

Rapport de stage

4^{ème} année

Stage éco-conception - simulation mécanique

Lineup Ocean
Halle de l'innovation,
10, place Françoise
Héritier, 34 000 Montpellier



Tuteur entreprise :
Robin ALAUZE
Président, Fondateur et Chef de Projets R&D

Aurore BROSSERON
DAE - IMA
2023-2024

Tuteur académique :
Vincent ROTGE

Table des matières

Remerciement	1
1 Introduction.....	1
2 L'entreprise.....	1
3 Les modules	2
4 Présentation de la mission	3
4.1 Organisation.....	3
4.2 Approche 3D	4
5 État de l'art	4
5.1 Contexte et enjeux.....	4
5.2 Dynamique sédimentaire.....	5
5.3 Mécanique des fluides	8
5.4 Aspects biologiques	13
5.5 Solutions Lineup Ocean.....	14
6 Site d'étude	15
6.1 Le golfe du Lion	15
6.2 Le projet à Palavas-les-Flots.....	16
7 Problématiques et hypothèses.....	17
8 Matériels et méthodes	18
9 Protocole	20
9.1 Étude de variation de la structure	20
9.2 Étude de variation des conditions	23
10 Résultats	25
10.1 Résultats de l'étude de variation de la structure.....	25
10.1.1 Étude d'un module unitaire	25
10.1.2 Étude d'un module assemblé.....	26
10.1.3 Étude d'un module d'ancrage	27
10.2 Résultats de l'étude de variation des conditions.....	29
11 Discussion	31
12 Conclusion	31
13 Retour d'expérience	31
13.1 Perspective d'amélioration	31
13.2 Bilan personnel	32
14 Annexes	33
15 Bibliographie	37
15.1 Entreprise.....	37
15.2 Dynamique sédimentaire.....	37

15.3	Mécanique des fluides	38
15.4	Biologie.....	38
15.5	Gestion du Golfe du Lion	39

Table des figures

Figure 1 - LineHouse® à Nausicaá.....	3
Figure 2 - UpBlock® à l'inauguration dans les locaux de 3DConcrete	3
Figure 3 - Planning du projet	4
Figure 4 - a. Schémas du système morphodynamique de plage ; b. Représentation spatio-temporelle des principaux modes de variabilité des plages sableuses d'après P.J.Cowell and al. (1995), modifié par B.Castelle et G.Masselink (2022)	5
Figure 5 - Les principaux processus naturels de la dynamique littorale, d'après C.Choblet (2005)	6
Figure 6 - Ouvrages de défense contre la mer et facteurs d'érosion, d'après C.Choblet (2005)	6
Figure 7 - a. Profil transversal type de la morphologie d'une plage à barre, modifié d'après F.Ottmann (1965) et R.Certain (2002) ; b. Profil transversal type de la dynamique hydrosédimentaire d'une plage à barre, modifié d'après P.J.Cowell and al. (1999) et A.Dehouck (2006)	7
Figure 8 - Déplacement de la houle à proximité du rivage	8
Figure 9 - Classification des ondes selon le type forçage, d'après W.H.Munk (1951)	9
Figure 10 - Paramètres caractérisant une houle, d'après I.Y.A.Isin (2007)	9
Figure 11 - Champ des vitesses selon la profondeur, d'après I.Y.A.Isin (2007)	10
Figure 12 - Forces agissant sur une unité récifale (Y.P.Sheng, 2000).....	11
Figure 13 - Développement d'une couche limite sur une plaque plane pour différents régimes d'écoulements, d'après l'Université de Delaware.....	12
Figure 14 - Variabilité du coefficient de trainée en fonction du nombre de Reynolds, d'après B.Munson, D.Young and T.Okiishi (1998).....	12
Figure 15 - Évolution théorique du peuplement d'un récif artificiel après sa mise en place, d'après A.Fourrier and al. (2015)	13
Figure 16 - Graphe des interactions du système UpBlock®	14
Figure 17 - a. Caractères généraux du golfe du Lion : sens du transport sédimentaire ; b. Typologie des systèmes de barres d'avant côte dans le golfe du Lion (les barres ne sont pas représentées à l'échelle), d'après la DREAL (2020).....	15
Figure 18 - Principe du dispositif de suivi WaveCams® développé par Waves'N See, d'après Wave'N See (2023, Comm. Pers.)	16
Figure 19 - a. Schéma simplifié de l'évolution topographique en saison calme ; b. Schéma simplifié de l'évolution topographique en saison énergétique, d'après Waves'N See (2023 Comm. Pers.).....	16
Figure 20 - Déploiement prévu du projet Surfrees, d'après Lineup Ocean (2021, Comm. Pers.)	17
Figure 21 - Comparaison de la dynamique de la plage avec et sans Eco-Lagon, ancien nom du projet Surfrees, d'après Lineup Ocean (2021, Comm. Pers.)	17
Figure 22 - Photos des deux UpBlocks® à l'inauguration dans les locaux de 3DConcrete.....	18
Figure 23 - Etude de simulation possible dans Fusion Autodesk 2.0	18
Figure 24 - Onglet de modification de la matière dans Fusion Autodesk 2.0	19
Figure 25 - Bilan des forces sur un récif artificiel, modifié d'après Y.P.Sheng (2000)	19
Figure 26 - Gradient en 3 parties de la structure de l'UpBlock®	20
Figure 27 - Données d'entrées pour des conditions paroxysmales	21
Figure 28 - Modélisation du UpBlock® selon les 3 cas	21
Figure 29 - Orientation du UpBlock®	21
Figure 30 - Placement d'immobilisation du UpBlock® pour le cas 1.....	22
Figure 31 - Modules assemblés linéairement	22

Figure 32 - Zoom sur l'impression 3D.....	22
Figure 33 - Placement d'immobilisation du UpBlock® pour le cas 2.....	23
Figure 34 - Placement d'immobilisation du UpBlock® pour le cas 3.....	23
Figure 35 - Représentation schématiques des conditions étudiées	24
Figure 36 - Données d'entrée pour des conditions minimales	24
Figure 37 - Données d'entrée pour des conditions moyennes	24
Figure 38 - Données d'entrée pour des conditions maximales.....	24
Figure 39 - Présentation des résultats de l'étude pour le cas 1	25
Figure 40 - Présentation des résultats de facteur de sécurité et de déplacement pour le cas 2.....	26
Figure 41 - Présentation des résultats de la déformation, de la force de réaction et de la pression de contact pour le cas 2	27
Figure 42 - Présentation des résultats de facteur de sécurité et de déplacement pour le cas 3.....	28
Figure 43 - Présentation des résultats de la déformation, de la force de réaction et de la pression de contact pour le cas 3	28
Figure 44 - Présentation des résultats de cisaillement pour le cas 3.....	28
Figure 45 - Représentations graphiques des résultats de l'étude de variation des conditions	30

Table des tableaux

Tableau 1 - Données de conditionnement de la houle pour les trois types de conditions étudiées....	24
Tableau 2 - Résultats pour des conditions minimales.....	29
Tableau 3 - Résultats pour des conditions moyennes.....	29
Tableau 4 - Résultats pour des conditions maximales	29
Tableau 5 - Résultats pour des conditions paroxysmales	29

Table des annexes

Annexe 1 - Exemple de l'évolution de coefficient de trainée, ici nommée Cx, selon la forme du solide, d'après B.Munson, D.Young and T.Okiishi (1998)	33
Annexe 2 - Carte du Languedoc en 1692, par Nolin (L.C.H.F, 1984), d'après R.Certain (2002)	33
Annexe 3 - Différentiel bathymétrique de 1984 à 2009 à l'Espiguette, d'après C.Brunel and al. (2012)	34
Annexe 4 - Différentiel bathymétrique de 1984 à 2009 à Palavas-les-Flots, d'après C.Brunel and al. (2012)	34
Annexe 5 - Exemple de résultats de suivi avec les WaveCams®	35
Annexe 6 - Risque de submersion de la côte de Palavas-les-Flots, d'après Lineup Ocean (2021).....	35
Annexe 7 - Zonage réglementaire de la zone de Palavas-les-Flots, d'après Lineup Ocean (2021)	36
Annexe 8 - ZNIEFF de la zone de Palavas-les-Flots, d'après Lineup Ocean (2021).....	36

Abréviations et Glossaire

Ministère EFSIN : Ministère de l'Économie des Finances et de la Souveraineté Industrielle et Numérique

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du climat

BIC : Business & Innovation Center

FP : Fonction Principale

FC : Fonction Contrainte

ZNIEFF : Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique
CFD : Computational fluid dynamics
STL : Standard Triangle Language, ou Standard Tessellation Language

Eustasie : Variation lente du niveau des océans et des mers due aux modifications d'origine tectonique ou climatique.

Marnage : Différence de hauteur d'eau entre une pleine mer et une basse mer successives.

Estran : Partie du littoral périodiquement recouverte par la marée.

Dérive littorale : Déplacement le long d'un littoral de matières déposées par les vagues, le vent et/ou les courants longitudinaux. Il se distingue du mouvement dans le profil, déplacement transversal assimilé au courant de marée.

Accrétion : Processus d'agglomération d'éléments inorganiques, solides ou fluides.

Lessivage : Phénomène d'entraînement par l'eau de substances fixées sur des particules fines à travers les sols.

Cellule sédimentaire : Portion du littoral ayant un fonctionnement sédimentaire relativement autonome par rapport aux portions voisines. Ses limites sont, soit des ouvrages maritimes, soit des obstacles naturels (caps, embouchures, ...) importants qui bloquent ou modifient le déplacement du sable sous l'action des houles et de la dérive littorale.

Brise-lames : Ouvrage élevé à l'entrée d'une rade ou d'un port pour les protéger contre la houle du large.

Epis : Ouvrage perpendiculaire, ramification latérale.

Glacis : Rampe sédimentaire, faiblement inclinée, formant le raccord entre la base de la pente continentale (ou insulaire) jusqu'aux régions abyssales.

