyen terme, de ces structures en béton, tant pour les anciennes double-buses que les nouveaux modules de complexification 3D Complex.

Certains modules double-buses sont apparus plus ou moins envasés, la hauteur apparente moyenne des récifs est de 1,42 m, la profondeur moyenne de la cuvette est de 43 cm et la hauteur moyenne de l'arche est de 2,13 m (Tableau 5). L'apport du module de complexification 3D'Complex a permis d'augmenter la hauteur moyenne des récifs artificiels d'anciennes génération de 67%.

Tableau 5 : Paramètres physiques mesurés

	Hauteur moyenne du récif (en m)	Profondeur de la cuvette (en m)	Hauteur de l'arche (en m)
<b>Moyenne</b>	1,42	- 0,43	2,13
<b>Maximum</b>	2,18	- 1,10	2,5
<b>Minimum</b>	0,86	0.20	1,6

Il n'y a pas d'effet de l'année ni de la catégorie de récif (complexifié ou non) sur la profondeur de la cuvette et la hauteur de l'arche. Seule la hauteur de la double buse est significativement impactée par la catégorie de récif et l'année ( $p < 0,05$ ) (Figure 27 et Tableau 6). Pour autant, les résultats montrent avant tout une certaine stabilité durant ces 4 années d'études pour les différents paramètres étudiés. A noter que les modules de complexification sont toujours en place après 3 années. Il est donc difficile de conclure sur les différences significatives de hauteurs, au cours des années et selon les types de récifs (complexifié ou non). La courantologie et la dynamique sédimentaire de la zone peuvent être en lien avec ces variations.

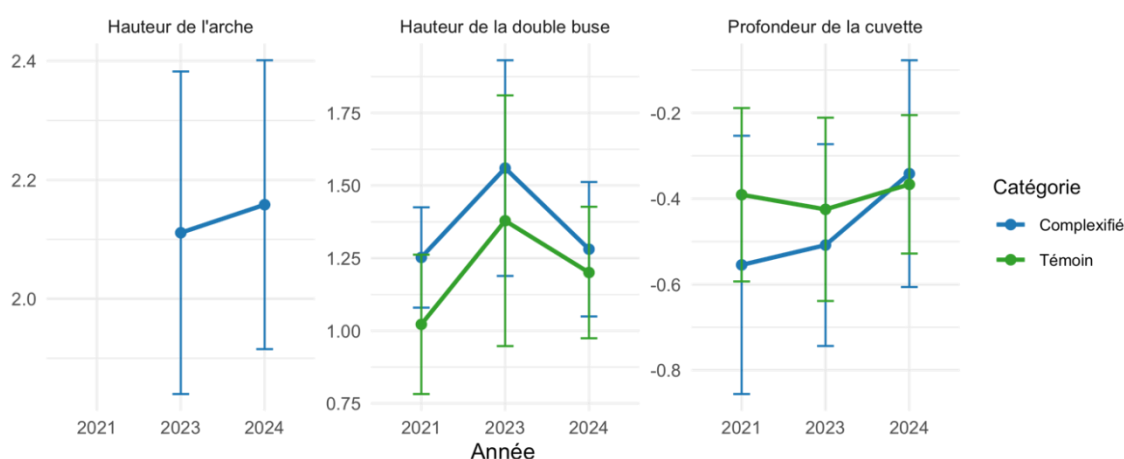


Figure 27 : Évolution temporelle des paramètres physiques selon la catégorie de récif (en m).

Tableau 6 : Résultats des tests statistiques pour les paramètres physiques

Test	Effet testé	p-value
Kruskal-Wallis	Profondeur de la cuvette et Catégorie de récif	p = 0,287
Kruskal-Wallis	Profondeur de la cuvette et Année	p = 0,353
Kruskal-Wallis	<b>Hauteur de la double buse et Catégorie de récif</b>	<b>p = 0,031</b>
Kruskal-Wallis	<b>Hauteur de la double buse et Année</b>	<b>p = 0,0057</b>
Kruskal-Wallis	Hauteur de l'arche et Année	p = 0,612

L'orientation des modules a été étudiée lors de chaque campagne (Tableau 7 et Tableau 8). Globalement, l'orientation des modules n'a quasiment pas évolué au cours des campagnes. Un écart jusqu'à 30° peut être considéré comme négligeable du fait de l'utilisation et de la précision des compas en immersion lors des plongées sous-marines.

Les récifs artificiels ne semblent avoir subi aucun déplacement durant la durée du suivi scientifique du projet 3D'Complex. Ces variations étaient déjà limitées lors des 15 années précédentes de suivi.

Tableau 7 : Évolution de l'enfouissement et de l'orientation des récifs suivis dans la zone 1

Code	Année	Catégorie	Hauteur moyenne du récif	Profondeur cuvette	Profondeur au niveau du haut de l'arche	Orientation (°)
Z1T13	2021	À complexifier	1,32	-0,5		120 - 300
Z1T13	2023	Complexifié	1,88	-0,9	8,8	100 - 280
Z1T13	2024	Complexifié	1,54	-0,7	8,7	100 - 280
Z1T14	2021	Témoin	1,25	-0,5		120 - 300
Z1T14	2023	Témoin	1,45	-0,5		120 - 300
Z1T14	2024	Témoin	1,50	-0,5		120 - 300
Z1T15	2021	À complexifier	1,70	-0,3		100 - 280
Z1T15	2023	Complexifié	2,15	-0,7	10,7	90 - 270
Z1T15	2024	Complexifié	1,57	-0,3	10,4	120 - 300
Z1T16	2021	À complexifier	1,23	-0,4		10 - 190
Z1T16	2023	Complexifié	1,83	-0,6	12,6	0 - 180
Z1T16	2024	Complexifié	1,39	-0,3	11,6	0 - 180
Z1T211	2023	Témoin	1,79	-0,3		20 - 200
Z1T211	2024	Témoin	1,34	-0,2		30 - 210
Z1T22	2021	À complexifier	1,35	-0,7		0 - 180
Z1T22	2023	Complexifié	1,05	-0,5	13,6	0 - 180
Z1T22	2024	Complexifié	1,45	0	14,3	0 - 180
Z1T23	2021	Témoin	1,01	-0,4		60 - 240
Z1T23	2023	Témoin	1,48	-0,3		60 - 240
Z1T23	2024	Témoin	1,23	-0,4		60 - 240
Z1T24	2021	À complexifier	1,12	-0,3		10 - 190
Z1T24	2023	Complexifié	1,13	-0,4	14,7	0 - 180
Z1T24	2024	Complexifié	1,05	-0,4	15,1	0 - 180
Z1T25	2021	Témoin	1,20	-0,5		30 - 210
Z1T25	2023	Témoin	1,53	-0,8		0 - 180
Z1T25	2024	Témoin	1,57	-0,7		170 - 350
Z1T26	2021	Témoin	1,20	-0,1		30 - 210
Z1T26	2023	Témoin	1,89	-0,3		20 - 200
Z1T26	2024	Témoin	1,39	-0,1		30 - 210

Z1T27	2021	À complexifier	1,55	-0,2		80 - 260
Z1T27	2023	Complexifié	1,43	-0,3	15,9	100 - 280
Z1T27	2024	Complexifié	1,58	-0,4	16,5	90 - 270
Z1T28	2021	Témoin	1,35	-0,4		80 - 260
Z1T28	2023	Témoin	2,15	-0,7		60 - 240
Z1T28	2024	Témoin	1,59	-0,4		60 - 240

Tableau 8 : Évolution de l'enfouissement et de l'orientation des récifs suivis dans la zone 2

Code	Année	Catégorie	Hauteur moyenne du récif	Profondeur cuvette	Profondeur au niveau du haut de l'arche	Orientation (°)
Z2T10 <sup>1</sup>	2024	Complexifié	0,93	-0,4	18,6	180 - 0
Z2T12	2021	À complexifier	1,22	-1		160 - 340
Z2T12	2023	Complexifié	1,74	-0,8	9	0 - 180
Z2T12	2024	Complexifié	1,40	-0,6	8,5	10 - 190
Z2T13	2021	À complexifier	1,46	-0,4		140 - 320
Z2T13	2023	Complexifié	2,18	-0,6	9,4	120 - 300
Z2T13	2024	Complexifié	1,70	-0,5	9,4	120 - 300
Z2T14	2021	À complexifier	1,72	-0,4		140 - 320
Z2T14	2023	Complexifié	2,07	-0,1	11,2	120 - 300
Z2T14	2024	Complexifié	1,56	-0,1	11,2	120 - 300
Z2T15	2021	Témoin	1,15	-0,5		20 - 200
Z2T15	2023	Témoin	1,03	-0,4		10 - 190
Z2T15	2024	Témoin	1,03	-0,3		0 - 180
Z2T16	2021	Témoin	0,95	-0,4		40 - 220
Z2T16	2023	Témoin	1,00	-0,2		60 - 240
Z2T16	2024	Témoin	1,03	-0,5		40 - 220
Z2T22	2021	Témoin	0,95	-0,8		80 - 260
Z2T22	2023	Témoin	1,10	-0,3		80 - 260
Z2T22	2024	Témoin	1,13	-0,4		100 - 280
Z2T23	2021	Témoin	1,43	-0,2		100 - 280
Z2T23	2023	Témoin	2,17	-0,6		90 - 270
Z2T23	2024	Témoin	1,60	-0,4		90 - 270
Z2T24	2021	À complexifier	1,43	-0,8		170 - 350
Z2T24	2023	Complexifié	1,33	-0,3		0 - 180
Z2T24	2024	Complexifié	1,30	-0,6	16,4	10 - 190
Z2T26	2021	Témoin	0,86	-0,4		20 - 200
Z2T26	2023	Témoin	1,38	-0,6		40 - 220
Z2T26	2024	Témoin	0,95	-0,3		50 - 230
Z2T27	2021	À complexifier	1,43	-1,1		160 - 340
Z2T27	2023	Complexifié	1,90	-0,3		150 - 330
Z2T27	2024	Complexifié	1,55	0,2	18,1	NA
Z2T29	2021	Témoin	1,38	-0,1		130 - 310
Z2T29	2023	Témoin	1,86	-0,1		150 - 330
Z2T29	2024	Témoin	1,32	-0,2		140 - 340

<sup>1</sup> Il était initialement prévu de complexifier le module Z2T21. Cependant, lors des plongées de reconnaissances (avant la pose des arches), la buse n'a finalement pas été retrouvée (ensablement ?). Le module Z2T10 a donc été sélectionné, en remplacement. La mise à jour de ces informations n'a pu être réalisée qu'en 2024.

## 2.2.2 Études des paramètres biologiques

### 2.2.2.1 Vie fixée

La faune fixée n'a pas été strictement mesurée mais elle a été suivie sur des critères de présence ou d'absence. Le Tableau 9 présente les espèces fixes observées sur les récifs en 2023 et 2024, classées par catégorie et famille.

En 2021, rappelons tout de même la présence d'espèces appartenant aux familles des Gorgonidae (Gorgones) sur les récifs double-buses "Témoin" et "à Complexifier" au niveau des doubles buses. Ces espèces sont toujours présentes en 2023 et 2024. Cela confirme que les opérations de complexifications n'ont pas impactées les peuplements en place, notamment les espèces dressées les plus fragiles.

En 2023 et 2024, on observe la colonisation progressive des modules de complexification avec l'apparition des familles des Sabellidae (Sabelle, Spirographe), des Ascidiées (*Phalusia*), des Cnidaires (Hydraires) ainsi que des éponges, des moules et des huitres (Figure 28). Aucune espèce exotique ou envahissante n'a été observée durant le projet, notamment en placage ou recouvrement dominant notable.

Tableau 9 : Espèces fixées présentes sur les récifs

Année	Catégorie	Famille	Espèce
2023	Complexifié	Antedonidae	Crinoïde
		Ascidiidae	Ascidie phallusia
		Cerianthidae	Cerianthe
		Gorgoniidae	Gorgone orange
		Gorgoniidae	Gorgones
		Halichondriidae	Éponge
		Ostreidae	Huitre plate
		Parazoanthidae	Parazoanthus
	Témoin	Cerianthidae	Cerianthe
		Gorgoniidae	Gorgone orange
		Gorgoniidae	Gorgones
		Halichondriidae	Éponge
		Ostreidae	Huitre plate
		Sabellidae	Sabelle
2024	Complexifié	Ascidiidae	Phalusia
		Cnidaires	Hydraires
		Gorgoniidae	Gorgone blanche
		Gorgoniidae	Gorgones
		Halichondriidae	Éponge
		Mytilidae	Moule
		Ostreidae	Huitre
		Balanidae	Balane
		Sabellidae	Spirographe
	Témoin	Cnidaires	Hydraires
		Gorgoniidae	Gorgones
		Halichondriidae	Éponge
		Ostreidae	Huitre
		Sabellidae	Spirographe



Ascidie (*Phallusia sp.*)



Balanes (*Chthamalus sp.*)



Moules (*Mytilus edulis*)



Sabelle (*Sabella sp.*)



Pétoncles et ascidies



Bryozoaires et serpulidae

Figure 28 : Échantillon d'images de la vie fixée présente sur les modules de complexification 3D'Complex et notamment sur le béton imprimé en 3D

### 2.2.2.2 Vie mobile

- **Richesse spécifique et Abondance :**

En 2021, la richesse spécifique moyenne est relativement similaire entre les récifs témoins et « à complexifier » (Figure 29). Les valeurs moyennes oscillent entre 4 et 7 espèces, toutes zones et toutes profondeurs confondues. Après complexification, la richesse spécifique moyenne des récifs complexifiés semble augmenter par rapport à celle des témoins : entre 2023 et 2024, les valeurs moyennes varient entre 7 et 13 espèces au niveau des récifs complexifiés et entre 4 et 8 au niveau des buses témoins.

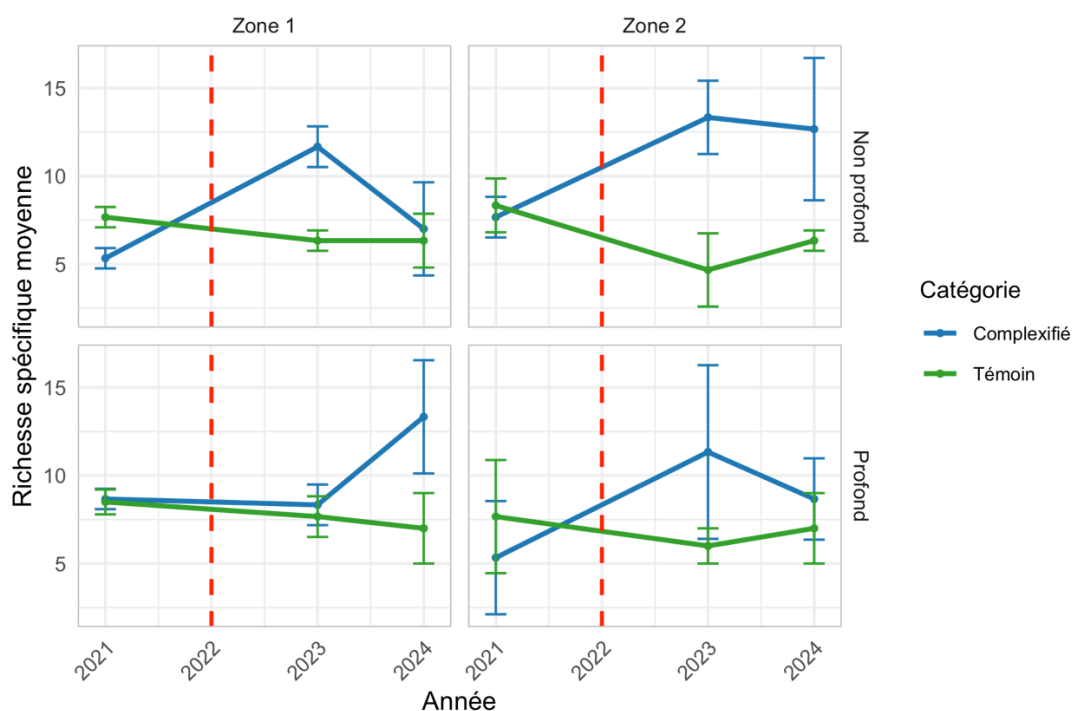


Figure 29 : Évolution spatio-temporelle de la richesse spécifique moyenne (la ligne pointillée rouge matérialise la complexification en 2022)

Un modèle de régression généralisé (GLM) a été réalisé pour voir quels facteurs (temporel, spatial, humain, physique ou architectural) pourraient expliquer au mieux les variations observées sur la richesse spécifique. Les analyses statistiques confirment que la catégorie des récifs (complexifier vs témoin) influence les variations de richesse spécifique (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cette différence de richesse spécifique entre les catégories de récifs suggère un effet bénéfique du module de complexification 3D'Complex sur la diversité de la faune présente sur les récifs d'ancienne génération type double-buse.

Tableau 10 : Résultats du modèle de régression binomiale négative effet des variables sur la richesse spécifique

Test	Variable	P- value
Modèle de régression linéaire	Année	0,222
	Visibilité	0635
	Zone	0,692
	<b>Catégorie</b>	<b>0,016</b>
	Profondeur	0,165
	<b>Température</b>	<b>0,026</b>

On observe également une influence de la température sur la richesse spécifique (**Erreur ! Source du r envoi introuvable.** et Figure 30). En effet, plus la température de l'eau est élevée et plus le nombre d'espèce augmente. Ces résultats sont habituellement observés en Méditerranée.

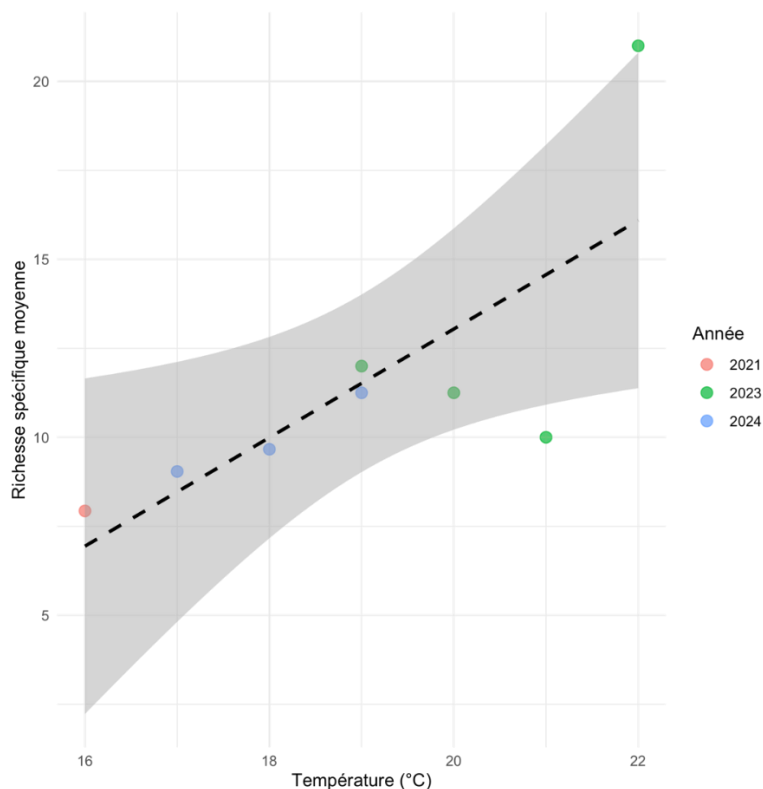


Figure 30 : Evolution de la richesse spécifique moyenne (nombre d'espèce) en fonction de la température de l'eau

Concernant l'abondance, aucune tendance ne se dessine au cours des 3 campagnes de suivi (Figure 31). Les abondances moyennes semblent être majoritairement plus élevées pour les récifs complexifiés. Les moyennes varient de 26 individus (2021 – zone 2 – profond) à 1 874 individus (2021 – zone 1 - profond) au niveau des récifs complexifiés, tandis que pour les témoins, les valeurs moyennes oscillent entre 104 individus (2023 – zone 2 – profond) et 1 121 individus (2023 – zone 1 – profond). Les analyses statistiques confirment que la catégorie des récifs (complexifier vs témoin) influence les variations d'abondance (Tableau 11).