Démaigrissement : Abaissement du niveau d'une plage ou d'une dune pré littorale par ablation de son matériel sédimentaire.

Dune pré littorale : Aussi appelée barre pré littorale, est une agglomération de sédiments en forme de dune sous-marine intertidale se situant entre le glacis et le trait de côte.

Feston : Guirlande suspendue en forme d'arc.

Grandeur et unité SI

Pression p : Pa

Force F : N

Vitesse u : m/s

Accélération g : m/s²

Masse m : kg

Masse volumique, densité ρ : kg/m³

Viscosité cinématique ν : m²/s

Dimensions : hauteur h , longueur L , diamètre $\varnothing$: m

Surface S : m²

Coefficient C : sans unité

Nombre de Reynolds Re : sans unité

Nombre de Froude Fr : sans unité

Remerciement

Pour commencer, j'aimerais remercier chaleureusement M. Robin ALAUZE, mon tuteur et fondateur de la start-up, ainsi que Loïs BAROTIN, Emilie EVEQUE et Mathieu SOULAYROL, pour leur accompagnement et partage d'expériences. Mais aussi mes collègues stagiaires pour nos échanges et leur bonne humeur.

J'aimerais remercier les partenaires 3DConcrete et Ingérop, notamment Abdelhakim L. HOCINE et Sébastien PAILLY pour les richesses de nos discussions.

Enfin, je voudrais remercier Mme Vincent ROTGÉ, mon tuteur pédagogique, pour son aide pendant cette période de stage.

1 Introduction

À l'occasion de mon stage de quatrième année à Polytech Tours, j'ai eu l'opportunité d'intégrer l'équipe de Lineup Ocean, société située à Montpellier, sous la tutelle de M. ALAUZE Robin. J'ai pu obtenir ce stage de douze semaines, commencé mi-avril 2024 et achevé mi-juillet 2024, par le biais de mon réseau de contacts à la suite de mon stage chez XtreeE en 2022.

Lineup Ocean a été créée pour répondre à la demande d'aménagements éco-responsables de lutte contre l'érosion côtière. Ce stage s'inscrit dans une démarche d'éco-conception des structures conçues par Lineup Ocean. L'équipe est en recherche constante de réduction de matière première et d'énergie de production des structures sans impacter considérablement la rigidité de celles-ci dans le temps.

Ma mission était d'étudier les efforts mécaniques induits par les conditions maritimes sur ces structures et d'évaluer les zones à risque dans la conception. Cette étude des contraintes mécaniques permettra aussi de concevoir le système d'ancrage des structures ainsi que d'évaluer la durabilité dans le temps de la structure face aux contraintes des efforts en mer. Les livrables pour l'entreprise sont :

- un protocole méthodologique de simulation,
- une présentation des résultats pour les équipes d'Ingérop qui vont travailler en collaboration avec Lineup Ocean sur le sujet de l'ancrage des structures,
- un tableau de paramètres d'entrée d'efforts mécaniques pour de futures études.

Ce rapport décrit les connaissances acquises à la suite d'un état de l'art poussé, aux tenants et aboutissants du projet d'étude des efforts mécaniques et au livrable en sortie, ainsi qu'une perspective personnelle sur cette expérience de stage en start-up.

2 L'entreprise

Située à Montpellier, Lineup Ocean est une société à mission depuis 2019. Sa mission est *d'accompagner et de préparer les collectivités littorales et leurs populations à la résilience côtière*.

Ce statut de société à mission, introduit par la loi Pacte (Ministère EFSIN, 2022), permet à une entreprise d'affirmer publiquement sa raison d'être, ainsi qu'un ou plusieurs objectifs sociaux et environnementaux qu'elle se donne pour objectif de poursuivre dans le cadre de son activité. Cette mission, inscrite dans les statuts de l'entreprise, est vérifiée par un organisme tiers indépendant, s'assurant que les objectifs décrits sont en cohérence avec les actions entreprises par la dite société à mission.

Le GIEC (2018) définit *la résilience des communautés* comme la capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux à faire face à une évolution, à une perturbation ou à un événement dangereux, permettant à ceux-ci d'y répondre ou de se réorganiser de façon à conserver leur fonction, leur identité et leur structure fondamentales tout en gardant leurs capacités d'adaptation, d'apprentissage et de transformation.

La *résilience côtière* peut alors être définie comme la capacité des sociétés humaines et des écosystèmes marins à se relever et à s'adapter aux impacts du dérèglement climatique, des aléas naturels et des pressions anthropiques sur les littoraux (Lineup Ocean, 2024). L'objectif de Lineup Ocean avec cet engagement est de révolutionner l'industrie maritime des petits fonds côtiers en proposant de nouveaux types d'ouvrages de protection côtière, écologiques et durables. Lineup Ocean conçoit et développe des solutions innovantes, bio-inspirées, utiles à la protection des biens et des personnes, à la réhabilitation et à la restauration des écosystèmes marins et au développement d'activités éco-responsables tributaires des écosystèmes et des vagues (plongée, snorkeling, surf, paddle...). Avec une gestion des projets, du diagnostic de terrain jusqu'aux suivis après installations, Lineup Ocean propose des solutions complètes spécifiques à chaque milieu. Innovations protégées, ces solutions accompagnent un changement de paradigme dans un contexte majeur d'évolution climatique et sociétale en mettant l'ingénierie écologique au cœur de l'aménagement durable des littoraux. Ces solutions sont des modules cavitaires alvéolés, imprimés en 3D à grande échelle à partir de matériaux biogènes et biosourcés (Lineup Ocean, 2024). Ces modules sont destinés à diminuer l'énergie de la houle et ainsi l'érosion des sites d'études, mais aussi dans un second temps à être colonisés par la vie marine. Ces solutions sont destinées à être perméables et réversibles, en alliant modularité, adaptabilité, porosité, transparence environnementale et performances multifonctionnelles. Elles sont à l'opposé des ouvrages classiques d'enrochement opaques (digues, épis, brise-lames, ...) sans valeur ajoutée pour la vie marine. Bien que l'activité principale de l'entreprise soit concentrée en Méditerranée, elle ambitionne de développer des projets à l'échelle mondiale afin d'aider un maximum de collectivités.

L'atout majeur de Lineup Ocean au sein de l'industrie de la protection côtière avec ses modules biomimétiques est avant tout l'étude approfondie des enjeux de l'érosion côtière, à multi-échelle, spécifiques à chaque site envisagé, avec une étude préliminaire au déploiement étendue sur trois ans, qui permet d'avoir une solution spécifique et adaptée à la dynamique océanographique et sédimentaire du terrain considéré.

Aujourd'hui, les locaux de l'entreprise sont installés dans la Halle de l'innovation. Depuis le printemps 2023, la Halle de l'innovation propose un lieu à la fois d'hébergement des entreprises en création et en développement et aussi des espaces de collaboration, de démonstration et de rencontres. Ce lieu a émergé d'une croissance de partenaires autour du BIC de Montpellier (Montpellier3m, 2023). Le Business & Innovation Centre (BIC) est un service de la Direction du Développement Économique et de l'Emploi de Montpellier Méditerranée Métropole ; son but est d'accompagner et de financer des projets de création d'entreprises innovantes. La Halle de l'innovation a ainsi permis une facilitation dans l'accompagnement des premières années de vie de diverses startups.

3 Les modules

Les différents modules conçus par Lineup Ocean ont pour but de protéger les côtes, de réduire l'érosion côtière, et de servir d'habitat pour la vie marine comme les récifs coraliens et les mangroves. Il est courant dans la littérature de retrouver le terme *récif artificiel* pour des conceptions similaires. Ce terme peut se retrouver avec plusieurs définitions différentes selon les objectifs de l'immersion des structures (A.Gerard et E.Thouard, 2008). Ici les différents modules selon leurs objectifs peuvent être nommés *récif artificiel* ou *dispositif de défense du littoral*. Deux projets phares de Lineup Ocean sont aujourd'hui en phase de test en immersion, à l'échelle 1:1.

LineHouse® (Fig. 1) : Ce module est conçu pour abriter la faune de la côte méditerranéenne dans ses cavités de tailles et de formes différentes.

Installés à Nausicaá, dans le Blue Living Lab, deux modules LineHouse® sont suivis afin de mieux comprendre les comportements des poissons face à cette nouvelle structure intégrée dans leur environnement. Le bassin étant contrôlé tous les jours, ce test en lieu fermé permet de concentrer les résultats sur la conception morphologique du module en lien avec son intérêt réel ou non pour la faune. Bien que le bassin de Nausicaá abrite principalement des espèces tropicales, une

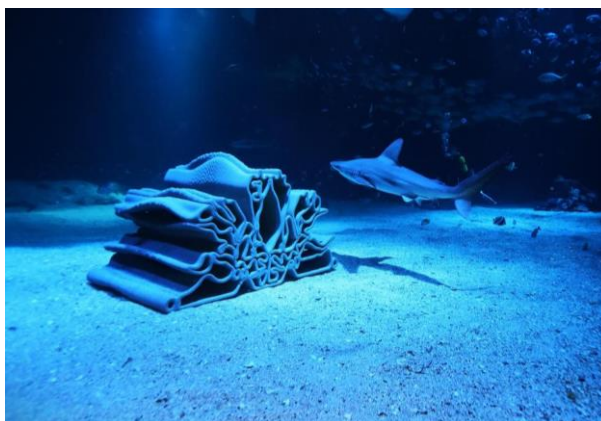


Figure 1 - LineHouse® à Nausicaá

analogie par famille est possible entre certaines espèces du bassin et des espèces de la côte méditerranéenne, comme les mérous (*Epinephelus*), les raies (*Raja*), les soles (*Solea*), les gobies (*Gobius*), les murènes (*Enchelycore* ou *Gymnothorax*) ou bien encore les rascasses (*Scorpaena*) (E.Eveque, Lineup Ocean, comm. pers.).