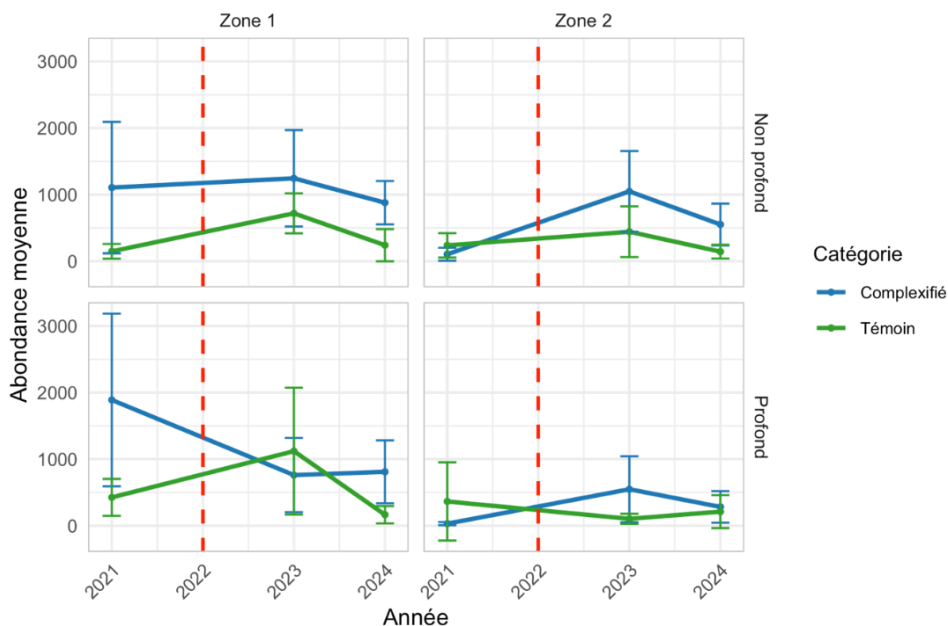


Figure 31 : Évolution spatio-temporelle de l'abondance moyenne (la ligne pointillée rouge matérialise la complexification en 2022)

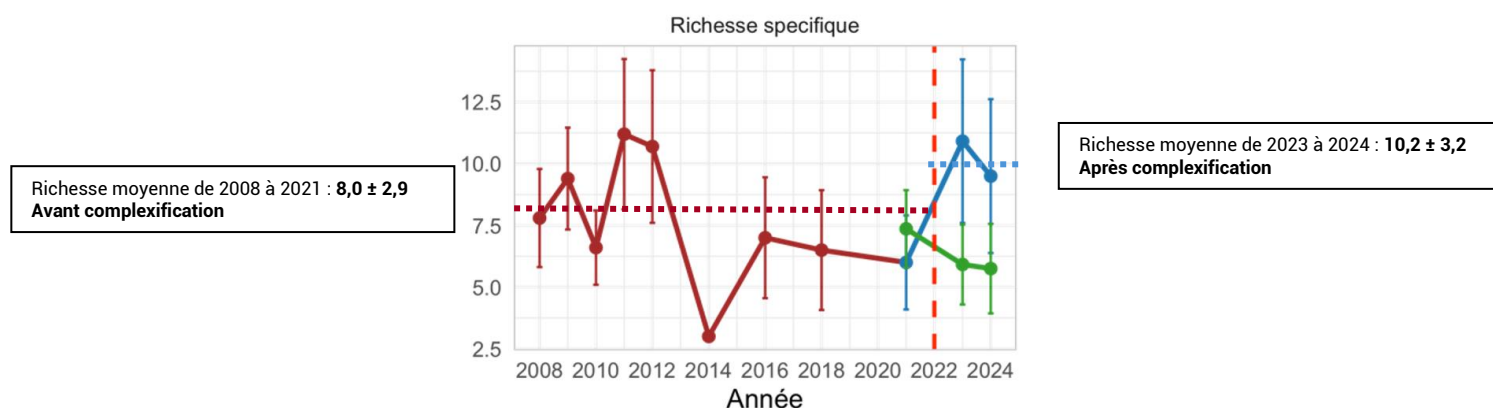
Tableau 11 : Résultats du modèle de régression binomiale négative effet des variables sur l'abondance des individus

Test	Variable	p-value
Modèle de régression binomiale négative	Année	0,279
	Visibilité	0,456
	<b>Zone</b>	<b>0,005</b>
	Profondeur	0,695
	<b>Catégorie</b>	<b>0,005</b>
	Température	0,235

Le détail des valeurs d'abondance et de richesse spécifique par récif et par année est détaillé dans l'Annexe 1.

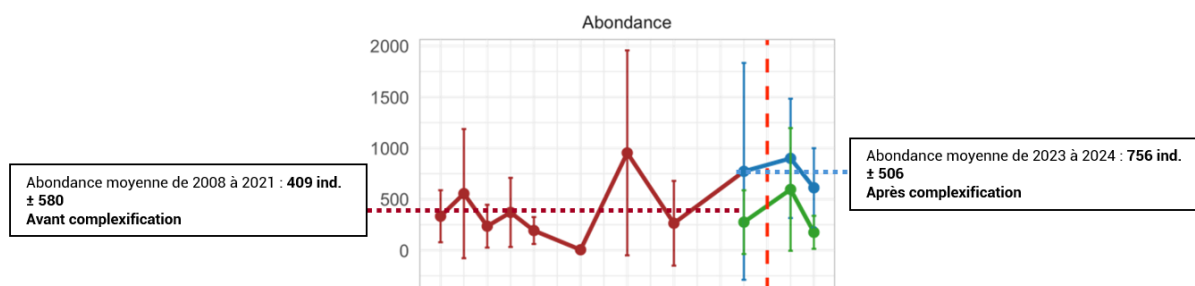
**Aussi, la complexification des récifs a permis une augmentation moyenne de 52% de la richesse spécifique et de 42% de l'abondance par rapport aux valeurs mesurées durant les précédents suivants sur les doubles-buses traditionnelles. Cela suggère donc que la complexité structurale apportée aux récifs d'ancienne génération type double-buse a favorisé la création de niches écologiques, permettant ainsi la colonisation d'un plus grand nombre d'individus et d'espèces (Tableau 12 Tableau 13).**

Tableau 12 : Synthèse de l'évolution de la richesse spécifique entre 2008 et 2021 (avant complexification) puis 2023 et 2024



	Complexifié	Non complexifié	% de gain entre complexifiés et témoin
Richesse moyenne entre 2008 et 2021 avant complexification	8,0 (± 2,9)		-
Richesse moyenne en 2021 avant complexification	6,7 (±1,9)		-
Richesse moyenne 2023	10,9 (±3,3)	5,9 (±1,6)	84,1%
Richesse moyenne 2024	9,5 (±3,1)	5,8 (±1,8)	65,2%
Richesse moyenne 2023-2024	10,2 (±3,2)	5,8 (±1,7)	75,8%
<b>% de gain entre 2021 et 2023/2024</b>	<b>+ 52%</b>		

Tableau 13 : Synthèse de l'évolution de l'abondance entre 2008 et 2021 (avant complexification) puis 2023 et 2024



	Complexifié	Non complexifié	% de gain entre témoins et complexifiés
Abondance moyenne entre 2008 et 2021 avant complexification	409 ( $\pm 580$ )		-
Abondance moyenne en 2021 <b>avant complexification</b>	535 ( $\pm 820$ )		-
Abondance moyenne 2023	900 ( $\pm 584$ )	596 ( $\pm 600$ )	50,3%
Abondance moyenne 2024	612 ( $\pm 387$ )	176 ( $\pm 162$ )	248,9%
Abondance moyenne 2023-2024	756 ( $\pm 506$ )	386 ( $\pm 481$ )	96,2%
<b>% de gain entre 2021 et 2023/2024</b>	<b>+ 42%</b>		

- **Complexification et indice de diversité**

La Figure 32 montre l'évolution entre 2008 et 2024 des indices de diversité et d'équitabilité pour deux catégories de récifs : complexifiés et témoins. Le détail des indices par récifs entre 2021 et 2024 est présenté en annexe 2.

Depuis le début des suivis, les valeurs de l'indice de Shannon ( $H'$ ) varient peu entre les années et les catégories de récifs (Figure 32). Les valeurs moyennes restent toutes inférieures ou égale à 1 et tendent à diminuer au cours des 3 dernières années de suivi (Tableau 14). Les peuplements restent donc très peu diversifiés depuis le début des suivis (2008).

Concernant l'indice de Pielou  $J'$ , ce dernier permet de nuancer les informations données par  $H'$ . En moyenne,  $J'$  varie peu entre les années et les catégories de récifs, à l'exception de l'année 2014, qui présentaient une équi-répartition des espèces (Figure 32 et Tableau 15). Avant complexification, les valeurs moyennes oscillent entre 0,49 et 0,54. Après complexification, les récifs témoins présentent des valeurs relativement similaires (0,45 en 2023 et 0,47 en 2024), alors que les récifs complexifiés présentent des moyennes plus faibles : 0,37 en 2023 et 0,31 en 2024. Ces observations révèlent un déséquilibre des peuplements, avec domination de deux espèces en particulier : le chinchard et le pageot commun.

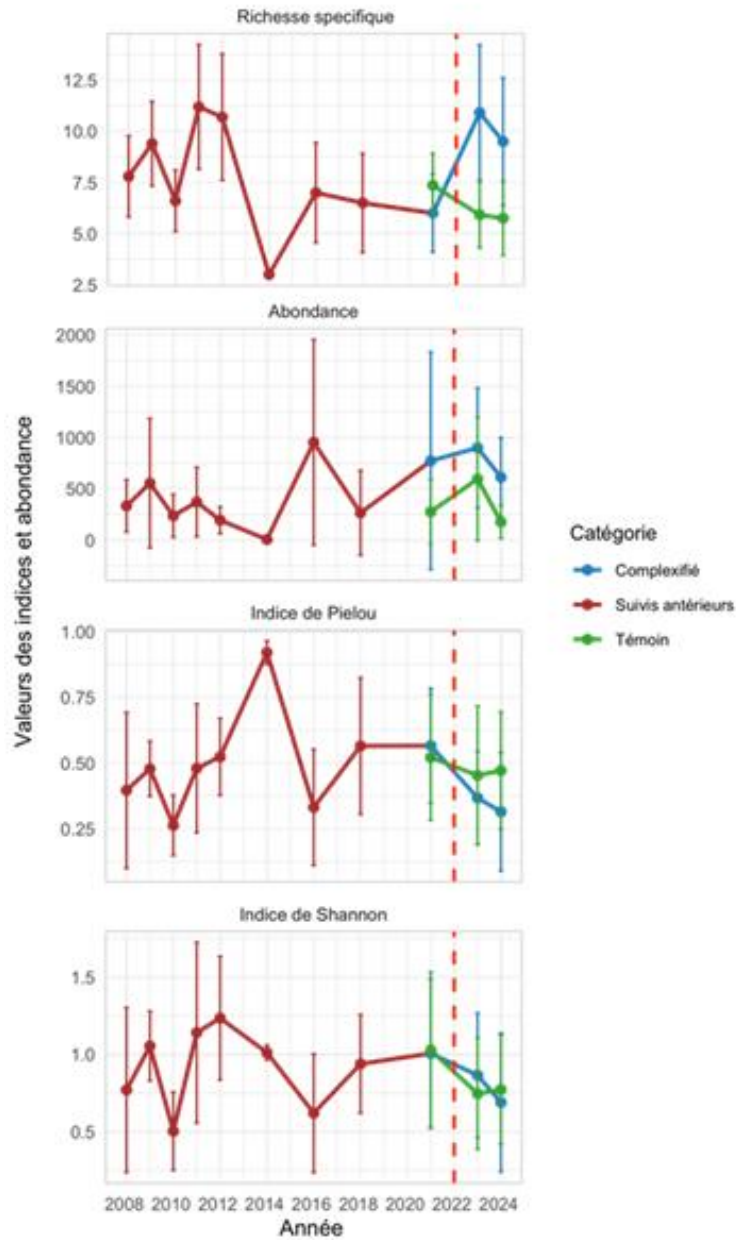


Figure 32 : Évolution des indices de diversité et d'équitabilité selon l'année et la catégorie de récif (la ligne pointillée rouge matérialise la complexification en 2022)

Tableau 14 : Synthèse de l'évolution de l'indice de Shannon H' entre 2008 et 2021 (avant complexification) puis 2023 et 2024

	Complexifié	Non complexifié	% de gain entre témoins et complexifiés
Indice de Shannon moyen entre 2008 et 2021 avant complexification	0,94 ( $\pm 0,46$ )		-
Indice de Shannon moyen en 2021 avant complexification	1,02 ( $\pm 0,48$ )		-
Indice de Shannon moyen 2023	0,86 ( $\pm 0,40$ )	0,75 ( $\pm 0,36$ )	14,7 %
Indice de Shannon moyen 2024	0,69 ( $\pm 0,45$ )	0,77 ( $\pm 0,35$ )	- 10,4 %
Indice de Shannon moyen 2023-2024	0,78 ( $\pm 0,43$ )	0,76 ( $\pm 0,34$ )	2,6 %

Tableau 15 : Synthèse de l'évolution de l'indice de Shannon H' entre 2008 et 2021 (avant complexification) puis 2023 et 2024

	Complexifié	Non complexifié	% de gain entre témoins et complexifiés
Indice de Shannon moyen entre 2008 et 2021 avant complexification	0,94 ( $\pm 0,46$ )		-
Indice de Shannon moyen en 2021 avant complexification	1,02 ( $\pm 0,48$ )		-
Indice de Shannon moyen 2023	0,86 ( $\pm 0,40$ )	0,75 ( $\pm 0,36$ )	14,7 %
Indice de Shannon moyen 2024	0,69 ( $\pm 0,45$ )	0,77 ( $\pm 0,35$ )	- 10,4 %
Indice de Shannon moyen 2023-2024	0,78 ( $\pm 0,43$ )	0,76 ( $\pm 0,34$ )	2,6 %

- **Complexification et fréquence d'occurrence des espèces**

La Figure 33 présente la fréquence d'occurrence des différentes espèces de macrofaune mobile observées entre 2021 (avant complexification) et 2024. Les espèces sont classées par ordre décroissant de fréquence d'occurrence.

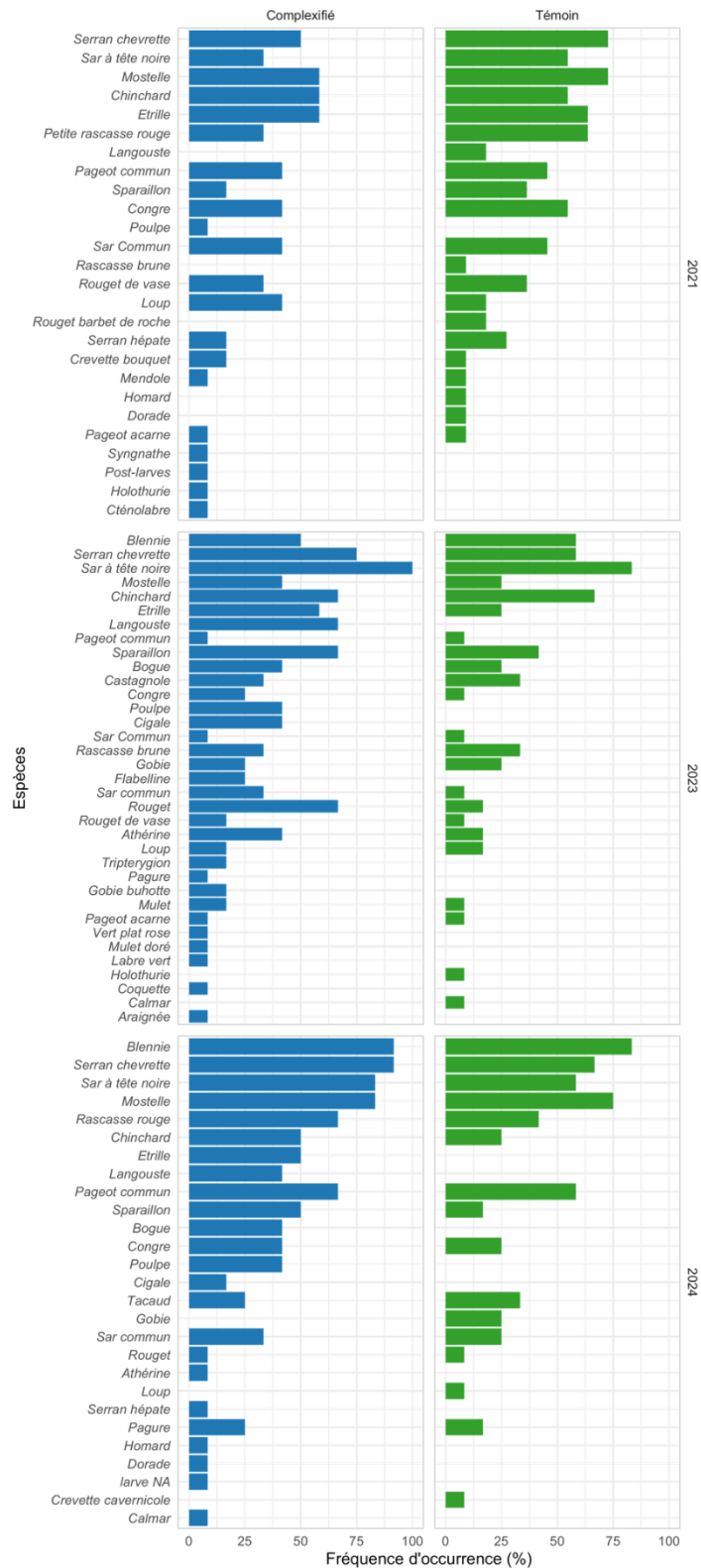


Figure 33 : Fréquence d'occurrence des différentes espèces de macrofaune mobile observées entre 2021 et 2024 avec ou sans module des complexification 3D/Complex

En 2021, avant complexification des récifs, on observe que les espèces les plus fréquemment rencontrées sur les récifs sont le serran chevrette, la mostelle, le chinchard, et l'étrille avec des fréquences d'occurrence supérieures à 50%.

En 2023, les espèces les plus fréquemment rencontrées sur les récifs complexifiés sont le sar à tête noire, le serran chevrette, le chinchard, l'étrille et la langouste, avec des fréquences d'occurrence supérieures à 50%. Sur les récifs témoins, les espèces les plus fréquemment rencontrées sont le sar à tête noire, les blennies, le serran chevrette, et le chinchard, avec des fréquences d'occurrence supérieures à 50%. Il est essentiel de noter que **certaines espèces comme la langouste, le poulpe et la cigale de mer, espèce protégée en Méditerranée, ont été observées uniquement sur les récifs complexifiés, à plus de 30 %**. Ces espèces étaient historiquement rares au regard des résultats des suivis réalisés depuis 2008, notamment ces 10 dernières années (Figure 34).

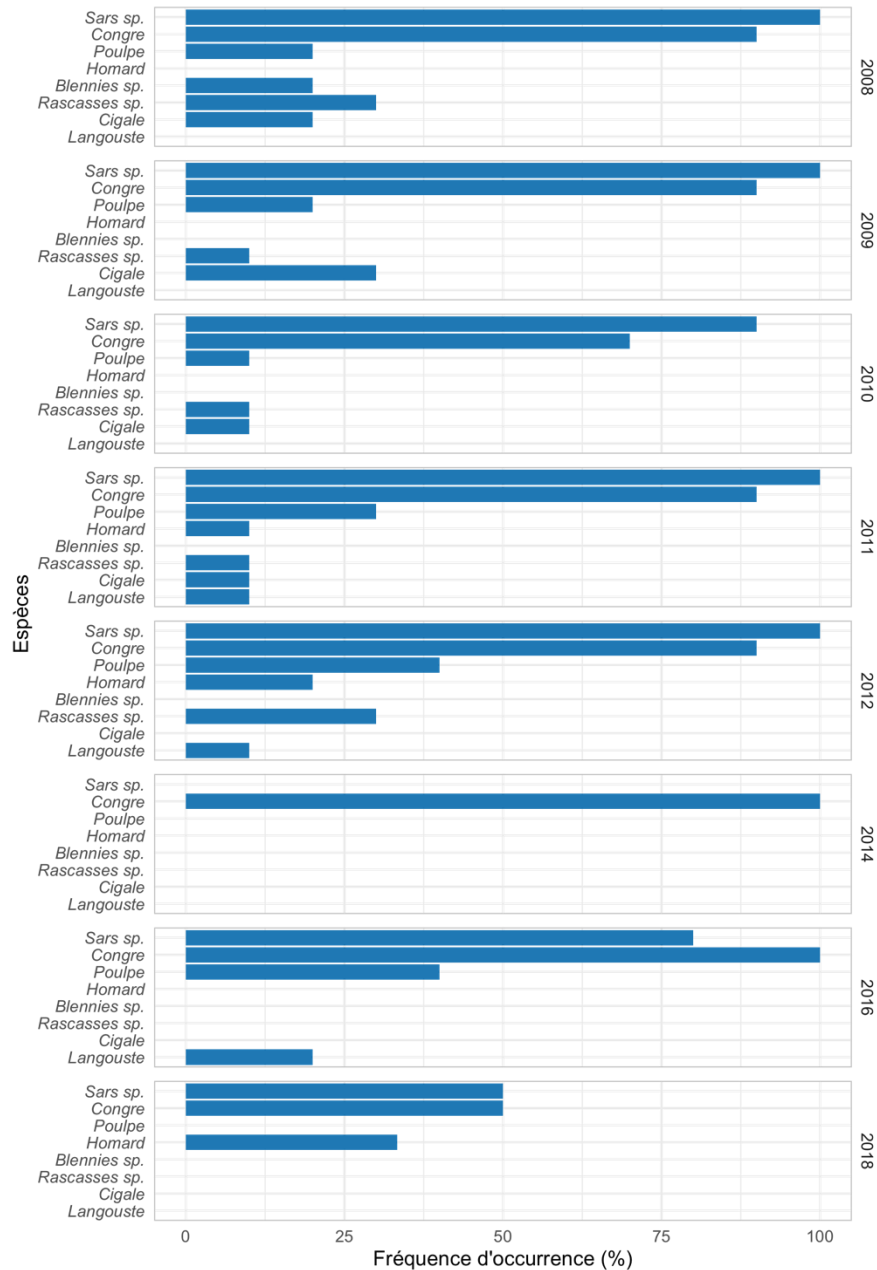


Figure 34 : Fréquence d'occurrence des différentes espèces de macrofaune mobile observées avant 2021. Langoustes et cigales ont toujours été rarement observées au sein de double-buse, tout comme le poulpe ces 10 dernières années.

En 2024, les espèces les plus fréquemment rencontrées sur les récifs complexifiés sont les blennies, le serran chevrette, le sar à tête noire et la mostelle avec des fréquences d'occurrence supérieures à 75%, puis la rascasse rouge et le pageot avec des fréquences d'occurrence supérieures à 50%.

Sur les récifs témoins, parmi les espèces les plus fréquemment rencontrées, on retrouve les blennies avec une fréquence d'occurrence supérieures à 75%, puis et la mostelle le serran chevrette, le sar à tête noire et le pageot avec des fréquences d'occurrence supérieures à 50%. On constate que les fréquences d'occurrence ont globalement augmenté pour la plupart des espèces par rapport à 2023, certaines espèces comme le sar commun, la rascasse rouge et les gobies ont vu leur fréquence d'occurrence doubler ou tripler.

Dans l'ensemble, on retrouve des espèces communes sur les récifs double-buse et sur les récifs complexifiés (blennies, serran chevrette, sar à tête noire, mostelle). Cependant, on remarque en 2023 et 2024 que certaines espèces cryptiques, notamment la langouste, l'étrille, le poulpe, la cigale de mer ou le homard, sont rencontrées exclusivement et régulièrement dans les modules de complexification Complex'3D par rapport aux récifs témoins où leur fréquence d'occurrence est nulle (Tableau 16 et Figure 35).

Tableau 16 : Récapitulatif des espèces sensibles à la complexification

Espèces sensibles à la complexification	Résultats période 2008-2021	Résultats 2022-2023 après complexification
<b>Cigale de mer</b>	14 cigales de mer pour 8 occurrences Pas d'observation depuis 2011	9 cigales de mer pour 6 occurrences
<b>Langouste</b>	9 langoustes pour 7 occurrences 4 observations depuis 2016	23 langoustes pour 18 occurrences
<b>Poulpe</b>	29 poulpes pour 20 occurrences 5 observations depuis 2016	15 poulpes pour 10 occurrences

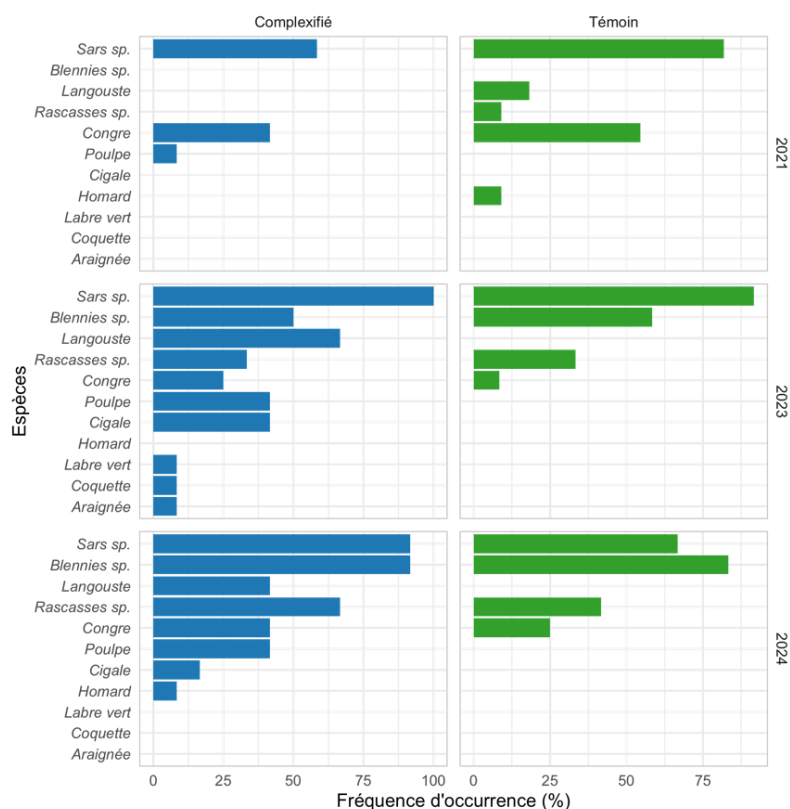


Figure 35 : Zoom des fréquences d'occurrence sur une sélection d'espèces de macrofaune mobile et cryptiques observées entre 2021 et 2024 communes (sars, blennies, congres, rascasses) avec ou sans module des complexification 3D'Complex et a contrario quasi exclusives aux récifs complexifiés (poulpe, langouste, homard, cigale, labre ver, coquette, araignée de mer)

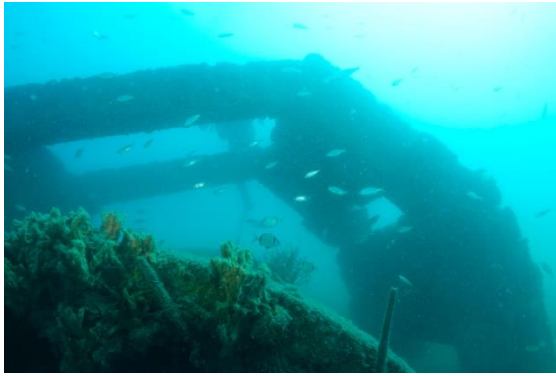


Figure 36 : Photos d'espèces observées majoritairement dans les modules de complexification 3D'Complex

- **Complexification et classes de taille**

En considérant la globalité de l'échantillon, la distribution de l'abondance des différentes classes de taille est dominée par les individus de petite taille (Figure 37). En effet 90,1 % des individus observés sont de petite taille. Les proportions d'individus de tailles moyennes (8,3 %) et grandes (1,2 %) sont plus faibles et également variables. Ces résultats suggèrent une structure de population majoritairement composée de jeunes individus, avec une proportion nettement moindre pour les individus de taille moyenne et grande.

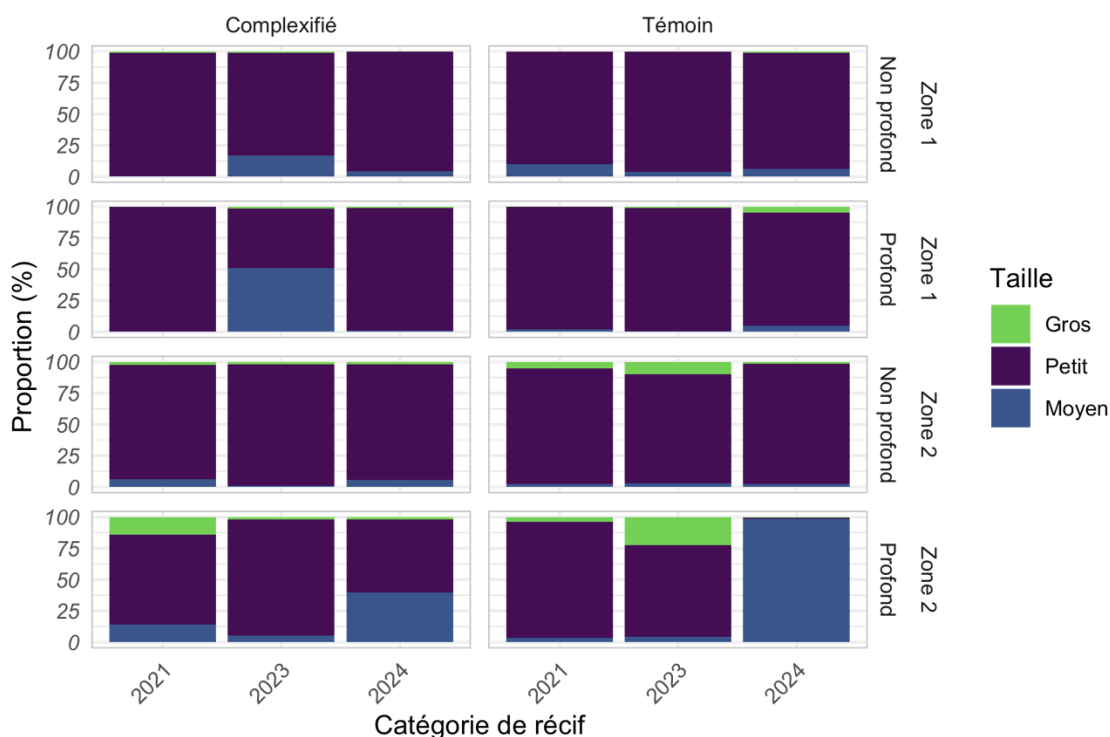


Figure 37 : Abondance des différentes classes de tailles selon l'année et la catégorie de récif

Les tests de Kruskal-Wallis ont été réalisés pour évaluer l'effet des variables Catégorie, Année, Zone, et Profondeur sur la proportion d'individus de petite, moyenne et grande taille (Tableau 17, Tableau 18 et Tableau 19).

Les résultats montrent que :

- **Aucune des variables étudiées n'a d'effet significatif sur la proportion d'individus de petites tailles.** Les résultats indiquent que la proportion d'individus petits est relativement homogène à travers les catégories de récif (avec ou sans complexification), les années, et les profondeurs, et ne montre qu'une légère tendance à varier entre les zones.

Tableau 17 : Effet des variables sur la proportion d'individus de petite taille

Test	Variable	p-value
Kruskal-Wallis	Catégorie de récif	p = 0,863
Kruskal-Wallis	Zone	p = 0,057
Kruskal-Wallis	Profondeur	p = 0,525
Kruskal-Wallis	Année	p = 0,655

- **Aucune des variables testées n'a d'effet significatif sur la proportion d'individus de taille moyenne.** Ces résultats suggèrent que la proportion d'individus de taille moyenne reste stable entre les récifs de différentes catégories (avec ou sans complexification), les zones géographiques, les profondeurs et les années étudiées.

Tableau 18 : Effet des variables sur la proportion d'individus de taille moyenne

Test	Variable	p-value
Kruskal-Wallis	Catégorie de récif	p = 0,525
Kruskal-Wallis	Zone	p = 0,378
Kruskal-Wallis	Profondeur	p = 0,817
Kruskal-Wallis	Année	p = 0,498

- **La seule variable influençant significativement la proportion d'individus de grande taille est la Zone. Mettant en évidence une variation géographique de la proportion de grands individus d'avantage présents en zone 2.** Les autres variables (Catégorie, Année, et Profondeur) n'ont pas d'effet significatif sur cette proportion, suggérant que la répartition des grands individus est homogène entre les types de récifs, au fil des années et à travers les profondeurs.

Tableau 19 : Effet des variables sur la proportion d'individus de grande taille

Test	Variable	p-value
Kruskal-Wallis	Catégorie de récif	p = 0,291
<b>Kruskal-Wallis</b>	<b>Zone</b>	<b>p = 0,002</b>
Kruskal-Wallis	Profondeur	p = 0,947
Kruskal-Wallis	Année	p = 0,477

## 2.3 BILAN

De 2021 à 2024, la mise en place d'un démonstrateur ambitieux dans le cadre du lot 1 a impliqué différents corps de métiers pour arriver aux résultats présentés depuis la conception à l'immersion en passant sur le suivi technique et écologique.

12 récifs d'anciennes génération de type double-buses immergés en 2006 à 1 km au large de Valras-Plage ont été complexifiés en 2022 par l'apport d'un tout nouveau module appelé 3D'Complex développé dans le cadre du projet qui intègre des ambitions de durabilité technique (levage, tractage, immersion, stabilité à la houle) en faisant appel aux méthodes de dimensionnement de grands ouvrages.

Les ambitions écologiques étaient également prioritaires. Elles ont amené à un design qui intègre les dernières technologies à disposition telle que l'impression 3D et les bétons bas carbone. Le module de complexification 3D'Complex répond aux enjeux ambitionnés du territoire (local et régional) à savoir, développer les fonctions écologiques des récifs artificiels déjà en place tout en limitant l'artificialisation future du substrat meuble dans les concessions existantes (0,51 m<sup>2</sup> par récif).

Après 2 années de complexification, les résultats des suivis techniques sont positifs. Ils montrent que les ouvrages sont toujours en place et que les opérations n'ont pas impacté les anciens modules.

D'un point de vue écologique, trois campagnes de suivis en plongée (2021, 2023 et 2024) ont été réalisées sur 24 récifs artificiels de type double-buse : 12 complexifiés vs 12 témoins.

L'efficacité de l'action de complexification a été mise en évidence, avec une augmentation de la diversité spécifique et de l'abondance de la macrofaune mobile, respectivement de 52% et 42%, comparativement aux valeurs mesurées pendant près de 15 ans sur les doubles-buses traditionnelles. Les peuplements restent malgré tout très peu diversifiés, avec une légère dominance de chinchards et de pageots communs, en particulier au niveau des récifs complexifiés.

Certaines espèces cryptiques historiquement rares, comme la cigale de mer, espèce protégée, ou d'intérêt commercial, comme le poulpe ou la langouste, ont vu en 2 années une augmentation de leur fréquence d'observation et de leurs effectifs. Certaines espèces comme le sar commun, la rascasse rouge et les gobies ont vu leur fréquence d'occurrence doubler ou tripler. Le tout en limitant le taux d'artificialisation de l'emprise au sol des nouveaux modules 3D'Complex à 6,2 m<sup>2</sup>. La complexification des récifs n'a pas d'influence sur les différentes classes de taille (petit, moyen et gros individus) des poissons. Il est uniquement observé une variation spatiale de la proportion de grands individus, qui sont d'avantage présents en zone 2.

Aussi, les résultats du démonstrateur du lot 1 permettent en 2025 de proposer une nouvelle solution de complexification opérationnelle pour la commune de Valras-Plage, répliquable en Région Occitanie pour l'amélioration de l'efficacité écologique des récifs d'ancienne génération.

## 3. LOT 2 – AMELIORATION DE LA CONNECTIVITE ECOLOGIQUE

### 3.1 MÉTHODOLOGIE

#### 3.1.1 Description de la phase conception et travaux

La commune bénéficie d'un plan de balisage depuis 2018 et intégré dans une concession des plages naturelles établie par l'arrêté DDTM34\_2019\_01\_005. Une demande d'AOT s'intégrant dans le plan de balisage existant sans modifier le positionnement des bouées a été réalisée. Les 8 bouées retenues ont été choisies de façon à étudier deux corridors écologiques en stepping-stones (pas japonais) recréés depuis les digues vers le large. La position des bouées de balisage concernées a été relevée suite à une plongée sur site le 28/07/21 et sont fournies dans le tableau ci-dessous.

Bouées Points	Position	
	X	Y
1	723956,0193	6238273,1138
2	723998,1200	6238243,6257
3	724026,6967	6238208,5286
4	724059,3582	6238167,8885
5	723787,6667	6238013,0897
6	723764,5430	6238038,9439
7	723746,8651	6238057,4068
8	723696,5618	6238107,2476

Les dimensions enveloppe du récif sont de 1.6m x 1m x1m ce qui représente une surface au sol de 1.6m<sup>2</sup> par récif pour un total de 12.8m<sup>2</sup> au droit des digues en enrochements existants. En réalité, la dalle d'emprise au sol sera évidée d'au moins 50% et le sable ne sera pas sous l'emprise directe du corps-mort en dehors des contours de cette dernière. L'objectif d'emprise directe au sol sera donc inférieure ou égale de 6,4 m<sup>2</sup>.

Les corps morts éco-conçus ont principalement été réalisés en béton 3D. Toute forme de polymères (biosourcés ou non, biodégradable ou non, recyclable ou non) a par ailleurs été exclue du présent projet situé hors concessions portuaires pour la réalisation des habitats et microhabitats.

D'une hauteur de 1m, chaque corps-mort est balisé en période estivale par une bouée jaune. Un système d'ancrage a été associé au module de façon à améliorer la stabilité et la pérennité de l'ouvrage qui feront l'objet de calcul de stabilité spécifique. Pour ces bouées, les chaînes ne toucheront plus le sable et n'impacteront plus ce dernier par raguage et frottements

Sur le plan physique, la taille, le design et le poids des récifs artificiels sont dimensionnés pour faire face aux efforts d'une houle de période de retour 30 ans (valeur d'efforts très proches de ceux correspondant à une période de retour de 50 ans). Des études de stabilité sont menées en partenariat avec le bureau d'étude EGIS et l'entreprise SEABOOST qui détiennent une expertise en dimensionnement d'ouvrage en milieu maritime tout en prenant en compte les retours d'expériences récents en Occitanie (ex : Agde). L'emprise au sol sur les substrats meubles a été réduite au maximum. La dalle centrale en béton a été évidée à plus de 80% de façon à limiter le taux d'artificialisation.

### 3.1.2 Présentation du récif géométrie et matériaux

#### 3.1.2.1 Plans descriptif du module

Sur ce projet l'équipe de conception a choisi de maximiser l'utilisation de l'impression béton pour concevoir un lest aux allures biomimétiques composé à 90% de surfaces fonctionnelles. Une structure en béton armé permet la liaison des deux demis parties imprimées. Il s'agit de la poutre en forme de T inversé que l'on distingue sur les figures ci-dessus. Cette association de mode constructif permet de conserver un récif particulièrement fonctionnel tout en s'assurant que les zones fortement sollicitées soient suffisamment résistantes pour faire face aux conditions de chargement du récif durant son cycle de vie.