UpBlock® (Fig. 2) : Ce module est conçu pour être utilisé en assemblages les uns avec les autres. Le but étant, en étudiant des positionnements spécifiques à chaque site d'installation, de permettre de dissiper les houles destructrices et ainsi de diminuer l'érosion côtière. L'objectif n'étant pas de réduire l'énergie à 100%, mais de restaurer la dynamique sédimentaire et les barres sableuses qui protègent naturellement les plages. Sa structure spécifique et poreuse a été conçue pour ne pas entraver le transport sédimentaire.



Figure 2 - UpBlock® à l'inauguration dans les locaux de 3DConcrete

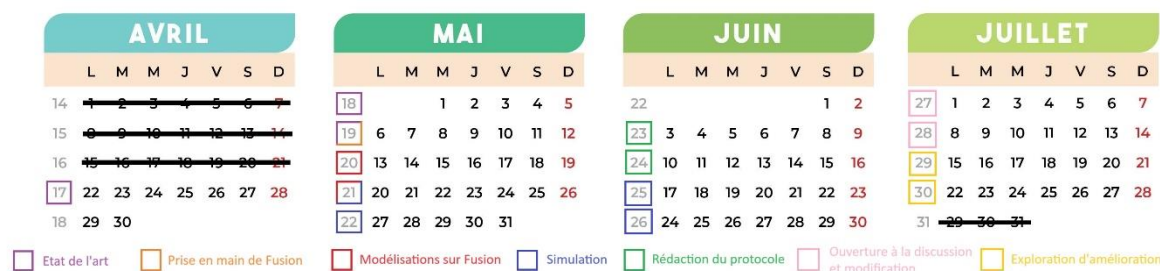
L'UpBlock® est le module principal de l'activité de Lineup Ocean. Des tests en canal à houle à SeaTech ont permis d'évaluer le taux de dissipation de ce module pouvant aller jusqu'à 40%. Une immersion in situ d'une maquette à taille réelle en plastique recyclé a permis de tester le projet en 2022 pour identifier les points à améliorer. Inaugurée en juin 2024, une version finale industrialisable a été imprimée en béton bas-carbone. Avec le projet SurfReef, le plan d'action enclenché depuis plus de trois ans avec l'étude préliminaire de terrain est de déployer ce projet au large de Palavas-les-flots d'ici à l'hiver 2024.

4 Présentation de la mission

4.1 Organisation

Le principal objectif de ce stage porte sur un projet de conception d'une méthodologie de simulation. Cette méthodologie servira pour la caractérisation par modèle 3D des contraintes mécaniques appliquées aux modules UpBlock®. Le livrable est un protocole de simulation décrivant la méthode pour simuler les efforts mécanique sur un module. Le test de ce protocole permettra d'obtenir des données chiffrées de forçage pour plusieurs types de conditions océanographiques. Ces données serviront pour des études futures de conception du système d'ancrage des structures ainsi que d'évaluation de la durabilité dans le temps de la structure face aux contraintes des efforts en mer.

L'étude du projet s'est faite en différentes étapes décrites dans le temps avec la figure 3.



4.2 Approche 3D

L'étude s'est basée sur une approche 3D pour avoir des estimations théoriques des points de fragilité. L'étude en expérimentation ne peut pas être réalisée en canal à houle pour des contraintes d'échelle et de puissance de vagues. Le logiciel Autodesk Fusion 2.0® est utilisé pour ces simulations numériques.

5 État de l'art

5.1 Contexte et enjeux

Le changement climatique, et la montée du niveau de la mer qui y est corrélée, impliquent l'inondation, et la submersion à terme, de nombreuses côtes, plages et villes côtières ainsi qu'infrastructures de transport en bord de mer ou d'océan. Ces lieux sont de plus en plus concernés par la prise en compte de ce changement dans leurs stratégies d'aménagements futurs. Les ouvrages de protection côtière d'aujourd'hui sont d'ores et déjà à risque de débordement, les rendant inefficaces avec le temps. Ces ouvrages peuvent aussi avoir un impact négatif sur les côtes adjacentes, allant alors contre l'objectif initial d'installation de ces ouvrages. La détérioration de l'état des littoraux par ces submersions est importante. E.C.F.Bird (1985) a montré que 70 % des rivages dans le monde sont soumis à l'érosion. Cette tendance mondiale a pour conséquence directe de menacer les infrastructures proches de la côte. De nombreuses solutions sont envisagées pour éviter les submersions : relèvement des ouvrages existants, éloignement des villes, création ou restauration de zones naturelles inondables, etc. L'abandon des terres à la mer ou leur protection sont les deux alternatives les plus probables. La stratégie retenue sera certainement mixte, consistant à protéger les secteurs d'intérêt économique pour l'Homme et laissant libre cours à la mer dans les secteurs non encore anthropisés.

En s'intéressant plus spécifiquement à la dynamique littorale et au phénomène d'engraissement ou de démaigrissement, il est possible de déterminer le transport sédimentaire selon les houles et courants. En étudiant ce phénomène hydrosédimentaire des plages et en s'inspirant de milieux naturels existant dans le monde, comme les coraux et les mangroves, avoir un impact connu sur les effets de houles et de courants peut permettre de réduire l'érosion des plages et ainsi de mieux se préparer à la résilience côtière. Dans ce but, les récifs artificiels comme systèmes atténuateurs de houle sont aujourd'hui une solution étudiée très sérieusement par de nombreux instituts dans le monde.

En France, beaucoup de projets de récifs artificiels ont été lancés depuis les années 1969, carcasses de voitures, modulaires en béton coulé, structures en bois, systèmes ingénieux brevetés... Leur objectif a plus souvent été de créer des zones d'accroissements de biomasse piscicole. Leurs efficacités et durabilités sont uniques à chacune des solutions et donc réévaluées à chaque

déploiement. De nombreux projets, par manque de financement, n'ont pas eu des suivis post-immersion adéquats, or depuis 2000, les protocoles de suivis et subventions nécessaires sont obligatoires pour une durée minimum de cinq ans.

Néanmoins, ces nombreux déploiements de récifs artificiels ont permis d'avoir une vision théorique de l'efficacité de ces structures pour atténuer la houle et pour créer des zones d'habitat type rocheux pour la biodiversité. Ces projets ont aussi permis de tester l'utilisation de différents matériaux en mer ; un consensus semble se former pour l'utilisation de bois, de béton ou de nouveaux bétons biogènes qui permettraient une meilleure colonisation de la structure par le biofilm, les espèces ingénieuses et les algues (B.Vivier and al., 2021). Le béton permettrait aussi d'avoir une structure durable et résistante aux courants de tempêtes.

Avec une étude approfondie des dynamiques littorales et de l'impact d'une structure type récif artificiel, des systèmes atténuateurs de houle multifonctionnels peuvent permettre de rétablir le transport sédimentaire dégradé par les ouvrages de défense imperméables tels que les brises lames et épis. En effet, aujourd'hui, un déficit de sédiment sableux est expliqué par l'impact des barrages sur le transport sédimentaire en fleuve ainsi que des ouvrages sur les côtes littorales et leur impact sur la dérive littorale ainsi que la montée des eaux.

5.2 Dynamique sédimentaire

Pour comprendre comment des récifs artificiels peuvent rétablir la dynamique sédimentaire, il faut en premier lieu comprendre la dynamique littorale naturelle et quels impacts ont eu les ouvrages de défense imperméables sur cette dynamique.

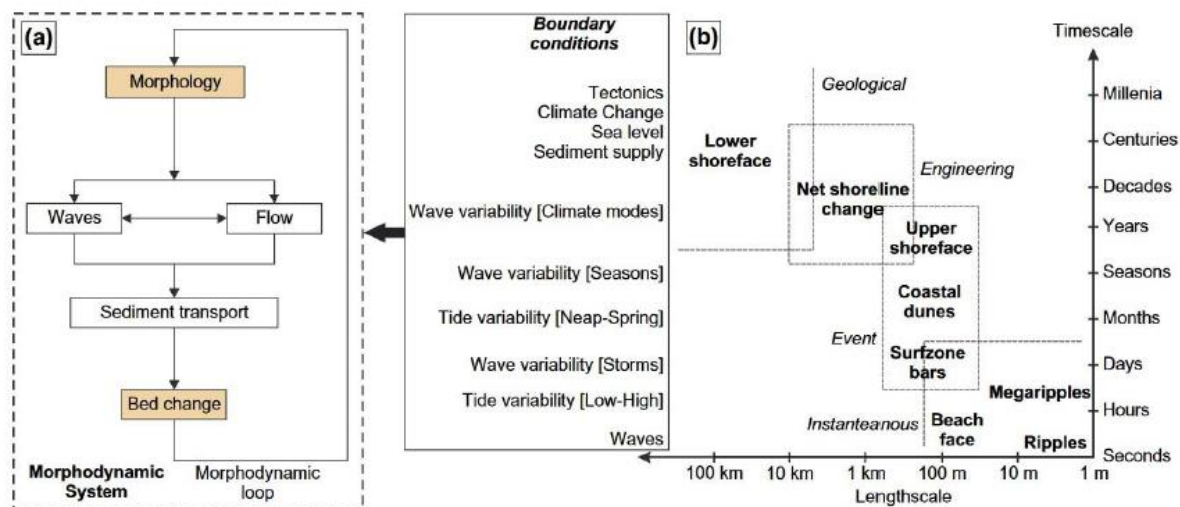


Figure 4 - a. Schémas du système morphodynamique de plage ; b. Représentation spatio-temporelle des principaux modes de variabilité des plages sableuses d'après P.J.Cowell and al. (1995), modifié par B.Castelle et G.Masselink (2022)

Les milieux littoraux varient à différentes échelles spatiales et temporelles, rendant compte d'une grande diversité de milieux à travers le monde. D'après P.J.Cowell and al. (1995) ces variations peuvent être groupées en 4 catégories (Fig. 4b) :

- La dynamique du bassin, d'un niveau géologique,
- Un changement d'ensemble des niveaux des mers, nommé « eustasie »,
- Les conditions événementielles, dépendant du volume sédimentaire provenant du transport des fleuves ou disponibles sur place,
- Les conditions instantanées, selon le forçage de l'atmosphère sur le milieu.