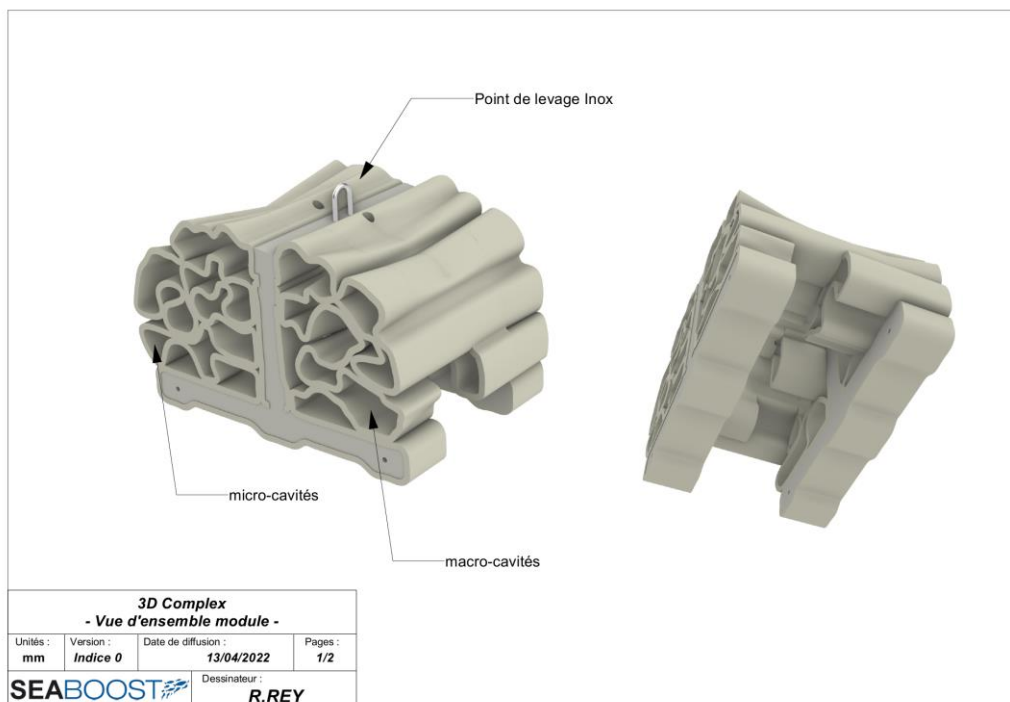


Figure 38 : Lest LOT 2 Vue en perspective

Volume 3D : 0.320 m<sup>3</sup>  
 Volume béton coulé : 0.133 m<sup>3</sup>  
 Masse totale : 1087 kg

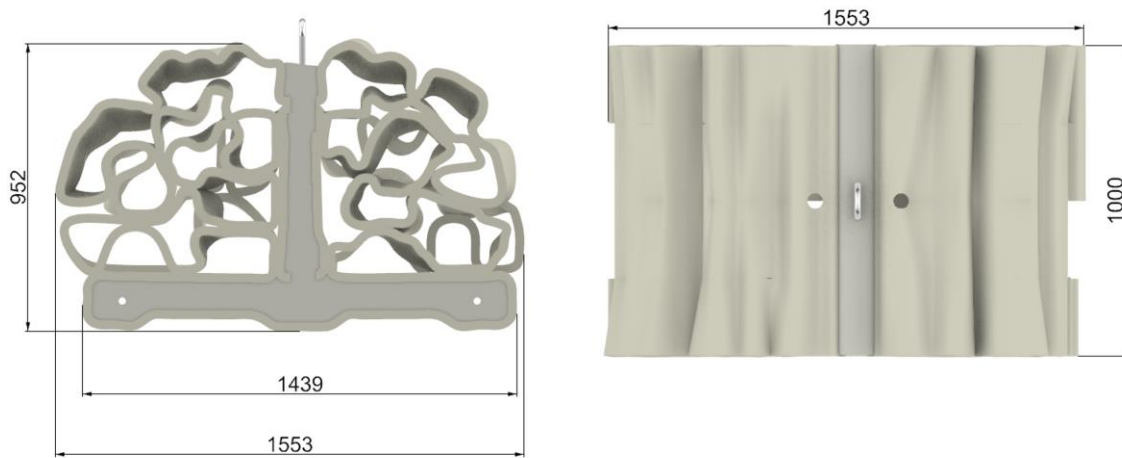


Figure 39 : Lest LOT 2 vue de face dimensions enveloppe

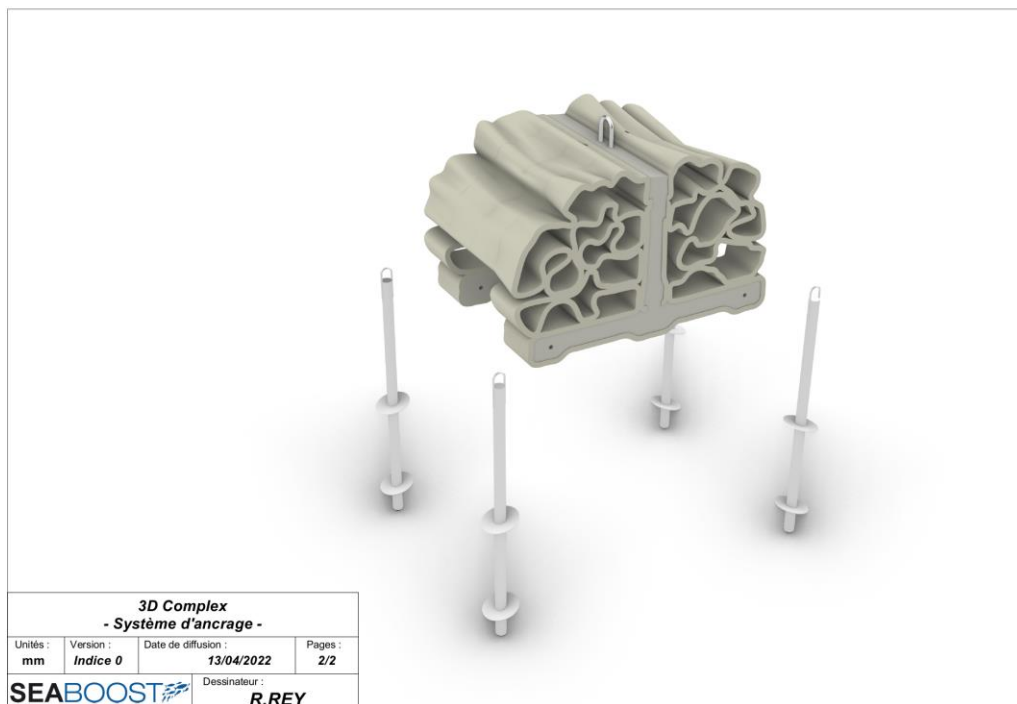


Figure 40 : Lest LOT 2 système d'ancrage

### 3.1.2.2 Conception des parties 3D imprimées

Un des intérêts de la 3D réside dans le fait de pouvoir créer des pièces distinctes sans pour autant devoir modifier le mode de production puisque celui-ci ne dépend pas d'accessoires de fabrication tel que des moules ou autres accessoires de mise en position pré-coulage. Le récif est donc constitué de deux pièces A et B qui ne sont pas identiques. Seuls les contours au niveau des joints sont identiques par symétrie pour assurer une continuité de la matière sur le plan de symétrie du récif.



Figure 41 : Impression des demi modules

Comme expliqué, les récifs comportent une zone de béton coulé, des découpes post-impression sont donc réalisées dans la 3D pour permettre le levage des pièces, leur retournement et le coulage des parties bétonnées.

Ces découpes sont visibles sur les images suivantes. Image de gauche, pièce avant découpe, image de droite pièce avec découpes.

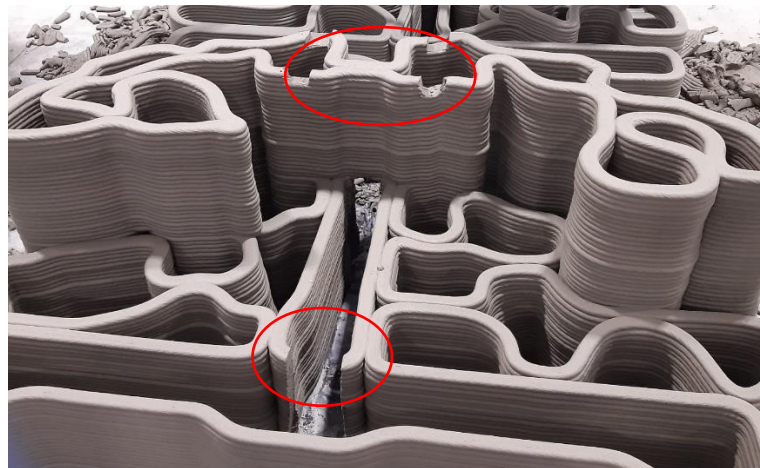


Figure 42 : détail d'un demi module imprimé (détail coupes réalisées)

### 3.1.2.3 Conception des habitats

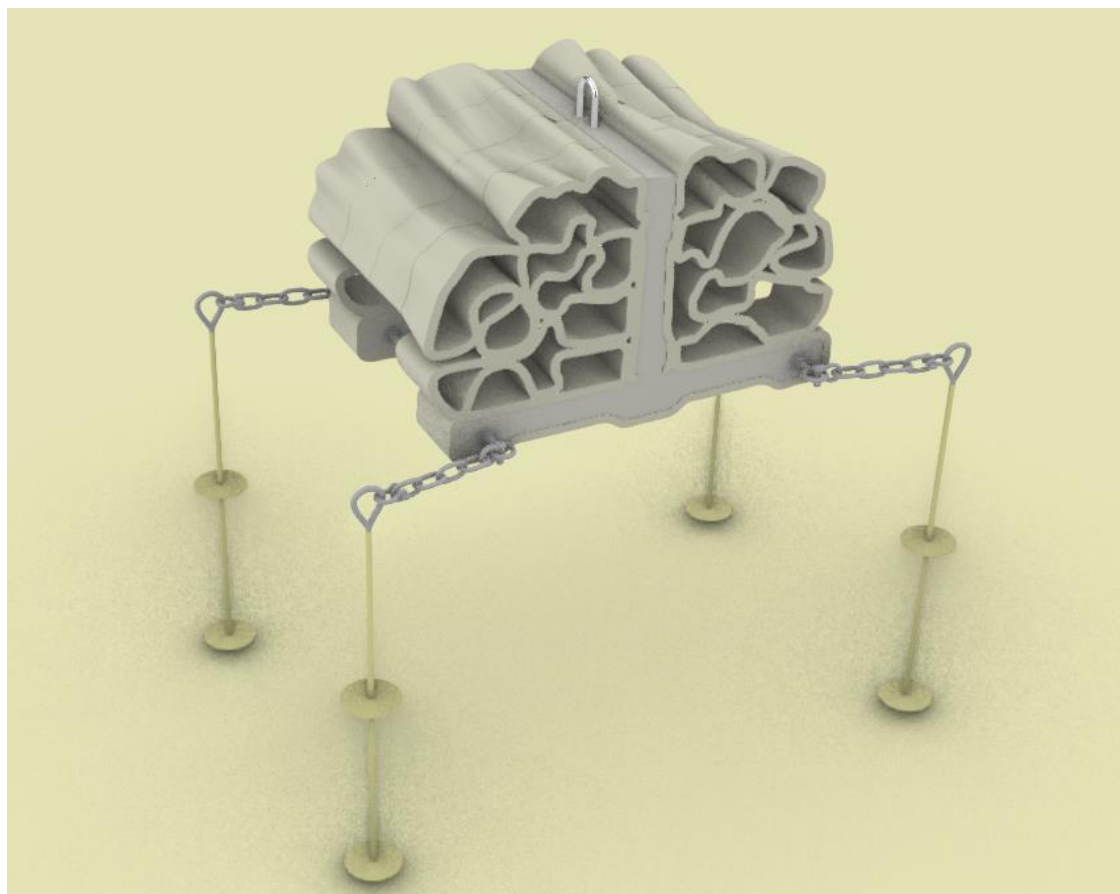


Figure 43 : Récif et mode d'ancrage - vue perspective

Sur le plan écologique les corps morts ont été éco-conçus pour réduire les impacts écologiques sur les fonds marins en optimisant les fonctionnalités écologiques de ces derniers.

Le design des corps morts a été pensé pour offrir un habitat pour les juvéniles de poissons et les invertébrés marins. Il se base également sur les retours d'expériences acquis en 2018 et 2019 suite à l'immersion de près de 40 unités dans l'Aire Marine Protégée du Cap d'Agde. Les innovations portent ici sur les sujets de limitation de l'emprise au sol des corps-morts (tout en maîtrisant la stabilité) ainsi que de la transparence hydro sédimentaire et la réduction de l'utilisation de matière première.

Les cavités, surplombs, les zones de faible hydrodynamisme, les zones de fuites, etc. ont été associés pour aboutir à un design innovant et répondant aux besoins de la faune marine dans les petits fonds côtiers. Les bénéfices attendus sur les écosystèmes et les espèces de substrat dur et mixte sont positifs et visent à augmenter d'une part la capacité de charge des récifs existants et du milieu. Le projet vise à développer des solutions pour l'amélioration des fonctions écologiques des petits fonds côtiers telles que la fonction de nurserie, de reproduction, d'habitat ou encore la connectivité écologique en milieu côtier urbanisé (ex : le long de digues en enrochements artificiels, sur des récifs artificiels vieillissants déjà en place). Un suivi spécifique sera mené *a minima* jusqu'en 2024 (cadre actuel du Programme des Interventions Territoriales de l'État alloué au projet 3D'COMPLEX). L'intérêt écologique (ex : fonction alimentation, nourricerie) pour les espèces de substrats meubles et de zones d'écotone (seiche, rouget, sole, pageot, etc.) sera par ailleurs évalué pendant le suivi scientifique du lot 2 mais aussi des autres lots du projet.

N°	Paramètres recherchés/évités	Principales espèces ciblées/évitées
1	Création de zones d'ombres hydrodynamiques sur les différentes face du module	Tout stade de vie post-larvaire et juvéniles de poissons necto-benthiques
2	Petites entrées < 15 cm nécessitant un entretien contre la colonisation et donnant sur cavité plus large de faibles hauteur (<10 cm)	Crustacés, poulpes
3	Petites entrées [15 ; 20 cm] donnant sur cavités internes de dimensions supérieures	Juvéniles de Sparidae (sars, oblades), mérou, corb, mostelles
4	Labyrinthe complexe avec optimisation des possibilités de fuites (changement de direction et de cavités)	Juvéniles de Sparidae (sars, oblades), mérou, corb, mostelles
5	Large cavité se réduisant en s'enfonçant vers le cœur du module proposant une à plusieurs zones de refuge ou de fuite	Juvéniles de Sparidae (sars, oblades), mérou, corb
6	Association de failles (horizontales et verticales), cavités larges, cavités étroites	Juvéniles de Sparidae (sars, oblades), mérou, corb
7	Grande rague horizontale étroite en contact avec le substrat	Juvéniles de Sparidae (sars, oblades), mérou, corb
8	Eviter rague filiforme peu complexe	Congres
9	Eviter gros accès aux ragues principales et l'insertion de petits fusils de chasse)	Chasseurs sous-marins

Figure 44: Tableau de correspondance paramètres /espèces ciblées.

### 3.1.3 Procédé de fabrication

Le procédé imaginé par l'équipe de conception SEABOOST semble à première vue relativement simple à mettre en œuvre (impression, mise face à face, coulage) mais comporte toutefois un certain nombre de points techniques permettant de venir à bout du process de fabrication. Ces points seront présentés dans cette section

#### 3.1.3.1 Réalisation des impressions

Les demis récifs imprimés arrivent sur le site de production dans la position d'impression. Les découpes post-impression ont été réalisées. En l'état la résistance des cordons d'impression ne permet pas d'effectuer un redressement. Il est fort probable que la partie basse cède sous le poids du module lui-même lorsque l'on atteindra le point de bascule. Ainsi un premier coulage est nécessaire pour renforcer la partie basse du module.



Figure 45 : Réception des impressions

### 3.1.3.2 Assemblage, coulage et transport des récifs

Une première opération consiste à réaliser le schéma d'armature des récifs. A l'exception de la boucle de levage, l'ensemble des armatures utilisées sont en fibre de verre. Cela permet de réduire la section des parties coulées en n'étant pas contraint par les enrobages minimaux à observer pour de l'acier standard utilisé dans le cas de structures immergées.

Ensuite un premier coulage est réalisé, uniquement en partie basse de chaque demi-récif. En dessous du trait rouge de la figure suivante. Des réservations sont faites, elles permettront d'accueillir des tiges filetées en inox sur lesquelles se fixeront les chaînes d'ancrage. On observera 3j de séchage avant d'effectuer un redressement de chacune des demi-parties.

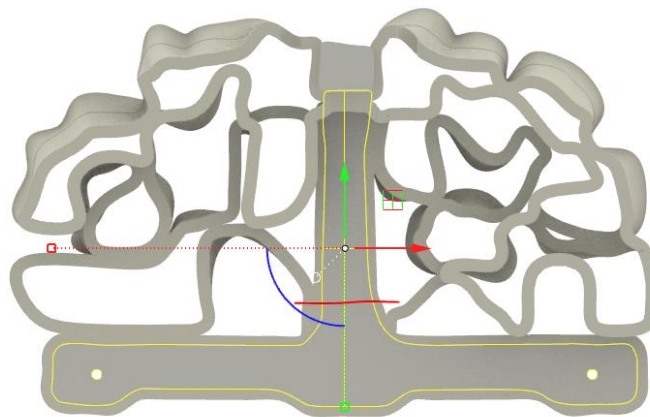


Figure 46 : Premier coulage avant retournement

Une fois les récifs redressés et mis face à face deux à deux on veille à réaliser un joint d'étanchéité pour permettre un coulage de la poutre supérieure horizontale sans fuite. Les faces latérales sont coffrées intérieur et extérieur de récif. Les deux parties du récif sont plaquées l'une contre l'autre et serrées au moyen de sangles.

On effectue le coulage après avoir pris soin d'installer la boucle de levage en Inox 316. Une finition de gravier est réalisée en complément pour accentuer le caractère rugueux de la surface, améliorant ainsi le potentiel de colonisation de cette zone.



Figure 47 : Récif assemblés

Sur l'image de gauche (Figure 47) on peut voir les différentes finitions réalisées après le décoffrage du module. Réalisation des ancrages filetés pour recevoir les chaînes, scellés dans les réservations prévues à cet effet. Isolation des écrous à œil pour limiter le potentiel de corrosion entre l'inox et l'acier galvanisé qui ont des potentiels d'électronégativité différent. Mise en place des chaînes et verrouillage de celles-ci. Mise en place des bouées de reprises : les chaînes de balisage débuteront au-delà des bouées de reprises pour limiter le risque de contact entre ces dernières et le récif.

Une fois assemblés et après avoir observé une période de curage et de séchage pour que le béton atteigne ses performances mécaniques maximales, les récifs sont chargés sur le plateau d'une semi-remorque pour être amené jusqu'au bord de quai depuis lequel se fera le chargement sur l'embarcation des travaux maritimes.



Figure 48 : Chargement des modules sur le plateau

### 3.1.4 Déploiement et immersion

Le déploiement s'est fait de manière assez classique sur cette phase LOT 2. Le poids des éléments étant relativement compatible avec la plupart des grues embarquées. Le transport réalisé à l'aide d'un camion bras a permis un déchargement autonome des récifs en bord de quai. L'opérateur des travaux maritimes a ensuite chargé un à un les récifs sur son pont. Deux voyages ont été nécessaires pour charger les huit lests écologiques.



Figure 49 : chargement des récifs sur la barge

Un premier passage sur la zone a permis de mettre en place des bouées de repérage pour matérialiser les zones de pose des lests. La visibilité étant bonne et la profondeur faible, il était possible voir le substrat depuis le pont lors de l'immersion. Un plongeur à l'eau contrôlait la bonne orientation et replacer ponctuellement le récif pour s'assurer de sa bonne position conformément au plan de déploiement. Un croc largable permettait de décrocher la grue de la boucle du récif.



Figure 50 : Immersion des récifs

Les ancres ont été posées par une équipe de scaphandriers dans une seconde phase. Enfin l'ensemble des points GPS des huit lests écologiques ont été relevés pour réalisés le plan de recollement.

## Plans de situation

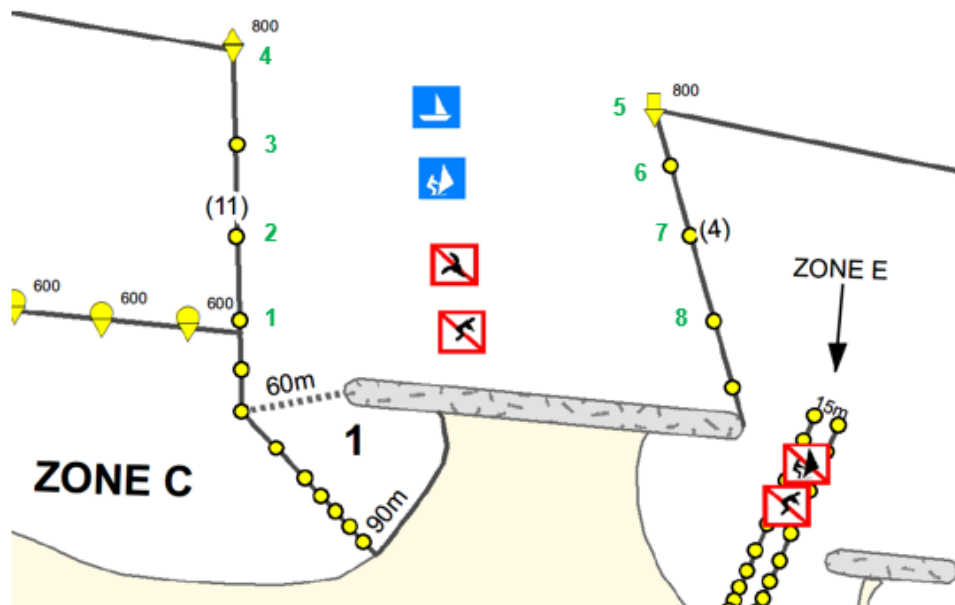
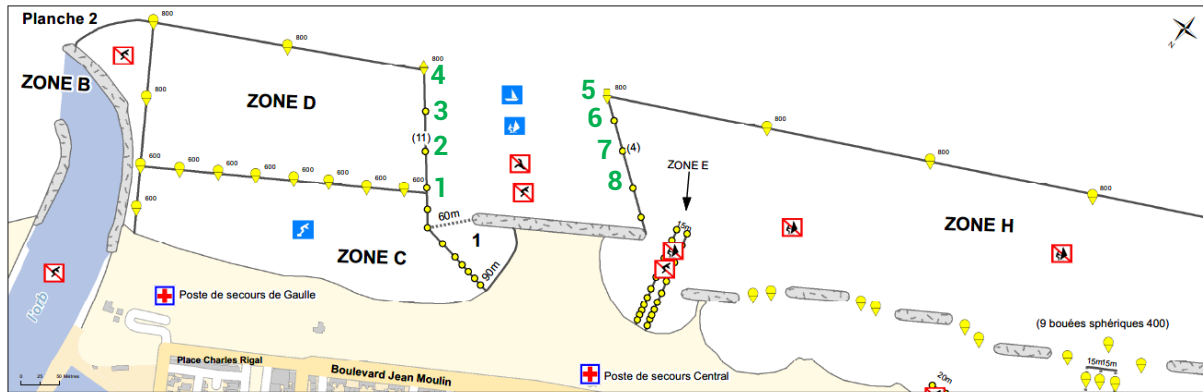


Figure 51 Plan de situation du balisage des 300m au droit de la commune de Valras-Plage. Les points identifiés de 1 à 8 représentent la position spatiale des corps-morts éco-conçus faisant l'objet de la présente demande d'AOT

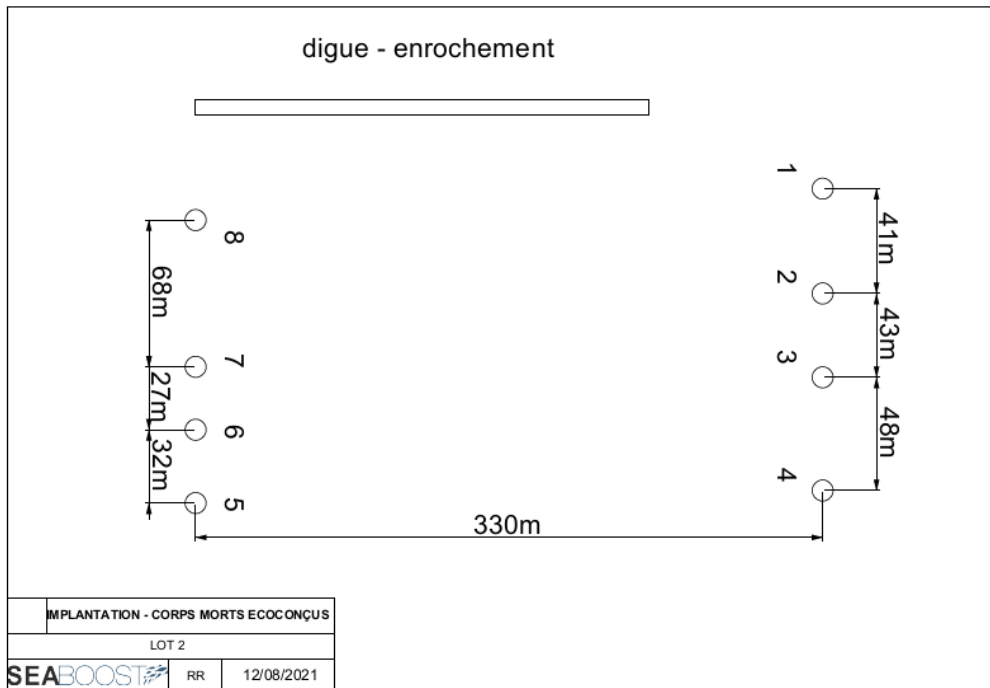


Figure 52: Plan de situation du balisage des 300m au droit de la commune de Valras-Plage. Les points identifiés de 1 à 8 représentent la position spatiale des corps-morts éco-conçus faisant l'objet de la présente demande d'AOT (Carte IGN).

### 3.1.2 Suivi des digues en enrochements et corps-morts éco-conçus

Le protocole de suivi scientifique a été conçu selon les modalités suivantes :

- Installation des huit lests de balisage en impression 3D entre les récifs artificiels et les digues rocheuses (site 3, Figure 53) ;
- Identification de deux sites témoins (sites 1 et 2) à différentes distances des récifs ;
- Suivi des digues sur l'ensemble des sites et des radiales sableuses pour les sites 1 et 2, afin d'évaluer l'impact des lests de balisage en impression 3D sur les espèces écotones ;

- Réalisation de trois campagnes de suivi sur les trois sites : une avant l'installation des lests de balisage en impression 3D en 2021, puis deux après leur immersion, pour analyser la colonisation des récifs et leur intérêt écologique (Tableau 20).

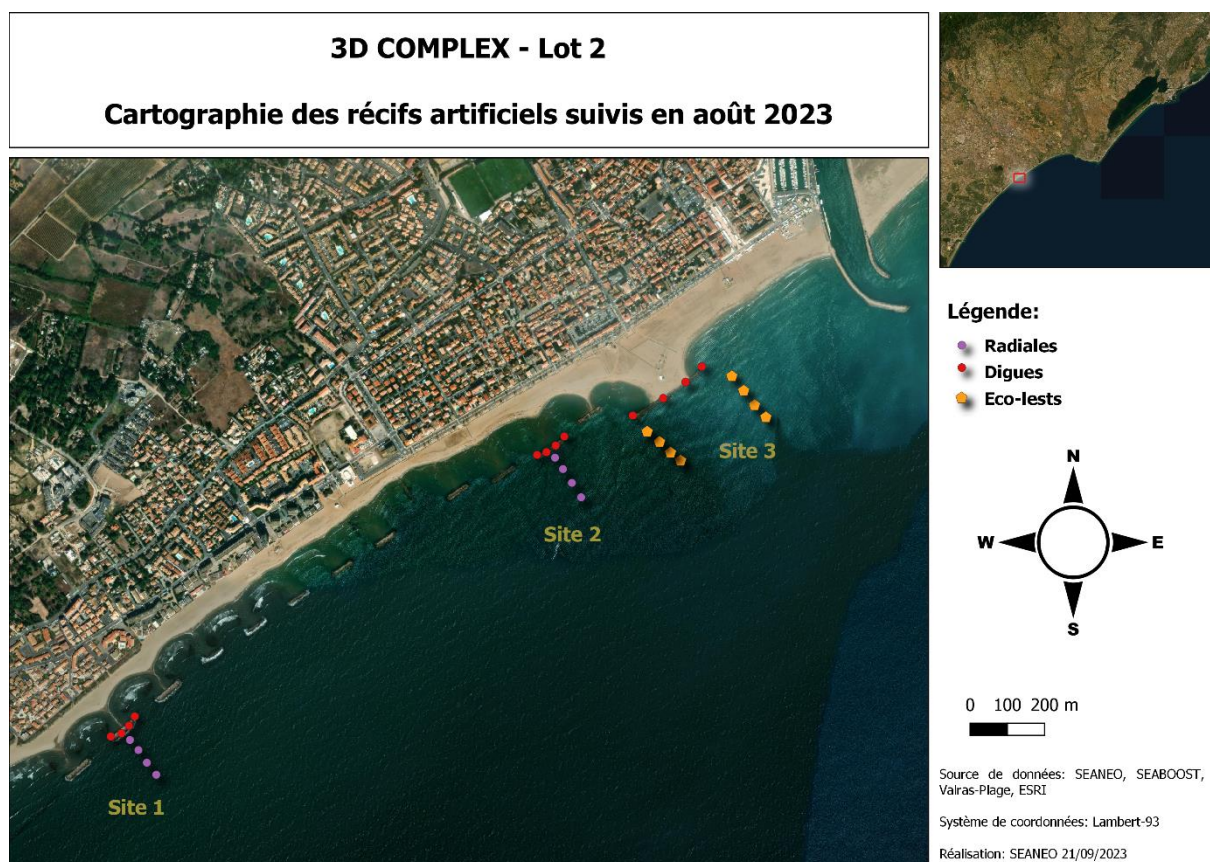


Figure 53 : Cartographie des sites de suivi dans le cadre du Lot 2

Tableau 20 : Détails des suivis réalisés dans le cadre du Lot 2

	1 <sup>ère</sup> campagne de suivi	2 <sup>ème</sup> campagne de suivi	3 <sup>ème</sup> campagne de suivi
<b>Date</b>	Septembre 2021	Août 2023	Août 2024
<b>Détail</b>	1 an avant installation des lests de balisage en impression 3D	1 an après installation des lests de balisage en impression 3D	2 ans après installation des lests de balisage en impression 3D

**Protocole d'observation** : Sur chaque point de suivi, un plongeur observe statiquement, pendant 5 minutes, toutes les espèces présentes et leurs stades de développement dans un rayon de 50 cm (surface de 1 m<sup>2</sup> par station).

Les espèces et stades de vie observés sont comparés aux observations réalisées à la côte dans les épis existants. Un intérêt particulier sera porté aux espèces de substrat meuble.

## 3.2 RESULTATS

### 3.2.1 Études des paramètres physiques

Au cours des deux années de suivis, aucune altération physique des structures n'a été constatée. Cependant, le secteur retenu est sujet à l'engraissement ce qui a entraîné un ensablement partiel des Eco-Lests 3D après 17 mois. (Tableau 21). Lors du suivi d'Août 2023, l'intégralité des Eco-lests 3D sont concernés sur plus de 50% de la hauteur (soit environ 50 cm). Lors du suivi d'Août 2024, soit après 29 mois, la situation a évolué : 3 sont très ensablés (>50% de la hauteur), 2 sont entièrement ensablés et 3 sont peu ensablés. Néanmoins les portions visibles continuent d'offrir un refuge pour la faune marine. La dynamique d'accrétion sur le site 3, observé pendant 2 ans, explique ce résultat. En effet, les ancrages étant toujours en place, il ne peut s'agir d'un enfoncement des modules. Pour autant cette dynamique est variable en fonction des Eco-Lests 3D, certains se découvrant, d'autres s'ensablant totalement.

Tableau 21 : Évolution du niveau d'ensablement des lests 3D @ au cours des suivis, le long d'un gradient côte-large

Code du lest 3D	2022	Campagne de suivi - Août 2023	Campagne de suivi - Août 2024
Ouest 1	Mise en place des lests 3D	Très ensablé (>50% de la hauteur)	Peu ensablé (<50% de la hauteur)
Ouest 2		Très ensablé (>50% de la hauteur)	Très ensablé (>50% de la hauteur)
Ouest 3		Très ensablé (>50% de la hauteur)	Peu ensablé (<50% de la hauteur)
Ouest 4		Très ensablé (>50% de la hauteur)	Peu ensablé (<50% de la hauteur)
Est 1		Très ensablé (>50% de la hauteur)	Très ensablé (>50% de la hauteur)
Est 2		Très ensablé (>50% de la hauteur)	Entièrement ensablé
Est 3		Très ensablé (>50% de la hauteur)	Entièrement ensablé
Est 4		Très ensablé (>50% de la hauteur)	Très ensablé (>50% de la hauteur)

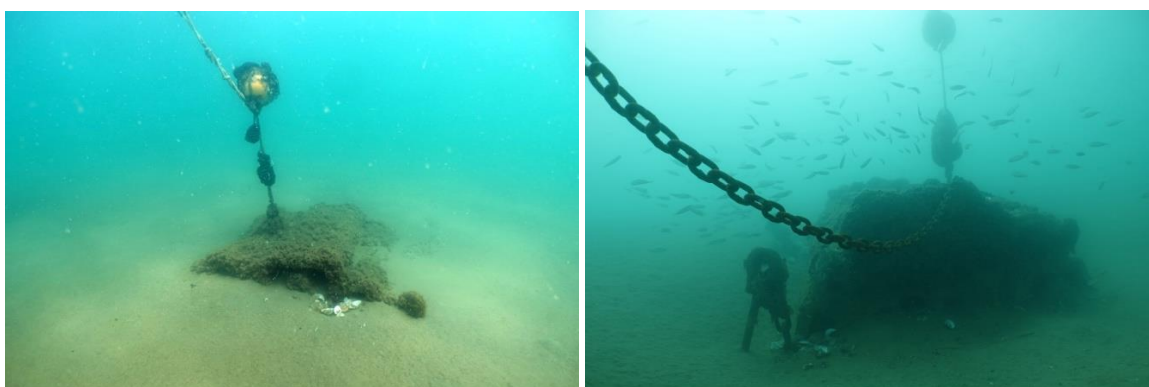


Figure 54: Image d'un lest 3D très ensablé (à gauche) et peu ensablé (à droite) en Août 2024 après 29 mois d'installation

### 3.2.2 Études des paramètres biologiques

A partir des observations réalisées sur chaque point de suivi, une analyse de la richesse spécifique (Figure 55) et de l'abondance d'individus (Figure 56) a été réalisée sur les différents sites.

#### 3.2.2.1 Richesse spécifique

La richesse spécifique est faible sur l'ensemble des sites, avec des valeurs moyennes oscillant entre 2 espèces (S2 – 2021) et 9 espèces (S2 – 2023) (Figure 55). Elle augmente entre 2021 et 2023, puis diminue à nouveau en 2024. Les conditions météorologiques ont pu jouer un rôle dans la diminution de la richesse spécifique observée.

La richesse spécifique moyenne est minimale (< 3 espèces) au niveau des radiales sableuses et ce, quels que soient les sites et les années. A l'inverse, les digues rocheuses présentent des richesses spécifiques moyennes maximales au niveau des sites S1 et S2, quelles que soient les années.

Au niveau des lests 3D (S3), la tendance et l'ordre de grandeur sont similaires à ceux observés au niveau des digues rocheuses. En 2021, la richesse spécifique moyenne du site 3 était inférieure à 4 espèces. Après la mise en place des lests 3D, le nombre d'espèce a augmenté en passant à 7 espèces en moyenne en 2023 et à 6 espèces en moyenne en 2024. L'apport d'un substrat en zone sableuse a donc permis l'installation de nouvelles espèces.

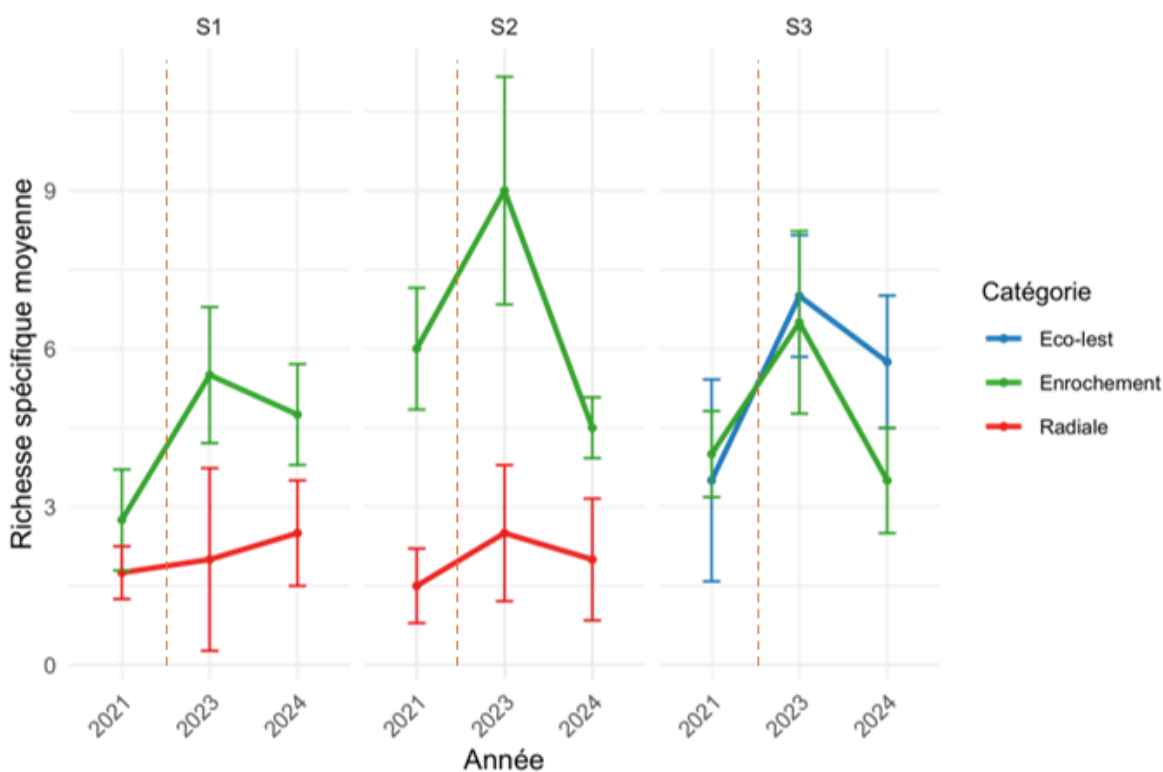


Figure 55 : Évolution de la richesse spécifique moyenne selon le site et la catégorie. Les lignes verticales en pointillés orange représentent l'année de pose des lests 3D (2022)

Les analyses statistiques confirment ces observations : des différences significatives de richesse spécifique selon la catégorie de substrat (radiale sableuse, digue rocheuse et Eco-lest) sont observées (Tableau 22). En effet, les moyennes observées au niveau des radiales sableuses sont significativement inférieures à celles observées au niveau des digues rocheuses et des Eco-lests. Cependant aucune différence significative n'est observée entre les moyennes des digues rocheuses et celles des Eco-lests, témoignant d'une influence importante du substrat rocheux pour la richesse spécifique alentour. Au niveau temporel, l'année 2023 présente une richesse spécifique moyenne

significativement supérieure à celle observée en 2021 uniquement. Néanmoins, les valeurs et le nombre de données restant faibles, ces résultats sont à nuancer.

Tableau 22 : Résultats du modèle de régression binomiale négative effet des variables sur la richesse spécifique

Test	Variable	P- value
Modèle de régression linéaire	Année	< 0,001
	Site	0,013
	Catégorie	< 0,001

### 3.2.2.2 Abondance

Comme pour la richesse spécifique, l'abondance moyenne augmente entre 2021 et 2023, puis tend à diminuer en 2024 (Figure 56). Les conditions météorologiques ont pu jouer un rôle dans la diminution du nombre d'individu observée.

L'abondance moyenne est minimale au niveau des radiales sableuses et ce, quels que soient les sites et les années. Les valeurs varient de 3 individus en moyenne (S2 – 2021) à 67 individus en moyenne (S1 – 2023). A l'inverse, les lests 3D présentent des abondances moyennes maximales au du site S3, avec des moyennes de 649 individus en 2023 et de 271 individus en 2024. Ces fortes abondances sont essentiellement dues à la présence exceptionnelle de rougets barbet (*Mullus surmuletus*) juvéniles à proximité des lests 3D. L'apport d'un substrat en zone sableuse a donc permis l'installation de nouvelles espèces. Au niveau des digues rocheuses, les valeurs sont intermédiaires. Les abondances moyennes varient de 15 individus (S1 – 2021) à 235 individus (S2 – 2023).