Le système morphodynamique des plages est guidé par trois paramètres : la topographie, l'hydrodynamisme et le transport sédimentaire (Fig. 4a). La morphologie topographique et

l'hydrodynamisme avec la houle et les courants s'influencent mutuellement avec le transport sédimentaire. Ce phénomène d'influences entre la topographie et l'hydrodynamisme est non linéaire. C'est-à-dire que le coefficient qui unit la relation entre les deux critères est variable (Philips, 1992). L'évolution du milieu dépend du forçage hydrodynamique et de l'état antérieur du système.

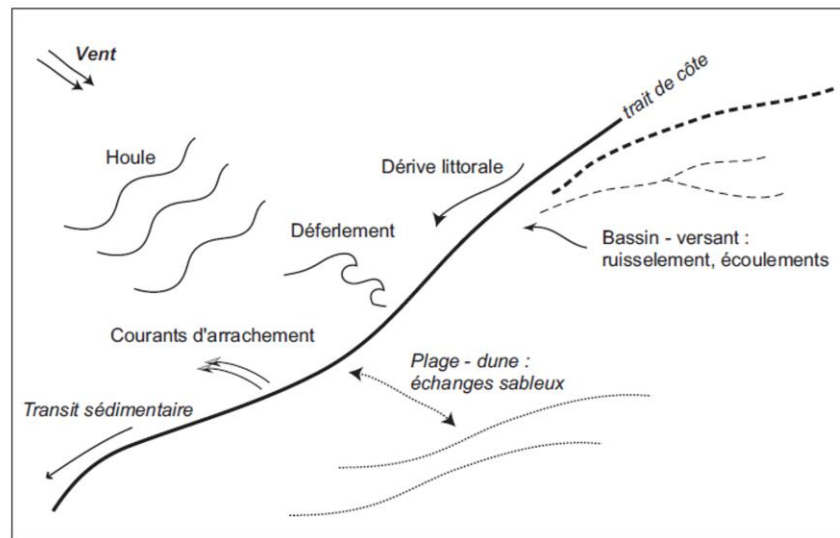


Figure 5 - Les principaux processus naturels de la dynamique littorale, d'après C.Choblet (2005)

L'apport sédimentaire principal pour les plages provient des fleuves qui apportent les sédiments de l'érosion des surfaces continentales. La redistribution des sédiments des estuaires et deltas aux côtes littorales est générée par le vent entre les dunes et l'estran et par les courants marins, la houle et la dérive littorale (Fig. 5). Les apports naturels sont essentiels pour le maintien des plages qui sont des milieux en perpétuelle évolution.

À une échelle locale, les facteurs d'une érosion des plages peuvent être :

- La saison, avec des phénomènes d'accrétion et de lessivage naturel selon les tempêtes,
- Les effets des estuaires, notamment le déficit sédimentaire dû aux barrages non régulés en cours d'eau
- La dynamique naturelle de la cellule hydro-sédimentaire : il peut exister des secteurs dunaires comme des secteurs à falaise,
- Les impacts des ouvrages et aménagements anthropiques, ces facteurs impactent le budget sédimentaire du milieu.

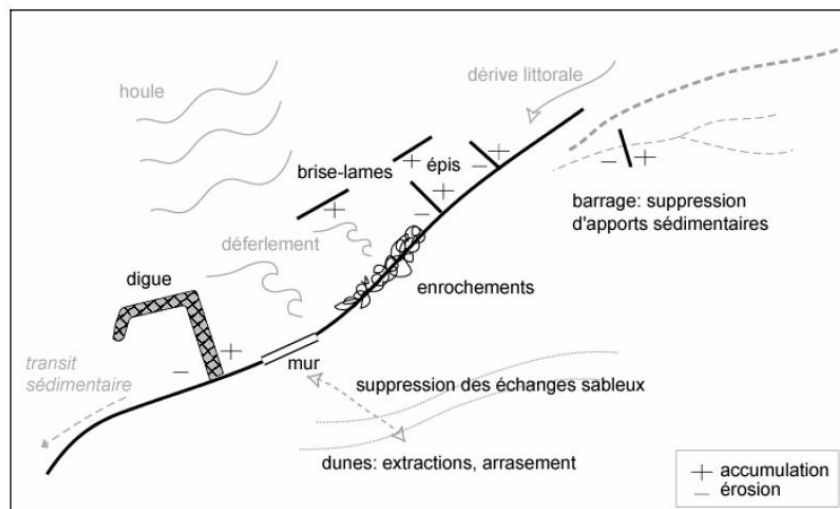


Figure 6 - Ouvrages de défense contre la mer et facteurs d'érosion, d'après C.Choblet (2005)

La limite entre terre et mer est en évolution constante, or l'Homme a cherché à figer ce milieu pour faciliter son utilisation. Mais entre la régularisation des fleuves, avec des barrages qui créent un déficit sédimentaire, l'urbanisation côtière et les ouvrages de défense, l'équilibre de la dynamique des plages est perturbé. Si localement et à court terme, les ouvrages de défense types épis et brise-lames semblent efficaces, à moyen et long termes ces ouvrages perturbent la dynamique sédimentaire, créent des cellules sédimentaires déficitaires en aval des ouvrages et peuvent aggraver l'érosion des plages en général (Fig. 6).

Pour les études en lien avec ce stage, l'intérêt se porte sur des plages du golfe du Lion en méditerranée. La méditerranée est une mer intérieure semi-fermée, autrement dit un environnement microtidal. C'est-à-dire que le marnage y est globalement inférieur à 2m. L'impact des marées sur le transport sédimentaire est donc faible.

Les plages sableuses microtidales sont des écosystèmes naturels dont la formation et l'équilibre dépendra plus de l'action de la houle sur le transport sédimentaire que du marnage. Ce sont des environnements idéaux pour le bon fonctionnement d'un déploiement d'un système atténuateur de houle.

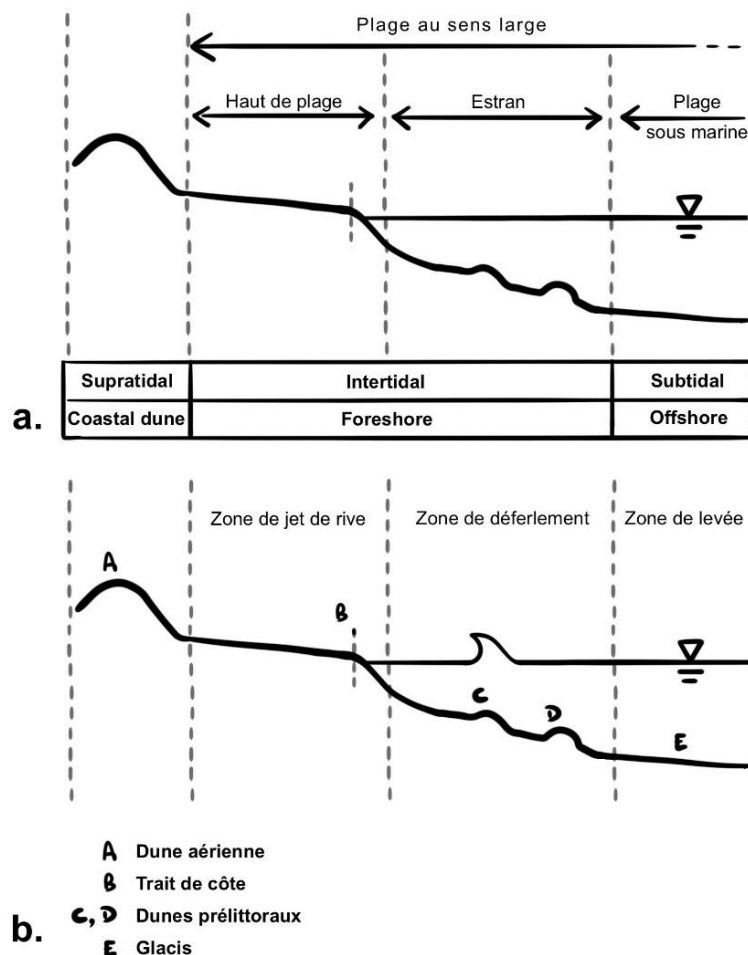


Figure 7 - a. Profil transversal type de la morphologie d'une plage à barre, modifié d'après F.Ottmann (1965) et R.Certain (2002) ; b. Profil transversal type de la dynamique hydrosédimentaire d'une plage à barre, modifié d'après P.J.Cowell and al. (1999) et A.Dehouck (2006)

Au sens large, la plage est constituée du domaine intertidal (foreshore) avec le haut de plage et l'estran et du domaine subtidal (offshore) avec la plage sous-marine (Fig. 7a). Au niveau du domaine subtidal, la houle en provenance du large se propage sur un fond à pente faible, inférieur à 1% appelé glacis, ce fond n'influence pas la houle. C'est la zone de levée des vagues. Puis, dans le

domaine intertidal, la houle va déferler et se briser selon le fond qui impose une contrainte à l'onde de la houle à la surface. Cette contrainte induit la zone de déferlement (Fig. 7b). Dans cette zone se forment des morphologies architecturales complexes : les dunes prélittorales. Ils peuvent être rectilignes (parallèle au rivage), en feston ou obliques dans des environnements particuliers. À l'échelle d'une plage, la dune aérienne et les dunes prélittorales sont des systèmes réduisant naturellement la montée de la mer et les inondations des côtes. Les actions de la houle vont soit engraisser, soit démaigrir les plages. Les démaigrissements peuvent être profitables à une côte adjacente ou peuvent induire un transfert sédimentaire du domaine intertidal au domaine subtidal où ils ne pourront plus être remobilisés.