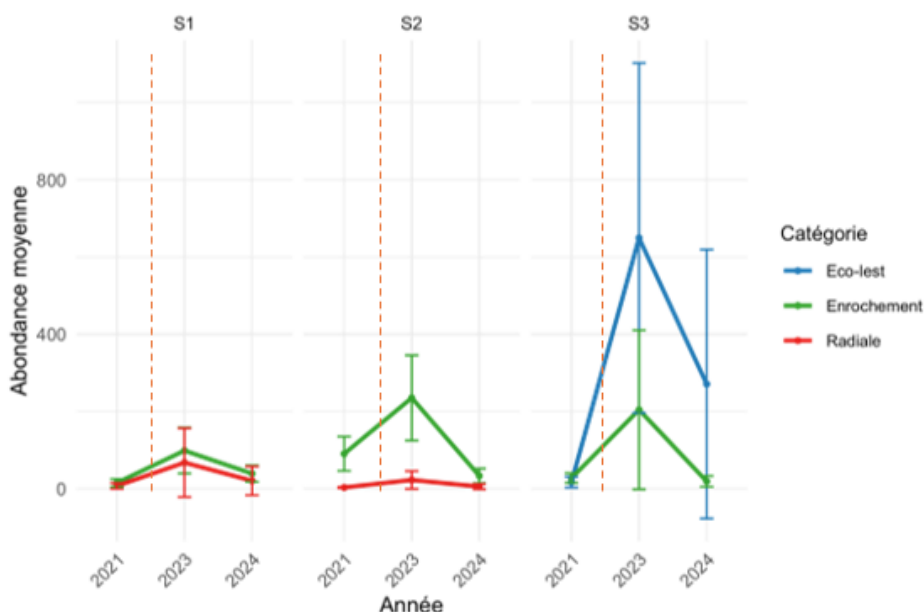


Figure 56 : Évolution de l'abondance moyenne selon le site et la catégorie de substrat. Les lignes verticales en pointillés orange représentent l'année de pose des lests 3D (2022)

Les analyses statistiques confirment ces observations : des différences significatives d'abondance selon la catégorie de substrat (radiale sableuse, digue rocheuse et Eco-lest) sont observées (Tableau 23). En effet, les moyennes observées au niveau des radiales sableuses sont significativement inférieures à celles observées au niveau des digues rocheuses et des Eco-lests. Cependant aucune différence significative n'est observée entre les moyennes des digues rocheuses et celles des Eco-lests, témoignant d'une influence importante du substrat rocheux pour la richesse spécifique alentour. Au niveau spatio-temporel, l'année 2023 et le site S3 diffèrent significativement : ils présentent une

abondance moyenne significativement supérieure aux autres années et aux autres sites. Ces variations sont principalement dues à la forte présence en nombre de mulets barbet juvéniles observée en 2023, au niveau du site S3.

Tableau 23 : Résultats du modèle de régression binomiale négative effet des variables sur l'abondance

Test	Variable	P- value
Modèle de régression linéaire	Année	< 0,0001
	Site	0,008
	Catégorie	< 0,001

Aussi, la mise en place de Eco-lests 3D sur une zone initialement sableuse a permis d'augmenter la richesse spécifique et l'abondance, initialement très faibles. Désormais, les valeurs se rapprochent de celles observées au niveau des digues rocheuses. L'apport d'un substrat en zone sableuse a donc permis l'installation de nouvelles espèces et de nouveaux individus (Tableau 24). Aussi, ces résultats confirment une amélioration de l'efficacité écologique des lests d'ancienne génération à travers la mise en place d'une nouvelle solution de lests éco-conçus, adaptée au balisage de la zone côtière opérationnelle pour la commune de Valras-Plage.

Tableau 24 : Synthèse de l'évolution de la richesse spécifique et de l'abondance entre 2021 et 2024

	Richesse spécifique	Abondance
Moyenne entre sur les radiales sableuses S1, S2, S3 entre 2021 et 2024	2,1 ± 1,0	20,3 ± 39,2
Moyenne sur les épis en enrochements entre 2021 et 2024	5,2 ± 2,1	84,5 ± 107,1
Moyenne sur les lests 3D en 2023	7,0 ± 1,2	649,6 ± 453,1
Moyenne sur les lests 3D en 2024	5,8 ± 1,3	270,8 ± 348,4
Moyenne sur les lests 3D en 2023-2024	6,4 ± 1,3	460,0 ± 425,4

### 3.2.2.3 Fréquence d'occurrence des espèces

La Figure 57 présente l'évolution de la fréquence d'occurrence des espèces selon les trois types d'habitats : les Eco-lests (en bleu), les enrochements (en vert) et les radiales sableuses (en rouge).

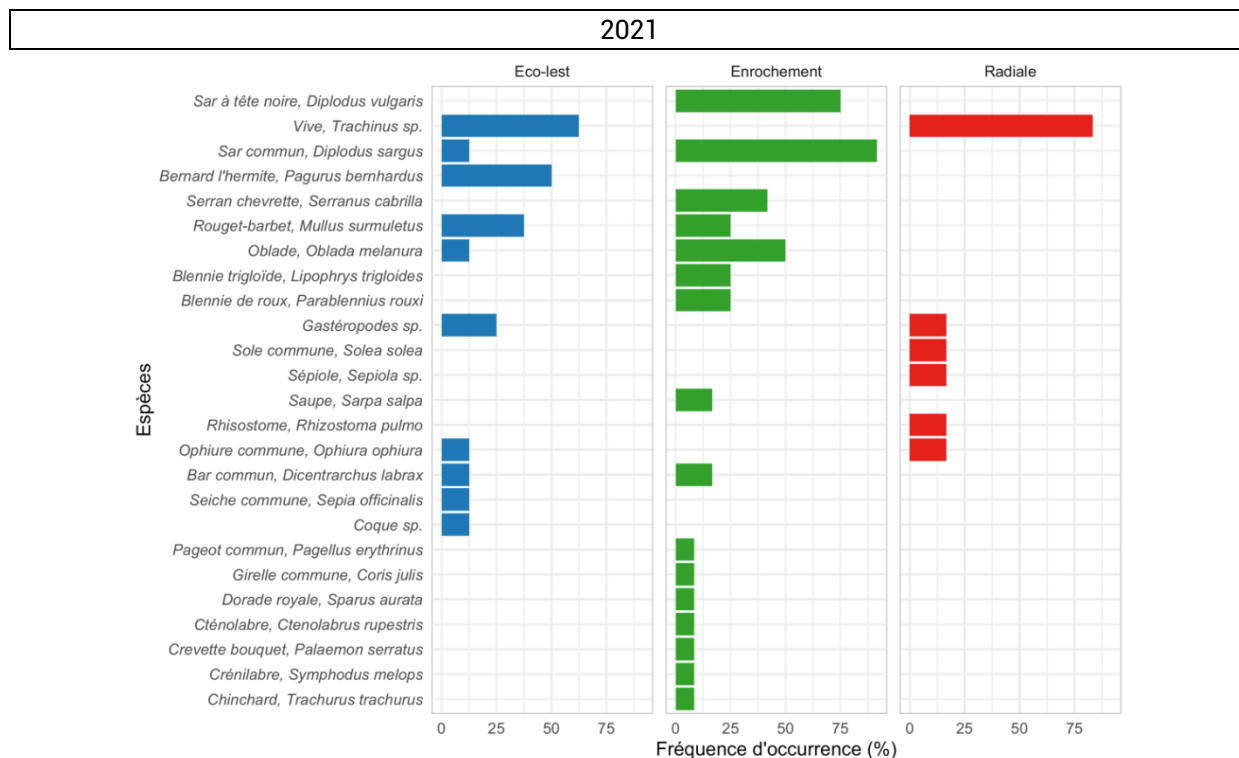
En 2021 (avant installation des Eco-lests 3D), les espèces les plus fréquemment rencontrées sur les radiales sableuses et sur les futures zones d'installation des Eco-lests sont la vive, le rouget barbet et le bernard l'hermite avec des fréquences d'occurrence supérieures à 40%. Sur les enrochements, on retrouve des espèces plus spécifiques du substrat rocheux : sar commun, sar à tête noire et oblade avec des fréquences d'occurrence supérieures à 50%. A noter que certaines espèces sont communes aux radiales sableuses et aux enrochements tel que le sar commun, le rouget barbet, l'oblade, le bar ce qui dénote une certaine connectivité locale entre ces différents habitats.

En 2023 et 2024 :

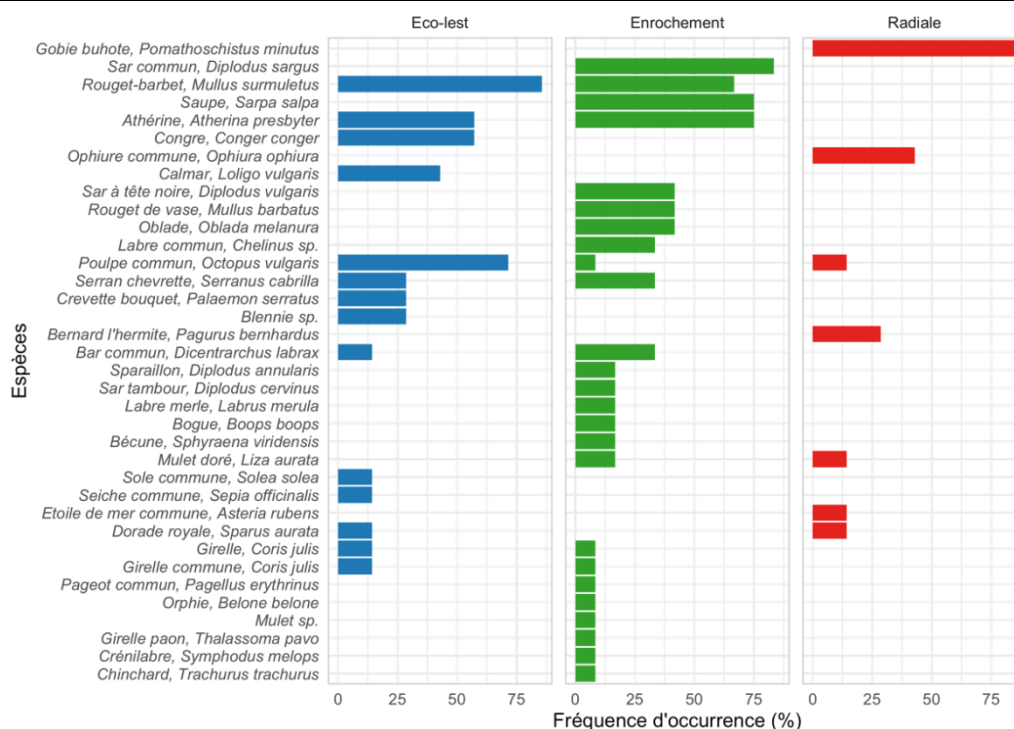
- **Pour les Eco-lests 3D**, on observe que les espèces les plus communes en 2023 sont le rouget, le poulpe, le congre et l'athérine (fréquences d'occurrence supérieures à 50%). En 2024 on retrouve le rouget, le poulpe et la blennie (fréquences d'occurrence supérieures à 50%) (Figure 57). Certaines espèces comme le poulpe ont été quasi exclusivement observées sur les eco-lests 3D.
- **Au niveau des enrochements**, la distribution des espèces est plus homogène au cours des années, avec une forte présence de sars, de saupes et de gobies (fréquences d'occurrence supérieures à 75%). Certaines espèces comme le sar à tête noire, le serran chevrette, le

chinchard, le congre sont régulièrement observées sur les Eco-lests 3D notamment au stade juvénile, ce qui atteste d'une certaines connectivités ces différents habitats depuis l'installation des Eco-lests en 2021.

- **Sur les radiales sableuses**, les espèces les plus fréquentes dans cet habitat sont principalement des poissons adaptés aux fonds meubles comme les gobies, les vives, les ophiures, les sépioles et certaines espèces de blennies. La fréquence d'occurrence y est généralement plus faible que dans les deux autres habitats notamment durant les plongées de jour. En effet les espèces inféodées à ces susbstrats sont cryptiques, ensablées le jour et plus actives la nuit.



2023



2024

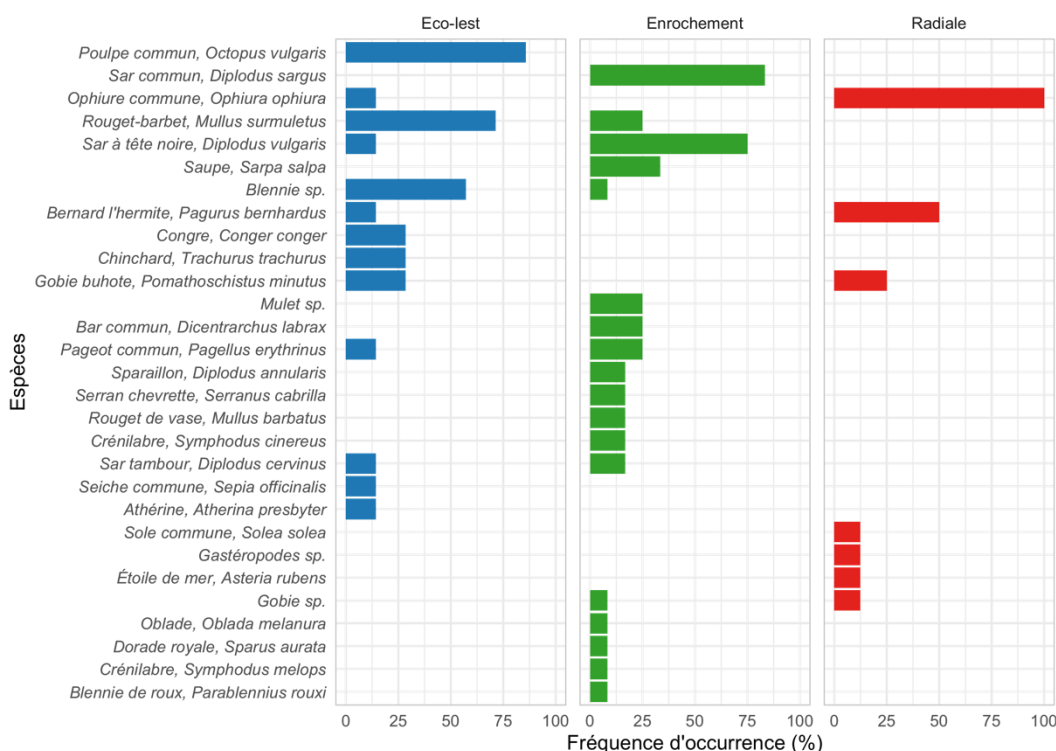


Figure 57 : Fréquences d'occurrence des différentes espèces selon la catégorie de substrat et l'année. Les Eco-lests étant mis en place à partir de 2022, les comptages de 2021 ont été réalisés le long d'une radiale sableuse.

Ainsi, avant l'installation des Eco-lests 3D (2021) les espèces présentes sont essentiellement des espèces de substrat meuble (vive, rouget, seiches, Bernard l'Hermite). 5 espèces de poissons sont alors comptabilisées le long des radiales sableuses amenées à être équipées. Alors que 1 et 2 ans

après l'installation des Eco-lests, 14 espèces de poissons ont été observées sur ces mêmes radiales. Les espèces les plus fréquentes sont à la fois des espèces de substrat rocheux (poulpe, blennie, congre), des espèces de substrat meubles (rouget, athérines) mais aussi des espèces néritiques/pélagiques comme le calmar ou le chinchard.

Ceci suggère que ces structures artificielles remplissent efficacement leur rôle de corridor écologique en offrant des habitats appropriés pour ces espèces entre les zones naturelles d'enrochement.

**Aussi, la comparaison des trois habitats montre que les Eco-lests semblent créer un habitat intermédiaire entre l'enrochement naturel et les zones sableuses, permettant ainsi d'établir une continuité écologique pour les espèces de substrat dur. Il est également intéressant de souligner la présence d'espèces à haute valeur économique sur les Eco-lests, comme le poulpe commun, la sole et divers sparidés (sars, dorades) (Tableau 25).**

Tableau 25 : Synthèse des espèces et stades de vie observées entre 2021 et 2024 sur les différentes catégories de substrats.

	Eco-lest 3D	Epis en enrochements	Radiales sableuses
<b>Macrocrustacés</b>			
Bernard l'hermite, <i>Pagurus bernhardus</i>	x		x
Crevette bouquet, <i>Palaemon serratus</i>	x	x	
<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Céphalopodes</b>			
Calmar, <i>Loligo vulgaris</i>	x		
Poulpe commun, <i>Octopus vulgaris</i>	x	x	x
Seiche commune, <i>Sepia officinalis</i>	x		x
Sépiole, <i>Sepiola sp.</i>			x
<b>Total</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>3</b>
<b>Poissons</b>			
Athérine, <i>Atherina presbyter</i>	x	x	
Bar commun, <i>Dicentrarchus labrax</i>	x	x	x
Bécune, <i>Sphyaena viridensis</i>		x	
Blennie sp.	x	x	
Bogue, <i>Boops boops</i>		x	
Chinchard, <i>Trachurus trachurus</i>	x	x	
Congre, <i>Conger conger</i>	x		
Crénilabre, <i>Symphodus melops</i>		x	
Cténolabre, <i>Ctenolabrus rupestris</i>		x	
Dorade royale, <i>Sparus aurata</i>	x	x	x
Girelle commune, <i>Coris julis</i>	x	x	
Girelle paon, <i>Thalassoma pavo</i>		x	
Gobie buhote, <i>Pomatoschistus minutus</i>	x		x
Labre merle, <i>Labrus merula</i>		x	
Mulet doré, <i>Liza aurata</i>		x	x
Mulet sp.		x	
Oblade, <i>Oblada melanura</i>		x	x
Orphie, <i>Belone belone</i>		x	
Pageot commun, <i>Pagellus erythrinus</i>	x	x	
Rouget de vase, <i>Mullus barbatus</i>		x	
Rouget-barbet, <i>Mullus surmuletus</i>	x	x	x
Sar à tête noire, <i>Diplodus vulgaris</i>	x	x	
Sar commun, <i>Diplodus sargus</i>		x	x
Sar tambour, <i>Diplodus cervinus</i>	x	x	
Saupe, <i>Sarpa salpa</i>		x	
Serran chevrette, <i>Serranus cabrilla</i>	x	x	
Sparaillon, <i>Diplodus annularis</i>		x	
Sole commune, <i>Solea solea</i>	x		x
Vive, <i>Trachinus sp.</i>			x
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>25</b>	<b>9</b>

Espèces substrats meubles et écotones

X Espèces observées au stade juvénile

### 3.2.3.4 Abondances des classes de taille

Les données révèlent une nette dominance des individus de petite taille en moyenne pour les différentes zones suivies. Les moyennes des proportions sont respectivement de **66,4 %** pour les petits individus, **35,3 %** pour les individus de taille moyenne et **5,93 %** pour les grands individus. Ces résultats mettent en évidence une structure de population composée de petits individus majoritairement au stade juvénile, tandis que les individus de taille moyenne et grande sont moins représentés. Les écarts-types élevés pour toutes les tailles (petits : 28,1 %, moyens : 26,2 %, grands : 7,83 %) suggèrent une forte variabilité des proportions au sein de chaque catégorie.

Concernant les Eco-lests, une dominance d'individus de petite taille (environ 70%), une présence croissante d'individus de taille moyenne entre 2021 et 2024, ainsi qu'une faible proportion d'individus de grande taille (environ 20%) sont observées (Figure 58). Sur 14 espèces de poissons recensées, 11 l'ont été au stade juvénile. Les lests 3D semblent remplir une fonction de nurserie avec une forte proportion de petits individus, tout en permettant le développement d'individus plus grands au fil du temps.

Pour les enrochements, une tendance de la structure de taille au fil du temps est relevée :

- Site S3 : augmentation de la proportion d'individus moyens et gros entre 2021 et 2024
- Sites S1 et S2 : maintien d'une dominance d'individus petits avec une proportion stable d'individus moyens

Aussi, les enrochements, plus grands et plus anciens, montre une diversité de tailles plus équilibrée, particulièrement sur le site S3, suggérant un habitat plus mature et stable.

Enfin pour les radiales, une évolution vers une dominance d'individus de taille moyenne en 2024 est notée. Alors qu'en 2021 et en 2023, une majorité d'individus était de petite taille. Très peu d'individus de grande taille sont observés.

Cette analyse temporelle suggère une évolution positive de l'écosystème, avec une diversification des classes de taille qui pourrait être liée à l'installation des Eco-lests®, particulièrement visible sur le site S3.