Avec l'implantation d'ouvrages de défenses, les dunes prélittorales se sont déformés ou ont reculé, parfois jusqu'à disparaître dans le glaci. Les modules UpBlock® de Lineup Ocean ont pour objectif d'atténuer la houle comme les ouvrages de défenses (brise-lames, épis) mais, en étant poreux, le système permettrait de réduire la houle jusqu'à 40% au lieu de 100% pour les ouvrages de défenses classiques imperméables. Lineup Ocean ne cherche pas à stabiliser les plages comme était l'objectif d'installation de brise-lames et d'épis, mais à rétablir la dynamique sédimentaire. L'atténuation à 40% permet de garder une dynamique littorale et permet un transport sédimentaire libre à travers la structure. Ainsi, avec une implantation réfléchie des UpBlocks® selon la dérive littorale, la houle, les courants et les cellules sédimentaires existantes, il est envisagé de rétablir la continuité de la dynamique hydrosédimentaire et de rétablir les dunes prélittorales.

5.3 Mécanique des fluides

Les vagues, une forme d'ondes, sont une adaptation du milieu à une variation des conditions extérieures. Il y a un transport d'énergie associé à la vague, mais pas un transport de matière. Bien que les vagues puissent se déplacer sur une très longue distance, l'eau ne bouge pas. À l'intérieur de chaque vague, les particules d'eau se déplacent en un mouvement circulaire. La force des vagues qui s'écrasent sur un rivage peut modifier la forme du rivage, indépendamment de l'aspect géologique (roches ou sables). L'érosion et les dépôts remodelent considérablement le littoral. En fonction de la morphologie, la houle tente de se placer perpendiculairement au rivage, pour cela à l'approche de baie ou de caps, il y a une réfraction en convergence ou divergence dans la concentration d'énergie (Fig. 8).

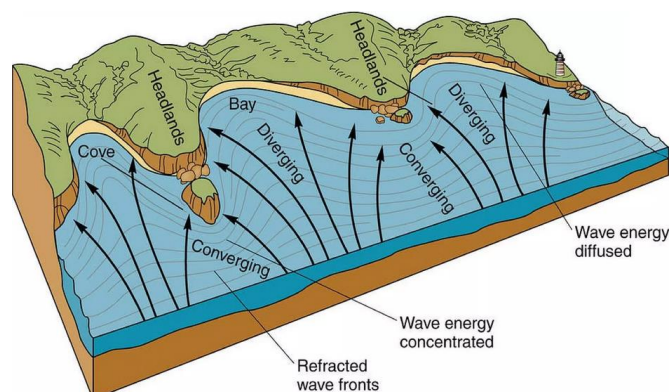


Figure 8 - Déplacement de la houle à proximité du rivage

Un fluide peut avoir différents mouvements ondulatoires. Les ondes dites de gravité peuvent être classifiées. D'après W.H.Munk (1951) (Fig. 9), dans la classification se retrouvent les marées induites par la position de la lune et du soleil, les tsunamis d'origine sismique ou volcanique et les ondes engendrées par le vent dont la houle. La plupart des vagues sont causés par le vent.

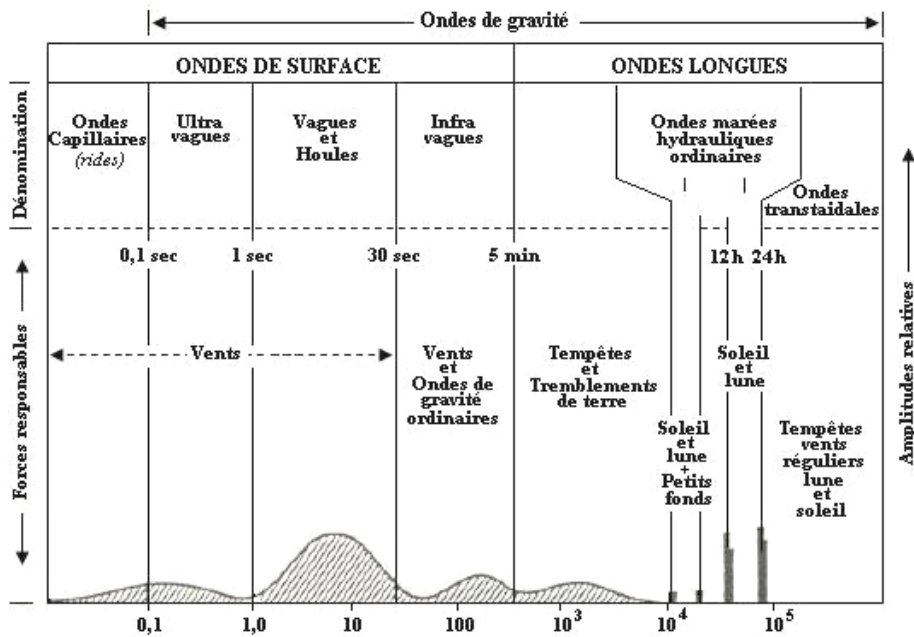


Figure 9 - Classification des ondes selon le type forçage, d'après W.H.Munk (1951)

La houle a une propagation pseudo périodique dans l'espace et dans le temps ; sont alors identifiables différents paramètres caractérisant la houle (Fig. 10) :

- L'amplitude a , égale à la mi-hauteur de la houle ;
- La hauteur significative de la houle H_s , égale à $2a$;
- La longueur d'onde L , distance horizontale entre deux crêtes ;
- La hauteur d'eau d , hauteur entre le fond et le niveau moyen NSM ;
- La hauteur total h , hauteur entre le fond et la crête de houle ;
- La période T , temps entre deux passages successifs du profil en crête ;
- La célérité c , la vitesse de propagation de la houle ;
- Le niveau au repos NSL, correspond au niveau de la mer calme ;
- Le niveau moyen NSM, est défini par la mi-distance entre un creux et une crête, il ne coïncide pas nécessairement avec le niveau au repos.

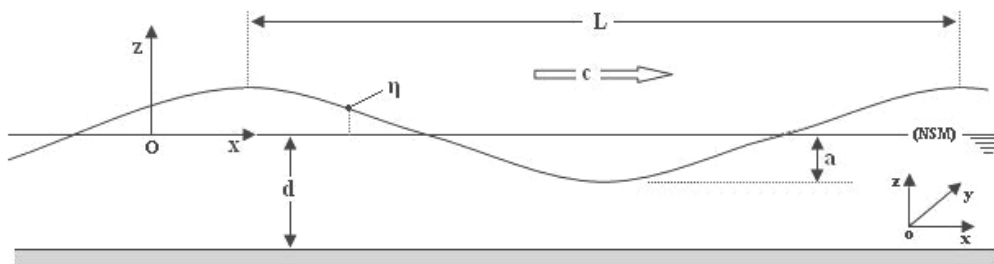


Figure 10 - Paramètres caractérisant une houle, d'après I.Y.A.Isin (2007)

Cependant, la houle est en réalité souvent chaotique et les sollicitations du domaine de propagation sont difficiles à caractériser. Ce sont donc des paramétrisations simplifiées qui sont couramment utilisées dans la littérature aujourd'hui pour caractériser la houle. D'après I.Y.A.Isin (2007), bien que l'eau de mer soit un fluide variable avec des paramètres discontinus (température, densité, salinité, pression, viscosité, etc.) il est possible de négliger certains éléments comme la viscosité qui n'a pratiquement pas d'influence sur le mouvement des vagues, il est aussi possible de considérer l'eau de mer comme un fluide parfait avec une densité fixe. Cela permet de simplifier les calculs de mouvement de la houle sans engendrer trop d'erreur de calculs. Les notions de profondeur exercent

une grande influence sur les comportements et caractéristiques des houles (Fig. 11). Ainsi, dans la littérature sur les houles les définitions suivantes sont de rigueur :

- Eau profonde si $d/L \geq 1/2$ ou si $kd < \pi$;
- Profondeur intermédiaire si $1/200 < d/L < 1/2$ ou si $1 < kd < \pi$;
- Profondeur faible si $d/L \leq 1/200$ ou si $kd > 1$.

Avec k calculé avec l'équation (1) et L calculé avec l'équation (2).

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (1)$$

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (2)$$

Les études pour ce stage sont majoritairement en eau peu profonde. Dans cette limite de faible amplitude, les équations de la mécanique des fluides admettent des solutions simples, de forme sinusoïdale, on parle alors de houle d'Airy. Il sera considéré que la vitesse de fond u_0 est alors égale aux vitesses dans la colonne d'eau u (Eq. 3), et la célérité peut être calculée avec l'équation (4).

$$u = \frac{a\sigma}{kd} \cos \theta = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos \theta \quad (3)$$

$$c = \sqrt{g \cdot d} \quad (4)$$

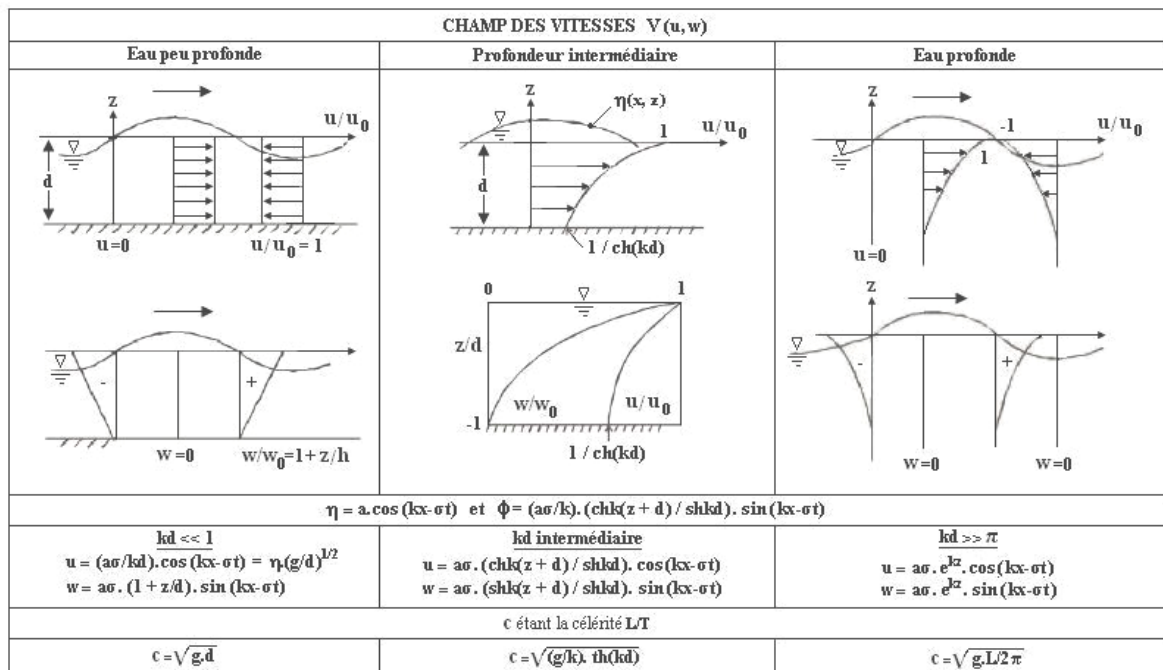


Figure 11 - Champ des vitesses selon la profondeur, d'après I.Y.A.Isin (2007)

À l'approche du rivage, la longueur d'onde diminue et la seule caractéristique de la houle qui semble rester constante est la période T , et pour les pentes de moins de 10%, la plage n'induit pas de houle réfléchi (I.Y.A.Isin, 2007).

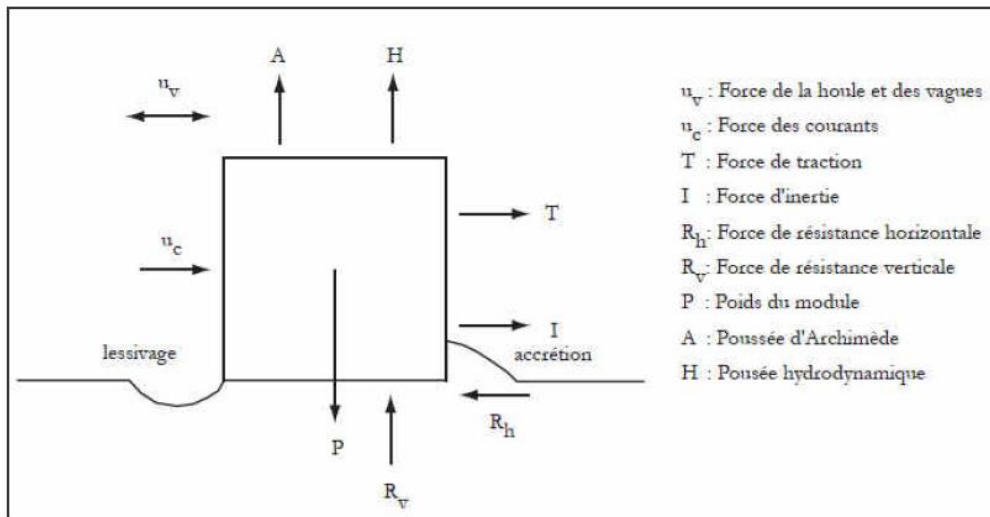


Figure 12 - Forces agissant sur une unité récifale (Y.P.Sheng, 2000)

Pour ce stage l'unité récifale est l'UpBlock®, c'est donc une forme cubique formée avec des cylindres, l'analyse de Y.P.Sheng (2000) est donc ajustable à l'analyse de cette étude. Le lessivage et l'accrétion pourraient avoir un impact sur les efforts appliqués à une unité, mais définir ces paramètres est complexe et nécessite une expérience terrain ou une analyse par CFD (Computational Fluid Dynamics). En effet, de nombreux paramètres vont modifier cette accrétion ou lessivage comme montré par l'étude de M.Yang and al. (2022) : une forme plus ou moins poreuse ou une différence d'orientation face au courant peuvent modifier drastiquement le transport sédimentaire en pied de structure. Ces différences de topographie dues aux transports sédimentaires sont à garder à l'esprit, mais ne seront pas considérées dans les calculs de cette étude.

Caractérisation des forces agissant sur une unité récifale :

La poussée d'Archimède (Eq. 3), où tout corps plongé dans un fluide subit une poussée verticale, appliquée à son centre de gravité. Cette force est appelée poussée d'Archimède, l'intensité de cette force est égale à celle du poids du volume de fluide déplacé et s'oppose au poids de l'objet.

$$F_A = \rho g u \quad (5)$$

D'après Morison (1950) la force horizontale appliquée à un solide immergé est égale à la somme de la force de traction F_D (Eq. 7) et la force d'inertie F_I (Eq. 6).

$$F_I = \rho C_m V \dot{u} \quad (6)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A u |u| \quad (7)$$

Selon l'étude de T.I.Kim (1982) sur l'équation de Morison appliquée à un cylindre immergé, si les résultats recherchés sont des valeurs maximum, et non pas une estimation de la force des vagues sur un objet dans le temps et dans des conditions de vagues prédéfinies, alors il est possible de simplifier les calculs en utilisant l'équation de forçage max. L'équation de forçage max F_{max} est une forme de la force de trainée dans un courant constant (Eq. 8).

$$F_{max} = C_D \frac{1}{2} \rho A u_{max}^2 \quad (8)$$

L'aire projetée A est l'aire de la face perpendiculaire au courant. Le coefficient de trainée C_D dépend du nombre de Reynolds. Le nombre de Reynolds, Re , caractérise la nature de l'écoulement d'un

fluide en trois régimes : laminaire, transitoire, turbulent (Fig. 13). Il représente le rapport entre les forces d'inertie et la viscosité (Eq. 9).

$$Re = \frac{u_{\infty} L}{\nu} \quad (9)$$

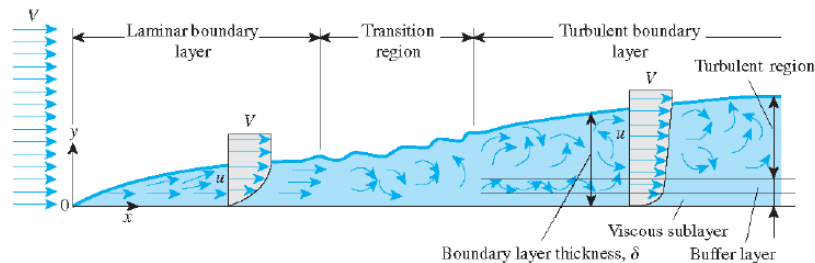


Figure 13 - Développement d'une couche limite sur une plaque plane pour différents régimes d'écoulements, d'après l'Université de Delaware

Le coefficient de trainée dépend de la forme de l'objet (voir Annexe 1). Le coefficient de trainée est difficile à calculer et varie beaucoup en même temps que le nombre de Reynolds. En effet, selon F.Mebarek-Oudina and al. (2013), qui ont étudié numériquement le phénomène d'écoulement d'un fluide incompressible en régime laminaire autour de deux cylindres circulaires en tandem, l'influence d'un cylindre et de son diamètre est remarquable sur la zone de sillage en aval du cylindre et sur la zone d'interférence. Les résultats montrent des vortex à l'aval du premier cylindre, ce phénomène dit de Von-Karman, induit une diminution de la vitesse et donc réduit le nombre de Re. Ainsi, il est possible de déduire de ces résultats que le phénomène de Von-Karman a un effet sur le nombre de Reynolds et réduit particulièrement les efforts sur le deuxième cylindre à l'arrière du premier. Cette étude montre les difficultés à intégrer, dans une équation d'une structure complexe à plusieurs piliers, le nombre de Reynolds réel, très changeant, et en simplifiant les calculs en ne prenant en compte que le nombre de Reynolds du courant avant son impact sur la structure les valeurs seront surestimées. Autrement dit, pour obtenir une valeur précise, des analyses en canal à houle ou en CFD sont nécessaires. Sans ces analyses, il est usuel de choisir un coefficient de trainée par analogie selon des études similaires. Pour une forme cylindrique, le coefficient C_D est lisible sur le graphique selon le nombre de Reynolds (Fig. 14). Ce graphique est souvent utilisé dans la littérature pour définir le coefficient de trainée d'une étude (J.Dinh et C.Koriba (2014) ; V.Kitsikoudis and al. (2017) ; M.Debacq (2020)). Ce graphique a été obtenu par des essais sur un cylindre isolé (d'après B.Munson, D.Young and T.Okiishi (1998)).

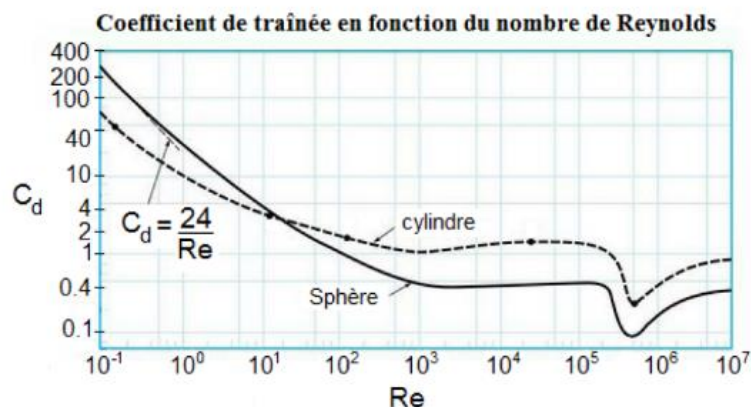


Figure 14 - Variabilité du coefficient de trainée en fonction du nombre de Reynolds, d'après B.Munson, D.Young and T.Okiishi (1998)

5.4 Aspects biologiques

Il est connu que tout ouvrage en mer attire une biodiversité importante, bien que certaines matières puissent être toxiques pour la biodiversité locale (M.J.Anderson and A.J.Underwood, 1994). Intégrer la faune et la flore dans la discussion dès l'éco-conception devient alors nécessaire pour avoir un impact écologique faible.