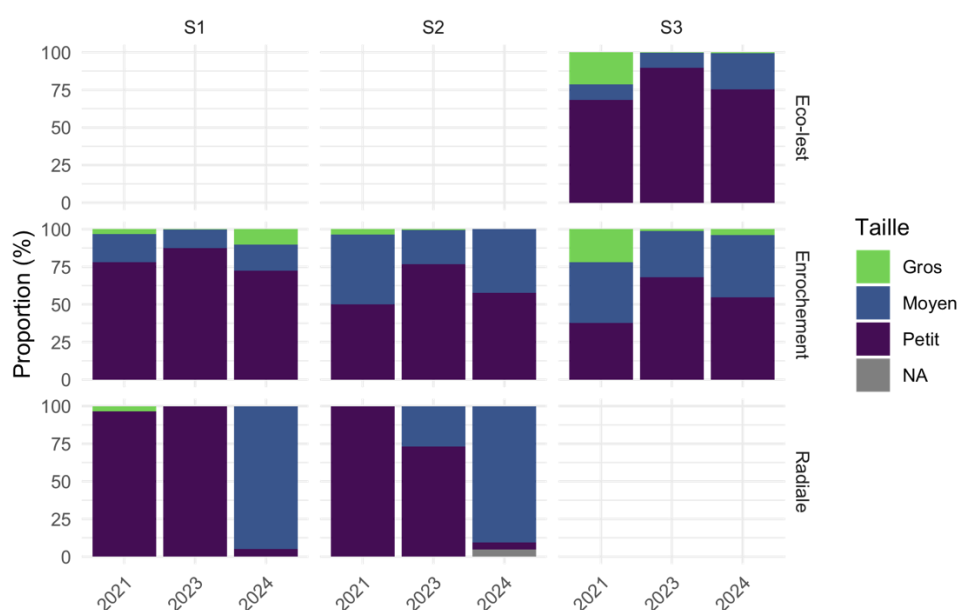


Figure 58 : Abondance des différentes classes de tailles selon l'année et la catégorie de substrat

Les tests de statistiques ne montrent qu'aucune des variables étudiées (Catégorie de substrat, Année, Site) n'a d'effet significatif sur la proportion d'individus de petite taille (Tableau 26). Cela suggère que la proportion d'individus petits est homogène entre les différentes catégories de substrat, les années et les sites. Ces observations concordent avec l'hypothèse d'une répartition homogène des juvéniles dans la zone d'étude. Les résultats semblent indiquer que l'approche de connectivité fonctionne comme prévu en favorisant les déplacements des juvéniles entre les différents milieux en leur fournissant des abris adaptés.

Tableau 26 : Effet des variables sur la proportion d'individus de petite taille

Test	Variable	p-value
Kruskal-Wallis	Catégorie de substrat	p = 0,535
Kruskal-Wallis	Année	p = 0,073
Kruskal-Wallis	Site	p = 0,396

La proportion d'individus de taille moyenne montre une différence significative en fonction de la catégorie de substrat (Tableau 27). Cela indique que les proportions varient selon le type de substrat, avec certaines catégories favorisant davantage les individus de taille moyenne, c'est le cas ici pour le substrat enrochements qui présente une proportion d'individus de taille moyenne significativement plus importante que les autres substrats.

Les variables Année et Site n'ont pas d'effet significatif, suggérant une stabilité de cette proportion entre les années et les sites étudiés.

Tableau 27 : Effet des variables sur la proportion d'individus de taille moyenne

Test	Variable	p-value
<b>Kruskal-Wallis</b>	<b>Catégorie de substrat</b>	<b>p = 0,047</b>
Kruskal-Wallis	Année	p = 0,164
Kruskal-Wallis	Site	p = 0,281

Pour les individus de grande taille, seule la variable Année montre un effet significatif (Tableau 28). Cela suggère une variation temporelle des proportions de grands individus entre 2021 et 2024, avec une proportion significativement plus importante en 2021. Les variables Catégorie et Site, en revanche, n'ont pas d'effet significatif, ce qui indique que la répartition des grands individus est similaire entre les structures étudiées (enrochement, Eco-lests et radiales sableuses) et les sites, même si l'enrochement du site S3 présente une tendance à accueillir de plus gros individus.

Tableau 28 : Effet des variables sur la proportion d'individus de grande taille

Test	Variable	p-value
Kruskal-Wallis	Catégorie de substrat	p = 0,811
<b>Kruskal-Wallis</b>	<b>Année</b>	<b>p = 0,035</b>
Kruskal-Wallis	Site	p = 0,866

### 3.3 BILAN ET AXES D'AMÉLIORATIONS

**De 2021 à 2024, le lot 2 a été associé à la mise en place d'un démonstrateur sur un site unique sur la plage en rive droite au droit du poste de CRS afin de matérialiser un chenal de navigation dans des petits fonds de -3 à -4 m de profondeur.**

**Les études de conception amont ont permis de développer un design innovant, Eco-lest 3D. Ce dernier a fait appel à la technologie de l'impression 3D et intègre des objectifs techniques forts (levage avec moyens locaux, immersion, stabilité à la houle en zone de déferlement) tout en s'attachant à limiter autant que faire se peut, le taux d'artificialisation via une réduction de l'emprise au sol (pas de dalle,**

création de patins) et l'utilisation de matière première. 8 Eco-lests 3D ont été fabriqués et immergés en 2022. Si les modules sont toujours en place (stabilité et durabilité confirmée), un engraissement sédimentaire a été observé avec un recouvrement de tout ou en partie des solutions, ceci limitant leur fonctionnalité écologique lors de l'étude.

Pour autant, 14 espèces de poissons, dont 11 au stade juvénile, ont été observées après deux années d'immersion sur les Eco-lests 3D. Certaines espèces patrimoniales comme le poulpe ont été quasi exclusivement identifiées au sein des cavités en impression 3D. S'il paraît clair qu'à cette échelle de 8 unités, il ne peut pas y avoir un effet significatif d'accroissement des populations de macrofaune mobile localement, le projet indique qu'en s'éloignant jusqu'à 300m de l'ouvrage en enrochements existants, une connectivité est observée avec des espèces communes aux deux typologies d'ouvrages comme le sar à tête noire ou le congre, et ce notamment au stade juvénile. Ces éléments ne sont donc pas isolés et permettent de compléter une fonctionnalité écologique reconnue pour des ouvrages tels que les épis en enrochements. Par ailleurs, certaines espèces de substrats meubles ou de zones d'écotone comme la daurade, le pageot ou encore le rouget ont été observées au niveau des Eco-lests 3D. Des pontes de seiches (et de calmar) ont également été identifiées en période estivale. Ces espèces semblent aussi bénéficier de l'apport des Eco-lests 3D.

Les résultats du démonstrateur du lot 2 permettent ainsi en 2025 de proposer une nouvelle solution de lests éco-conçus adaptée au balisage de la zone côtière opérationnelle pour la commune de Valras-Plage, répliquable en Région Occitanie pour l'amélioration de l'efficacité écologique des lests d'ancienne génération.

Au regard des résultats encourageants, le groupement conseille de continuer d'étudier sous l'angle technique et écologique l'évolution des Eco-lests 3D et de la dynamique d'ensablement (notamment en période hivernale lorsque les sédiments sont démobilisés après les tempêtes) jusqu'en février 2027, date de fin de la concession accordée. Il pourra être étudié à cette occasion, la faisabilité technique et économique d'une opération visant à repositionner les 8 Eco-lests 3D soit sur le même chenal (désensablement et éventuel repositionnement des ancrages), soit sur un nouveau site de la collectivité dont la bathymétrie est identifiée comme plus stable et non soumis à une dynamique d'accrétion du sédiment.

## 4. LOT 3 – ETUDE DES POPULATIONS DE SUBSTRATS MEUBLES EN MILIEU URBAIN

Le suivi des populations de substrats meubles et l'évaluation de l'effet des récifs artificiels visent à approfondir les connaissances sur les fonctions écologiques des biocénoses côtières sableuses et sur le rôle potentiel des récifs dans la protection des zones sableuses.

L'objectif principal est d'étudier la fonction de nurserie dans les petits fonds côtiers sableux de Valras-Plage, depuis la côte jusqu'à 20 m de profondeur, tout en analysant le bénéfice potentiel des ouvrages artificiels existants (digues, Eco-lest, récifs). Compte tenu de la variabilité de la visibilité dans cette zone et du comportement cryptique des juvéniles sableux, les plongées scientifiques ont été complétées par des pêches expérimentales via une senne adaptée à la pêche côtière, tirée depuis la plage.

Deux plages "alvéolaires" (S1 et S3, à proximité des Eco-lests) et une plage "sans épis sur au moins 100 m" (S2) ont été échantillonnées (Figure 59), les plages S1 et S2 sont situées dans le prolongement des concessions de récifs artificiels du Lot 1.

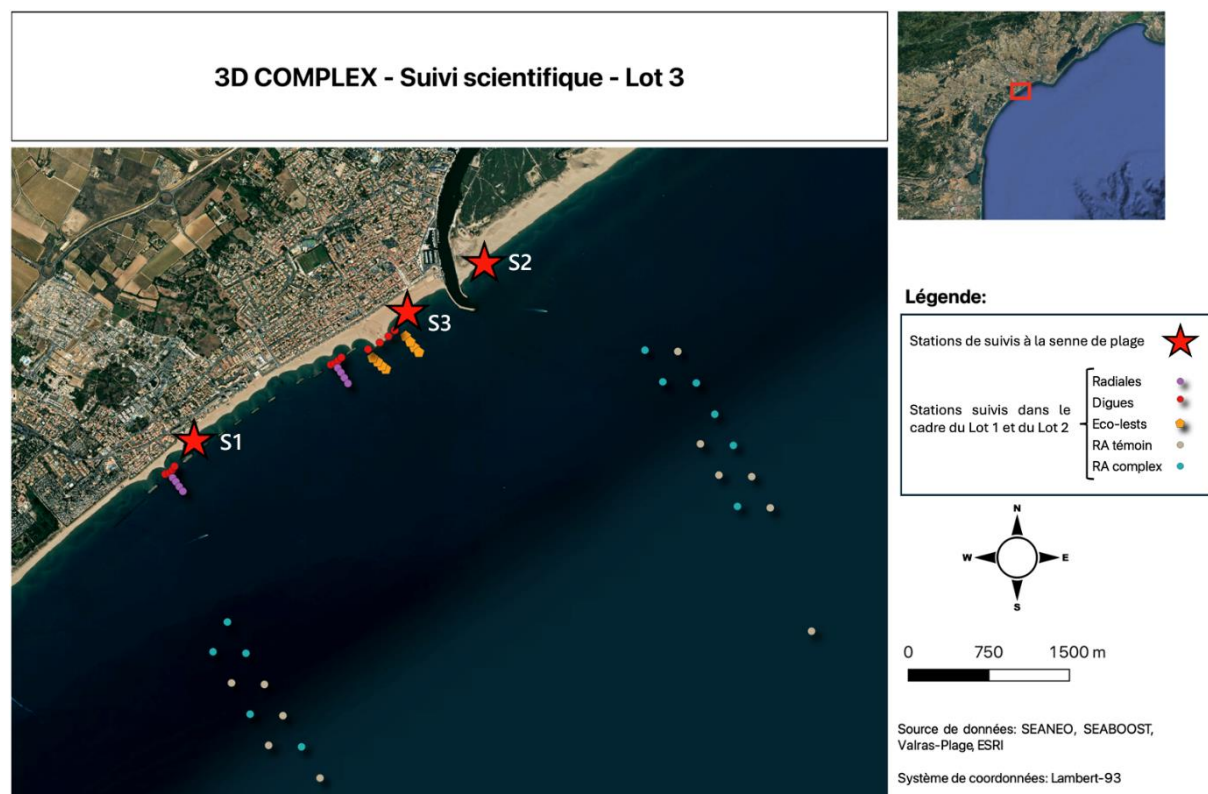


Figure 59 : Cartographie des sites étudiés dans le cadre du Lot 3

### 4.1 MÉTHODOLOGIE

L'échantillonnage a été réalisé à l'aide d'une senne de 30 m de long, déployée depuis la plage à la fin de l'été, sur une profondeur allant de -1,5 m jusqu'à la côte.

Quatre campagnes ont été réalisées : en fin d'été 2021, 2022, 2023 et 2024. Ces périodes visent à cibler les groupes d'âge 1 (G1) et d'âge 0 (G0) des juvéniles de l'année, qui deviennent capturables une fois atteinte une taille suffisante pour le maillage de la senne (Delaunay et Brind'Amour, 2018).

Ces travaux sont complémentaires avec les analyses réalisées dans le cadre du Lot 1 et du Lot 2. Ils visent à mieux comprendre les interactions entre les substrats meubles et les récifs artificiels tout en évaluant leur efficacité en tant qu'habitats pour les espèces juvéniles et adultes des zones sableuses.

#### 4.1.1 Pêche

Dans chacune des trois zones étudiées (Figure 59), 3 coups de pêche expérimentale sont réalisés à l'aide d'une senne de plage, de maille 7 mm. Ces opérations se déroulent tôt le matin et en fin de journée, afin de bénéficier de conditions optimales qui maximisent la capturabilité des espèces cibles. Les campagnes de pêche ont lieu chaque année à la fin de l'été, entre la fin du mois d'août et la fin du mois de septembre, période correspondant à la présence maximale des juvéniles des groupes d'âge ciblés.

Le protocole de pêche à la senne de plage nécessite la coordination de trois opérateurs. Deux d'entre eux se positionnent aux extrémités de la senne, tandis que le troisième est chargé de maintenir le sac de la senne en position ouverte tout au long de l'opération (Figure 60).

L'objectif est de décrire un arc de cercle avec la senne en retournant lentement vers la plage, afin de garantir que le cordage inférieur, plombé, reste en contact constant avec le fond. Cette précaution est essentielle pour éviter que les captures ne s'échappent sous la senne. Parallèlement, il est nécessaire de veiller à ce que le sac conserve une ouverture optimale durant toute la manœuvre, assurant ainsi une efficacité maximale du dispositif.

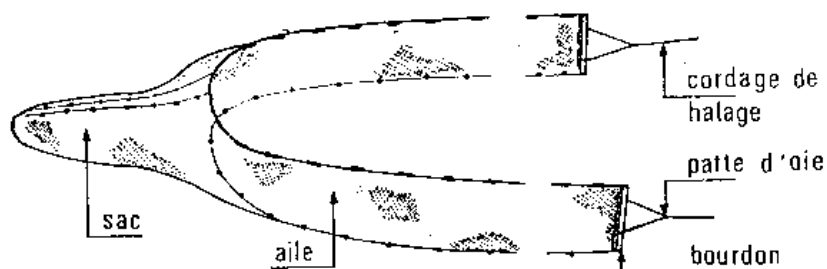
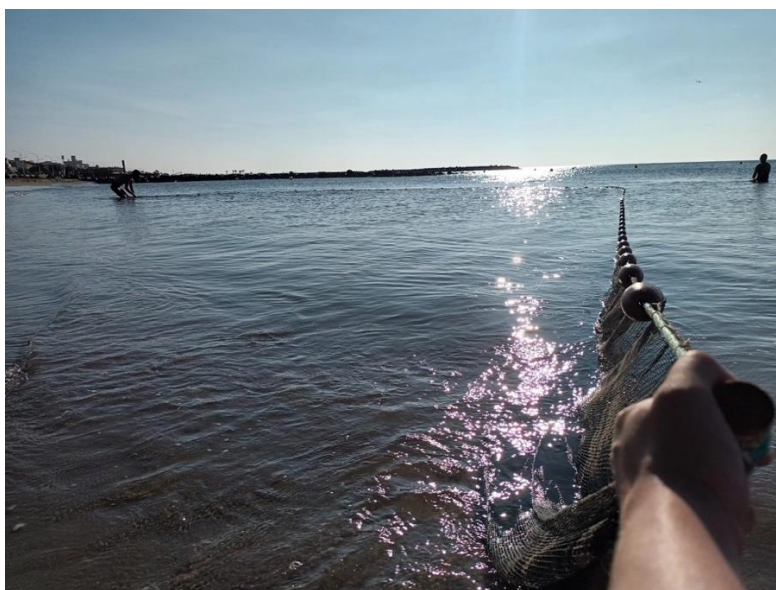


Figure 60 : Image d'une pêche à la senne lors de la campagne 2024 et schéma de l'engin de pêche (FAO)

### 4.1.2 Tri et biométrie

Après chaque coup de pêche, les individus capturés sont triés et placés dans des bacs de petites tailles où l'eau de mer est régulièrement renouvelée ou en circulation continue, garantissant leur maintien en conditions optimales. Pendant ce temps, un second ingénieur identifie chaque individu et effectue les mesures biométriques, tandis qu'un troisième membre de l'équipe consigne les résultats sur des plaquettes immergeables.

Les individus sont mesurés individuellement pour leur longueur et leur poids. En cas de forte abondance d'une espèce (plus de 30 individus), un sous-échantillonnage représentatif de 30 spécimens par espèce est effectué, en veillant à refléter les tailles observées sur l'ensemble du trait. Les individus surnuméraires sont uniquement comptés et pesés collectivement, réduisant ainsi le temps de manipulation tout en conservant des données fiables et pertinentes.

Ce traitement est réalisé le plus rapidement possible dans des conditions de stabulations adaptées afin que les individus soient relâchés vivants dans le milieu après les mesures.

## 4.2 RESULTATS

### 4.2.1 Abondance, richesse spécifique et biomasse

Au total 36 opérations de pêches ont eu lieu durant les 4 années de suivi (Tableau 29). Parmi ces 36 opérations 12 ont été infructueuses. Pour chaque opération, le nombre d'individu moyen est de 23 ( $\pm 95,3$ ), la richesse spécifique moyenne est de 1 ( $\pm 0,8$ ) et la biomasse moyenne est de 130 g ( $\pm 558$ ). Globalement on constate que les captures sont faibles pour chaque opération de pêche avec une grande hétérogénéité des données récoltées, le nombre d'individu capturé est compris entre 0 et 562 (médiane = 1), la richesse spécifique est comprise entre 0 et 2 et la biomasse totale est comprise entre 0 et 3,36 kg (médiane = 11,2 g).

33% des opérations sont infructueuses et 83% des opérations n'ont pas permis de capturer plus de 5 individus. Le faible nombre de données ne permet donc pas de conclure sur de potentielles différences significatives entre les années et les 3 plages échantillonnées.

Tableau 29 : Récapitulatif de l'abondance, de la richesse spécifique et de la biomasse pour chacun des coups de pêche à la senne de plage, de 2021 à 2024

	Site	N° du réplikat	Nombre d'individus	Richesse spécifique	Biomasse totale (en g)
2021	1	1	2	2	16
		2	0	0	0
		3	0	0	0
	2	1	1	1	210
		2	4	2	325
		3	1	1	1
	3	1	2	1	31
		2	1	1	59,5
		3	0	0	0
2022	1	1	3	1	36
		2	0	0	0
		3	0	0	0
	2	1	6	2	26
		2	4	2	73
		3	1	1	2
	3	1	2	2	12,5
		2	0	0	0
		3	0	0	0
2023	1	1	20	2	250
		2	562	2	104
		3	3	1	11
	2	1	1	1	1
		2	2	2	11,5
		3	1	1	2
	3	1	79	2	3360
		2	0	0	0
		3	1	1	17
2024	1	1	120	1	30
		2	7	2	60
		3	2	2	25
	2	1	0	0	0
		2	0	0	0
		3	0	0	0
	3	1	1	1	1
		2	0	0	0
		3	2	2	12
Moyenne (± ET)			23 (± 95,3)	1 (± 0,8)	130 g (± 558)
TOTAL			828 individus	11 espèces	4,7 kg

Pour les différents sites échantillonnés, la richesse spécifique moyenne reste très faible (< 2 espèces en moyenne) (Figure 61). Comme décrit précédemment il n'est pas possible de conclure sur de potentielles tendances entre les années et les 3 plages échantillonnées.

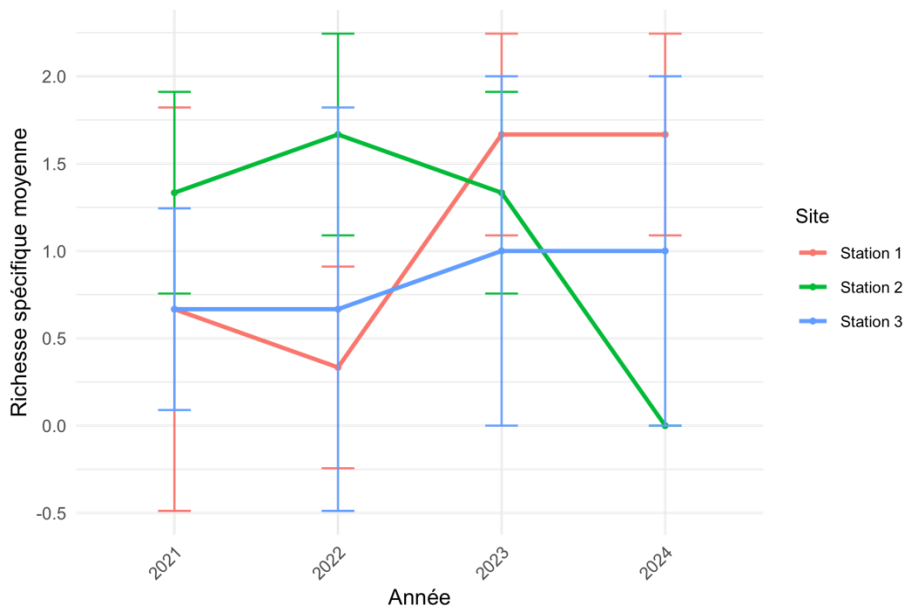


Figure 61 : Évolution de la richesse spécifique moyenne par site

#### 4.2.2 Fréquence d'occurrence des espèces

Un total de 828 individus, répartis en 11 espèces, a été capturé le long des plages de sable à partir du bord.