Des études ont montré que le béton était favorable à la colonisation, comme les céramiques et les matériaux terreux (L.M.O'Reilly and S.M.Willerth, 2024 ; O.Ly and al., 2021). Les premières espèces colonisant une structure en béton sont des biofilms et des algues. Cependant, les espèces pionnières s'installant sur le module, leur diversité et leur densité d'individus vont dépendre de la saison d'immersion des structures (M.Georges, 2021). Il est démontré qu'une immersion en printemps est favorable pour la colonisation des structures. Cette première colonisation facilitée par le matériau constitue le premier maillon d'un réseau trophique, elle permet à son tour une meilleure intégration des structures aux milieux naturels en attirant des espèces pélagiques ou benthiques. Selon la période de reproduction des espèces cibles et selon leurs alimentations, la date d'immersion peut être déterminée plus précisément.

La colonisation efficace d'un récif artificiel ne se démontre pas sur la première année d'immersion. En effet, dès les premiers mois d'immersion, une colonisation impressionnante est remarquée, or après 5 ans d'immersion la colonisation stagne (Fig. 15). C'est la valeur de ce palier qui permet d'évaluer l'efficacité d'un projet en termes d'apports biologiques. Ce palier vient avec l'installation d'espèces de stades matures du peuplement avec une durée de vie généralement plus longue. L'installation de ces différents maillons du réseau trophique dépend des facteurs d'installation du récif artificiel. Entrent en jeu, comme mentionnée ci-avant la saison d'immersion, mais aussi la profondeur, la bathymétrie de la zone, la nature sédimentaire, la température, la disponibilité en nutriment, l'orientation des surfaces exposées au soleil, l'intensité lumineuse, la circulation hydrologique autour du récif favorisant la présence d'ombres hydrodynamiques (zone calme) et la nature chimique du matériau du récif (J.C. Souche and al., 2018). L'étude d'immersion est donc indispensable au même titre que la conception de la forme du récif.

Évolution du peuplement d'un récif artificiel après sa mise en place

- Phase pionnière (1 an)**
Les premiers colonisateurs sont souvent de la famille des *Anellidae* (*Serpulidae*, *Sabellidae*, etc.).
- Phase de maturation (2-5 ans)**
Installation d'huîtres, moules, spirographes, organismes photosynthétiques.
La diversité spécifique et la biomasse augmentent.
- Phase de stabilisation (6-30 ans, sans doute beaucoup plus)**
- Phase de sénescence**
Les modules s'écroulent, s'envasent, s'enfouissent.
La diversité et la biomasse déclinent.
- Phase terminale**
Disparition du récif ?

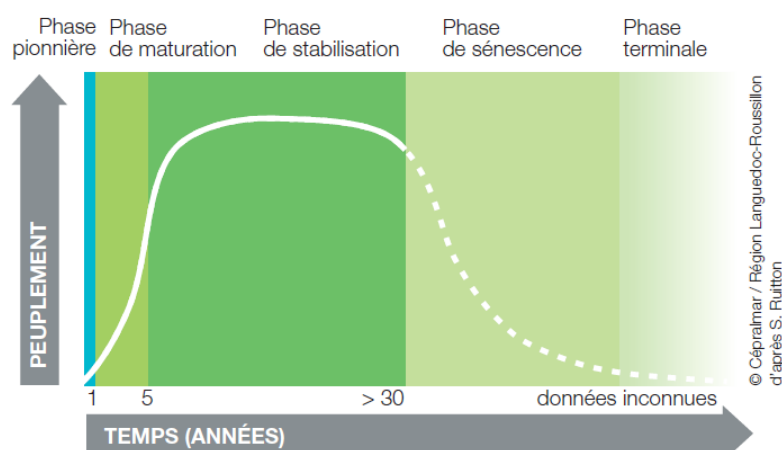


Figure 15 - Évolution théorique du peuplement d'un récif artificiel après sa mise en place, d'après A.Fourrier and al. (2015)

La recherche de nouveaux bétons biogènes montre un atout pour la colonisation des récifs : leur utilisation de coquilles de mollusques privilégierait cette colonisation tout en réduisant l'impact environnemental de la fabrication du béton (D.H. Nguyen and al., 2017 ; H.N.Ruslan and al., 2022), en remplaçant l'extraction de sable par le recyclage de déchets alimentaires coquillés pour la matrice du béton. L'utilisation de ce nouveau matériau est tout du moins encore en recherche afin d'estimer ses capacités de résistance mécanique selon le pourcentage d'ajout de coquilles et la granulométrie à

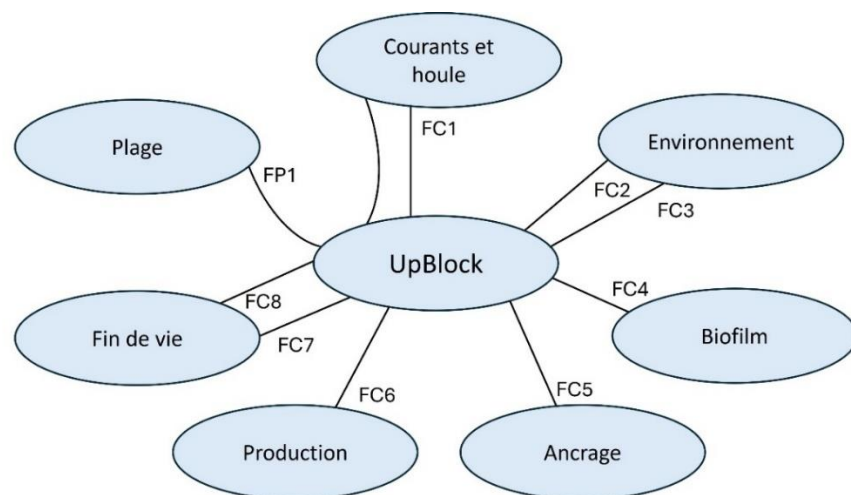
laquelle sont réduites les coquilles pour ne pas détériorer la durabilité des structures utilisant ce matériau. Avec certaines conditions, l'ajout à 100% de coquilles semble prometteur, selon la granulométrie de broyage des coquilles, avoir un remplacement de 100% permettrait une meilleure distribution des grains et une meilleure compacité (M.Zeghad, 2018).

5.5 Solutions Lineup Ocean

Les solutions Lineup Ocean sont principalement orientées vers une protection contre l'érosion côtière plus responsable (Fig. 16). Pour cela, les structures doivent répondre aux fonctions contraintes suivantes :

- résistante contre des courants de tempête ;
- stable et ancrée ;
- conçus pour diminuer la houle dans sa forme ;
- être transparent pour le déplacement des sédiments, des flux et de la faune ;
- avoir un impact chimique sur son environnement faible, voire nul ;
- être colonisable ;
- avoir un impact carbone faible.

Pour que la colonisation du biofilm soit efficace, on tiendra compte de la saison d'immersion, du taux de nutriment dans l'eau, du temps d'immersion, de la luminosité, de l'humidité, de la profondeur et de la température.



- FP1 – Protéger les plages contre l'érosion côtière dû aux courants et à la houle
 FC1 – Être résistant contre les courants de tempête
 FC2 – Être transparent pour son environnement (sédiments, flux, faune)
 FC3 – Avoir un impact chimique faible voire nul sur son environnement
 FC4 – Être colonisable par le Biofilm
 FC5 – Être stable et ancré
 FC6 – Avoir un impact carbone faible lors de la production
 FC7 – Être recyclable dans le cas d'un retrait de la structure
 FC8 – Avoir un impact carbone faible à sa fin de vie

Figure 16 - Graphe des interactions du système UpBlock®

Les solutions Lineup Ocean sont aujourd'hui surtout orientées vers des structures en béton bas-carbone imprimées en 3D. L'utilisation de ce matériau est aujourd'hui usuelle dans la conception de récifs artificiels (B.Vivier et al., 2021), il permet d'avoir une structure colonisable et durable en mer malgré les conditions extrêmes et avec un potentiel de recherche de modification du matériau pour baisser l'impact environnemental et climatique. Ainsi, Lineup Ocean est en recherche constante d'optimisation de ses bétons bas-carbone, avec moins d'eau, moins de sable ou bien de nouveaux bétons bio sourcés avec des granulats de coquilles de mollusques (L.M.O'Reilly and S.M.Willerth,

2024), de la terre de diatomées (T.Saidi and M.Hasan, 2020) etc., pour diminuer l'impact environnemental de leurs ouvrages en mer.

L'utilisation de l'impression 3D permet de réduire la quantité de déchets en production de structures en béton, mais aussi de réaliser des formes complexes avec une rugosité intéressante pour des structures à coloniser. De plus, avec une recherche adéquate, l'impression 3D peut être utilisée avec différents matériaux et ne bloquent donc pas la recherche de nouveaux bétons biosourcés ou le potentiel d'autres terres céramiques. Avec l'étude d'un parcours robot efficace, l'impression 3D de grandes structures peut durer moins de 7h. Cette technologie permet de regrouper ces différents avantages écologiques et d'avoir la possibilité de rendre les solutions Lineup Ocean répliquables en nombre pour la réalisation de grands projets de protection côtière et à coût énergétique faible.

6 Site d'étude

6.1 Le golfe du Lion

Le site démonstrateur de Lineup Ocean pour les UpBlocks® est situé à Palavas les Flots (34250) dans le département de l'Hérault en Occitanie. Les courants impactant la plage du site démonstrateur sont générés dans le golfe du Lion. Le golfe du Lion a beaucoup évolué depuis les années 1700 (Annexe 2). De nombreuses lagunes se trouvent dans ce golfe et ont une tendance d'années en années à se refermer. Les études de la DREAL (2020) montrent la dérive littorale selon des cellules sédimentaires de grandes échelles (Fig. 17a) et mettent en avant la forme naturelle des dunes prélittorales dans le golfe du Lion (Fig. 17b).