Au niveau de la station 1, plage alvéolaire la plus à l'Ouest, les espèces les plus communes sont le sar commun, l'athérine et la palomine (appelée aussi la liche), avec des fréquences autour de 25-30% (Figure 62).

Sur la station 2, au niveau de la plage sans épi, les espèces dominantes sont l'orphie, l'athérine et la palomine, atteignant 30-40%.

Enfin, pour la station 3, plage alvéolaire à proximité des Eco-lests, le sar commun et le mullet doré présentent les fréquences les plus élevées, autour de 20-25%.

Certaines espèces comme le sar commun et l'athérine montrent une relative stabilité sur les trois stations, sans qu'il n'y ait pour autant de pattern clairement défini. D'autres espèces comme l'orphie et la dorade royale présentent plus de variabilité.

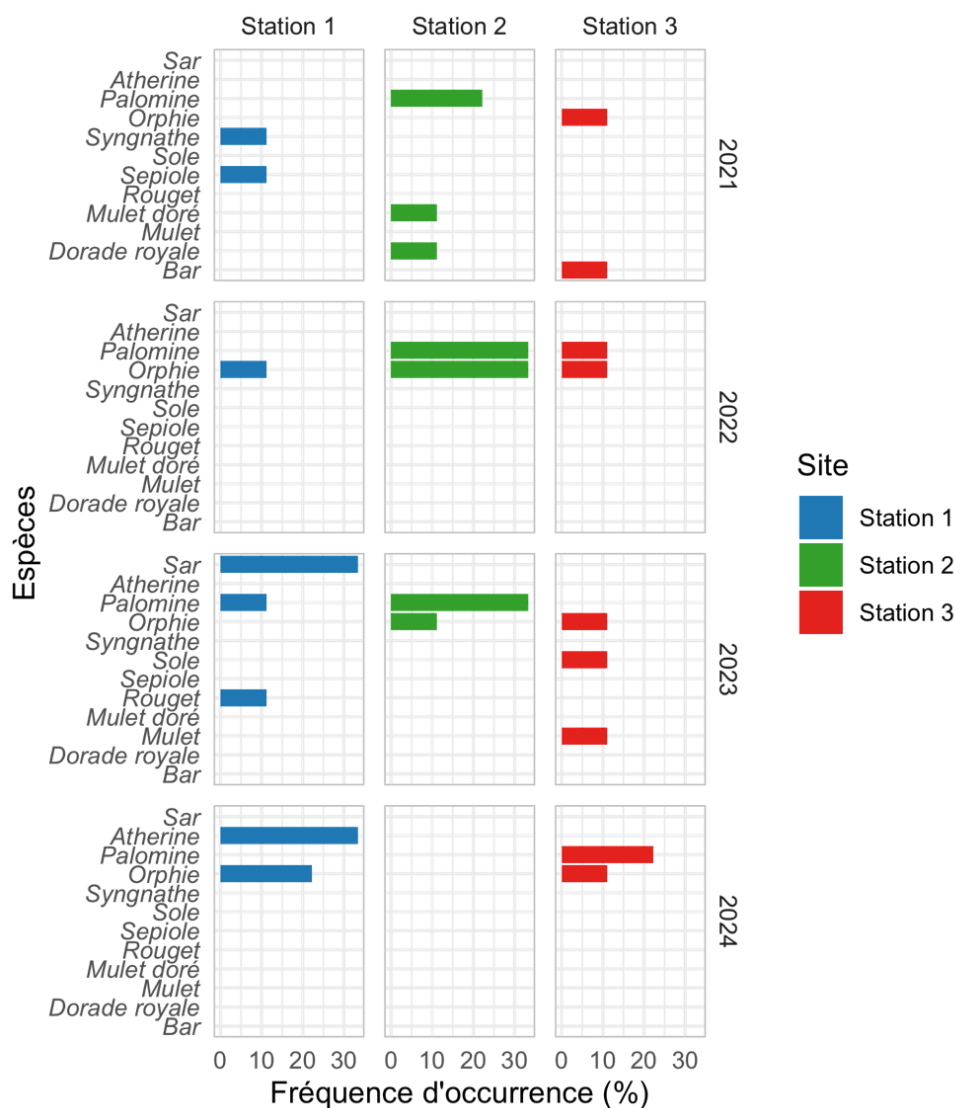


Figure 62 : Fréquence d'occurrence des différentes espèces selon la station et l'année

### 4.2.3 Abondances des classes de taille

Les individus de tailles moyenne et petite sont largement dominant pour tous les sites et toutes les années (Figure 63). Les moyennes des proportions sont respectivement de 64% pour les petits individus, 33% pour les individus de taille moyenne et 4% pour les grands individus.

La station 3 (plage alvéolaire à proximité des Eco-lest) semble présenter davantage de petits individus, et la station 2 (plage naturelle au droit des récifs artificiels) présente la plus grande proportion d'individus de taille moyenne et de grande taille. La station 1 (plage alvéolaire, dans l'axe des récifs artificiels) présente une proportion équivalente d'individus de tailles moyenne et petite.

Il n'est pas possible de tirer des conclusions sur d'éventuelles différences significatives entre les stations et les années au vu du peu de données obtenues.

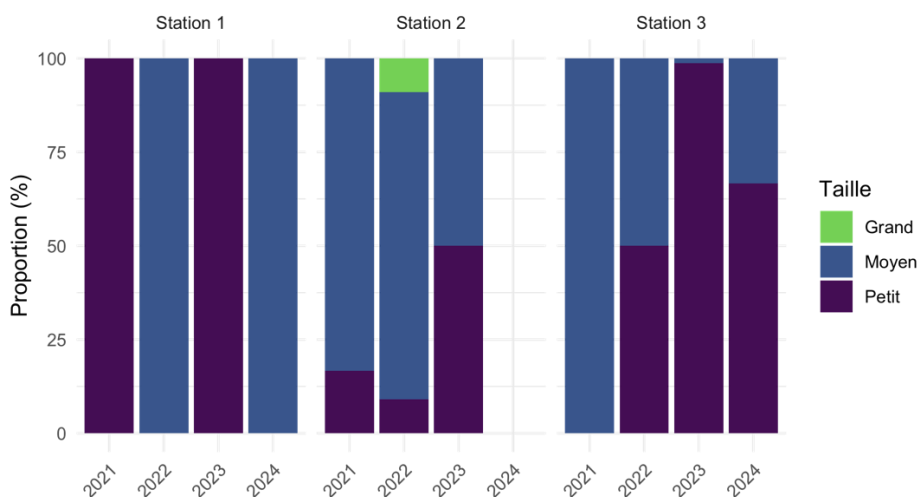


Figure 63 : Abondance des différentes classes de tailles selon l'année

Pour autant il est important de noter l'importante proportion de stade juvénile dans les zones de substrats meubles ultra côtières et urbanisées. Notons que le cas sur le sar commun, dont l'habitat de nurserie, ne semble pas se limiter uniquement aux enrochements et autres ouvrages de substrat dur artificiel mais également aux zones sableuses avoisinantes qu'elles protègent (tant d'un point de vue hydrodynamique que physique par l'absence de pêche). D'autres espèces habituellement moins étudiées semblent également bénéficier de la bande littorale sableuse au stade juvénile. C'est notamment le cas de la palomine (*Trachinotus ovatus*). Cette espèce de Carangidae qui peut atteindre une taille maximale de 70cm et des profondeurs de 200 m représente 70% des captures réalisées (n= 576) lors des pêches expérimentales.

Si les occurrences d'espèces plus spécifiquement inféodées aux nurseries de substrat meuble sont plus faibles, notons tout de même la capture de rougets barbets mesurant entre 64 et 73mm, d'une sole (*Solea* sp.) de 40mm, ou encore d'une jeune daurade royale de 118mm. Ces occurrences confirment *a minima* l'intérêt de ces zones sous étudiées dans l'accomplissement du cycle de vie de ces espèces.

### 4.3 BILAN ET AXES D'AMELIORATIONS

**36 opérations de pêches expérimentales à la senne de plage ont été réalisées pendant 4 années entre 2021 et 2024 sur 3 plages de la commune de Valras-Plage. Le protocole mis en œuvre n'a pas permis d'observer de différences entre les stations qui pourraient être directement liées à leur situation (présence d'enrochements artificiels, distance à l'embouchure de l'Orb, présence de récifs artificiels de protection contre le chalutage au large...).**

**Un total de 828 individus répartis en 11 espèces a été capturés le long des plages de sable à partir du bord, dont 81% étaient des stades juvéniles (n=671). Les occurrences d'espèces plus spécifiquement inféodées aux nurseries de substrat meuble (ex : poissons plats) sont globalement faibles mais pour autant des juvéniles de sole et de rougets barbets ont été observés. L'étude nous apprend que certaines espèces comme la palomine (*Trachinotus ovatus*) peut être retrouvée en grand nombre au stade juvénile (70% des captures réalisées) dans ces zones sableuses. Des sars communs (*Diplodus sargus*) de 43 à 72mm, connus pour plutôt privilégier les nurseries de substrats durs, ont également été observés durant l'étude.**

**Les techniques de suivi mise en œuvre dans le cadre du lot 3 confirment l'intérêt écologique des petits fonds sableux urbanisés et sous étudiés pour l'accomplissement du cycle de vie de différentes espèces de poissons aux écologies pourtant très différentes, tant pour des espèces strictement benthiques, necto-benthique comme le sar ou encore pélagique comme la palomine.**

**Au regard des résultats obtenus, le groupement conseille de continuer à étudier la fonctionnalité écologique et de nourricerie des petits fonds sableux urbanisés, notamment au sein des plages alvéolaires, que ce soit sur le territoire de Valras-Plage ou sur d'autres sites concernés en Région Occitanie. Les prochains suivis pourront faire appel à des sennes de plage permettant de capturer idéalement des individus les plus petits possibles (<30mm) et potentiellement ensablés la journée (plombage maximal). La mise en place de protocoles de suivi de nuit paraît également intéressante, que ce soit en pêche ou en plongée.**

# BIBLIOGRAPHIE

Bauchot M.L. et Pras A., 1980. Guide des poissons marins d'Europe. Delachaux & Niestlé, éd., Lausanne : 1-427.

Bolker B.M., 2008. Ecological models and data in R. Princeton University Press.

Bouche G., Lepage B., Migeot V., Ingrand P., 2009. Intérêt de la détection et de la prise en compte d'une surdispersion dans un modèle de Poisson : illustration à partir d'un exemple, Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique, Volume 57, Issue 4, 2009, Pages 285-296,

Cépralmar, Région Languedoc-Roussillon, 2015. Guide pratique d'aide à l'élaboration, l'exploitation et la gestion des récifs artificiels en Languedoc-Roussillon. 236 pages.

Charbonnel E, Serre C, Ruitton S, Harmelin J-G, Jensen A, 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

Collart D. et Charbonnel E., 1998. Impact des récifs artificiels de Marseillan et d'Agde sur le milieu marin et la pêche professionnelle-Bilan du suivi 1996/1997. Contrat Conseil Régional Languedoc- Roussillon et Conseil Général de l'Hérault. CEGEL et GIS Posidonie, France, 168 pp.

Dalias N., Fabre E., Blouet S., Foulquié M., Chéré E., Soulat N., Scourzic T., 2018. Suivi scientifique des récifs artificiels de Valras-Plage. Mairie de Valras-Plage & SEANEO. SEANEO publ. Fr. : 118 pages.

Delaunay, D., & Brind'Amour, A., 2018. Manuel des protocoles de campagne halieutique. Campagnes « Nourriceries ».

Fischer W., Schneider M., Bauchot M.L., 1987. Fiches FAO d'identification des espèces pour les besoins de la pêche. Méditerranée et Mer Noire, zone de pêche 37, Vol. I et II. FAO / CEE / ONUAA, Projet CGP / INT / 422 / EEC : 1-1527.

Gibbons R.D., Hedeker D., DuToit S., 2010. Advances in analysis of longitudinal data. Annual review of clinical psychology, 6, 79-107.

Koeck B, 2012. Rôle des récifs artificiels dans l'écologie des poissons : Application aux récifs artificiels de Leucate-Barcarès (Golfe du Lion, Mer Méditerranée). Thèse Ecologie marine, Université de Perpignan, perpignan, 299 pp

Shannon C.E. et Weaver W., 1949. The Mathematical Theory of Communication.

Whitehead P.J.P, Bauchot M.L., Hureau J.C., Nielsen J., Tortonese E., 1986. Fishes of the North-eastern Atlantic and the Mediterranean. UNESCO, Paris. Vols. I, II and III : 1-173.

# ANNEXES

## Annexe 1 : Abondance et richesse spécifique par récif

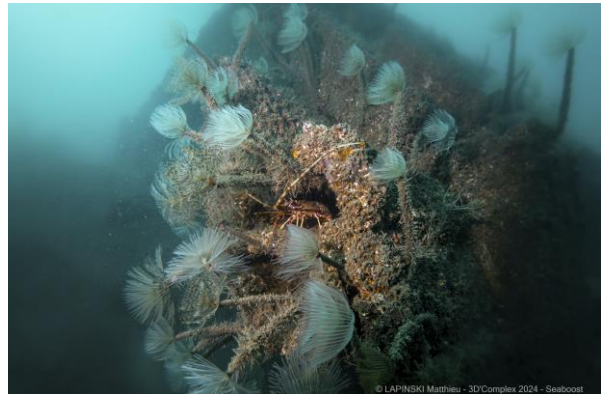
Code	Abondance			Richesse spécifique		
	2021	2023	2024	2021	2023	2024
Z1T13	31	2030	507	4	11	4
Z1T14	260	1062	509	7	6	5
Z1T15	1216	1104	1016	4	11	10
Z1T16	2023	602	1114	5	13	8
Z1T20		113			8	
Z1T211		117	211		7	7
Z1T22	2008		1031	8		11
Z1T23	57	561	39	7	5	6
Z1T24	3105	1105	1131	8	8	16
Z1T25	90	522	174	6	5	8
Z1T26	610	1233	267	7	9	9
Z1T27	510	1052	268	7	6	12
Z1T28	218	2013	19	8	8	5
Z2T10			16			6
Z2T12	15	1582	546	8	14	10
Z2T13	75	1175	739	7	15	12
Z2T14	211	390	199	6	11	8
Z2T15	46	666	260	8	7	7
Z2T16	412	660	108	10	4	5
Z2T21	7	533		4	9	
Z2T22	255	3	63	7	3	5
Z2T23	30	153	407	4	6	5
Z2T24	55	62	308	3	8	8
Z2T26	1035	17	5	9	5	2
Z2T27	17	1051	470	8	17	10
Z2T29	17	142	47	8	7	5

Annexe 2 : Indices de biodiversité par récifs entre 2021 et 2024

Code	Catégorie	Année	Richesse spécifique	Indice de Shannon	Indice de Pielou	Indice de Simpson
Z1T13	Complexifié	2021	4	0,66	0,48	0,33
Z1T13	Complexifié	2023	11	1,12	0,47	0,64
Z1T13	Complexifié	2024	4	0,09	0,06	0,03
Z1T14	Témoin	2021	7	1,23	0,63	0,67
Z1T14	Témoin	2023	6	0,91	0,51	0,55
Z1T14	Témoin	2024	5	0,11	0,07	0,03
Z1T15	Complexifié	2021	4	0,52	0,37	0,30
Z1T15	Complexifié	2023	11	1,07	0,45	0,59
Z1T15	Complexifié	2024	9	0,11	0,05	0,03
Z1T16	Complexifié	2021	5	0,75	0,47	0,51
Z1T16	Complexifié	2023	13	0,65	0,25	0,30
Z1T16	Complexifié	2024	8	1,01	0,48	0,59
Z1T20	Complexifié	2023	8	1,51	0,72	0,72
Z1T211	Témoin	2023	7	1,17	0,60	0,63
Z1T211	Témoin	2024	7	0,80	0,41	0,44
Z1T22	Complexifié	2021	8	0,72	0,35	0,50
Z1T22	Complexifié	2024	11	0,86	0,36	0,53
Z1T23	Témoin	2021	7	0,59	0,30	0,23
Z1T23	Témoin	2023	5	0,47	0,29	0,20
Z1T23	Témoin	2024	6	0,84	0,47	0,39
Z1T24	Complexifié	2021	8	1,22	0,59	0,69
Z1T24	Complexifié	2023	8	0,45	0,22	0,18
Z1T24	Complexifié	2024	16	0,48	0,17	0,21
Z1T25	Témoin	2021	6	1,19	0,66	0,60
Z1T25	Témoin	2023	5	0,22	0,13	0,08
Z1T25	Témoin	2024	8	0,97	0,47	0,54
Z1T26	Témoin	2021	7	0,55	0,28	0,30
Z1T26	Témoin	2023	9	0,70	0,32	0,33
Z1T26	Témoin	2024	9	0,82	0,37	0,40
Z1T27	Complexifié	2021	7	0,79	0,40	0,50
Z1T27	Complexifié	2023	6	0,25	0,14	0,10
Z1T27	Complexifié	2024	12	0,85	0,34	0,41
Z1T28	Témoin	2021	8	1,03	0,50	0,58
Z1T28	Témoin	2023	7	0,05	0,03	0,01
Z1T28	Témoin	2024	5	1,50	0,93	0,76
Z2T10	Complexifié	2024	6	1,44	0,80	0,69
Z2T12	Complexifié	2021	8	1,77	0,85	0,77
Z2T12	Complexifié	2023	14	0,85	0,32	0,50
Z2T12	Complexifié	2024	10	0,44	0,19	0,16
Z2T13	Complexifié	2021	7	1,35	0,70	0,71
Z2T13	Complexifié	2023	15	0,62	0,23	0,27
Z2T13	Complexifié	2024	12	0,88	0,35	0,47
Z2T14	Complexifié	2021	6	0,81	0,45	0,44
Z2T14	Complexifié	2023	11	1,27	0,53	0,64
Z2T14	Complexifié	2024	8	0,63	0,30	0,26
Z2T15	Témoin	2021	8	1,81	0,87	0,80
Z2T15	Témoin	2023	7	0,62	0,32	0,30
Z2T15	Témoin	2024	7	0,86	0,44	0,52
Z2T16	Témoin	2021	10	1,13	0,49	0,62
Z2T16	Témoin	2023	4	0,78	0,56	0,40
Z2T16	Témoin	2024	5	0,36	0,22	0,14
Z2T21	Complexifié	2021	4	1,28	0,92	0,69

Z2T21	Complexifié	2023	9	0,34	0,15	0,12
Z2T22	Témoin	2021	7	1,16	0,59	0,65
Z2T22	Témoin	2023	3	1,10	1,00	0,67
Z2T22	Témoin	2024	5	0,67	0,42	0,34
Z2T23	Témoin	2021	4	0,63	0,45	0,30
Z2T23	Témoin	2023	6	0,85	0,47	0,49
Z2T23	Témoin	2024	5	0,78	0,49	0,52
Z2T24	Complexifié	2021	3	0,37	0,33	0,17
Z2T24	Complexifié	2023	8	1,03	0,49	0,45
Z2T24	Complexifié	2024	8	0,17	0,08	0,05
Z2T26	Témoin	2021	9	0,20	0,09	0,07
Z2T26	Témoin	2023	5	1,20	0,75	0,60
Z2T26	Témoin	2024	2	0,50	0,72	0,32
Z2T27	Complexifié	2021	8	1,84	0,89	0,80
Z2T27	Complexifié	2023	17	1,22	0,43	0,64
Z2T27	Complexifié	2024	10	1,31	0,57	0,69
Z2T29	Témoin	2021	8	1,79	0,86	0,79
Z2T29	Témoin	2023	7	0,88	0,45	0,46
Z2T29	Témoin	2024	5	1,05	0,65	0,54

# PORTFOLIO







**SEABOOST** 

The logo for SEABOOST consists of the word "SEABOOST" in a bold, blue, sans-serif font. To the right of the text is a stylized icon of a blue wave or splash.

 **SEANEO**

The logo for SEANEO features a stylized icon on the left composed of three overlapping, rounded shapes in shades of blue and teal. To the right of the icon, the word "SEANEO" is written in a bold, sans-serif font, with "SEA" in blue and "NEO" in orange.