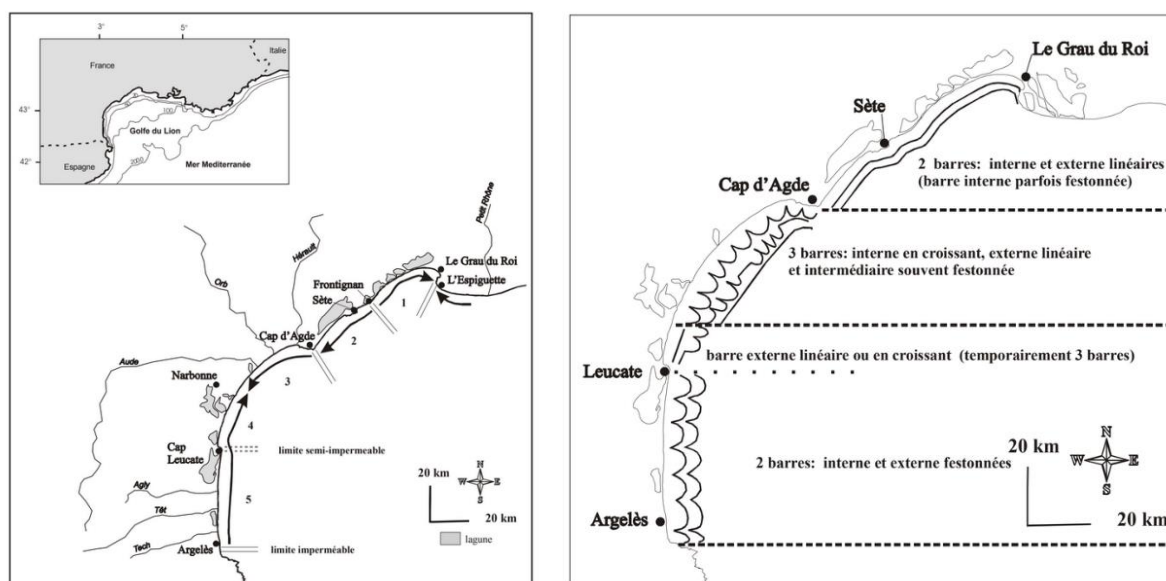


Figure 17 - a. Caractères généraux du golfe du Lion : sens du transport sédimentaire ; b. Typologie des systèmes de barres d'avant côte dans le golfe du Lion (les barres ne sont pas représentées à l'échelle), d'après la DREAL (2020)

Les études de C.Brunel and al. (2012), montrent l'évolution du budget sédimentaire entre 1984 et 2009, période correspondant à l'implantation d'ouvrage de protection côtière. Ainsi, il est possible de visualiser l'impact de la digue de l'Espiguette sur la concentration en sédiment à la plage de l'Espiguette et sur le déficit dans le port de la Camargue, à Carnon et à Palavas (Annexes 3 et 4). Ces sédiments proviennent en grande quantité du delta du Rhône. Les ouvrages mis en place ont eu un impact à grande échelle comme pour la digue de l'Espiguette mais aussi à petite échelle comme à Palavas où les épis et brises lames ont modifié les cellules sédimentaires et modifié les dunes prélittorales.

6.2 Le projet à Palavas-les-Flots

L'impact des ouvrages sur le littoral de Palavas-les-Flots a été étudié sur trois ans, en collaboration, par Waves'n See et Lineup Ocean avec des caméras tournées vers la mer permettant d'enregistrer les vagues et à partir de leur déferlement de déterminer la topographie du milieu (Fig. 18).



Figure 18 - Principe du dispositif de suivi WaveCams® développé par Waves'N See, d'après Wave'N See (2023, Comm. Pers.)

L'annexe 5 montre le type de résultats cartographiques exploitables après analyse des images prises par les WaveCams®. Le fond de carte est l'image réelle prise par les WaveCams®, le gradient de couleurs de rouge à violet montre la dissipation naturelle entre les brises lames.

Selon les saisons calmes ou énergétiques, les résultats sont représentables schématiquement. Ces schémas simplifiés (Fig. 19) montrent un fort recul des dunes sous l'action de forts courants. Les schémas de forte circulation en saisons énergétiques sont principalement induits par des courants en provenance du sud, sud-est, ces schémas changent la forme et la position des dunes, passant d'une forme plus convexe à une concave. Cela met en évidence la circulation qui pousse les sédiments vers le large et s'accumulent a priori à l'arrière du brise-lame central.

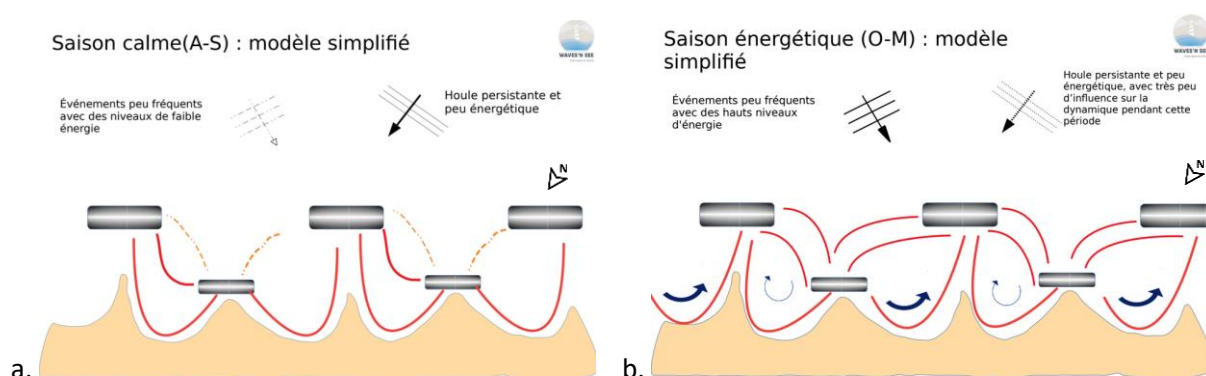


Figure 19 - a. Schéma simplifié de l'évolution topographique en saison calme ; b. Schéma simplifié de l'évolution topographique en saison énergétique, d'après Waves'N See (2023 Comm. Pers.)

Le déploiement des démonstrateurs des UpBlocks® est prévu entre les brise-lames (Fig. 20). L'ensemble du système assemblé des UpBlocks® est nommé SurfReef. L'objectif est de modifier le transport sédimentaire étudié par Waves'n see et d'essayer de rapprocher les dunes pré littorales de leurs positions initiales. En théorie, cela permettrait aussi l'engraissement de la plage (Fig. 21).

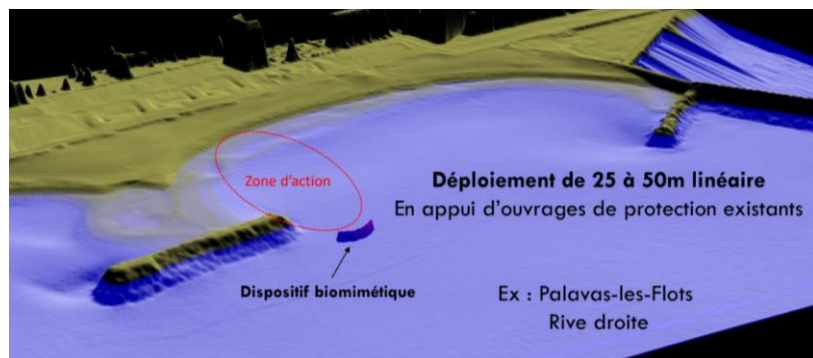


Figure 20 - Déploiement prévu du projet Surfrees, d'après Lineup Ocean (2021, Comm. Pers.)

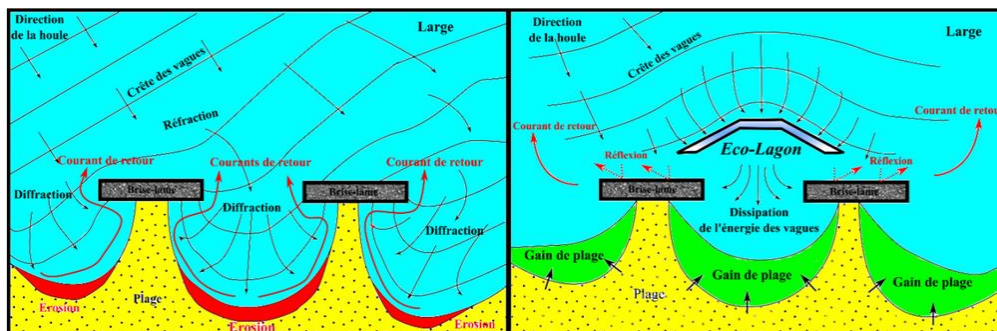


Figure 21 - Comparaison de la dynamique de la plage avec et sans Eco-Lagoon, ancien nom du projet Surfrees, d'après Lineup Ocean (2021, Comm. Pers.)

En plus de l'engraissement de la plage et à plus grande échelle, ce projet permet de répondre à des enjeux anthropiques et écologiques sur le site de déploiement. L'annexe 6 montre le risque de submersion de la côte pour un aléa décennal. Les habitations les plus proches de la côte sont en zone de risque de submersion. De plus, les lagunes de Palavas sont en zonage ZNIEFF ou zonage réglementaire Natura 2000 ou Ramsar (Annexes 7 et 8). Ce sont des zones d'intérêt écologique connues avec des espèces à protéger. Bien qu'il soit difficile d'anticiper l'impact pour ces milieux d'une submersion des côtes, il est important de prendre en compte l'impact écologique de ce projet, surtout sur la ZNIEFF type 2 marine dont fait partie le site d'étude (Annexe 8). L'impact peut être positif avec le gain d'habitats, la diversification des courants à proximité des modules et un rapprochement vers l'équilibre sédimentaire naturel avant l'installation d'ouvrages, comparable à une restauration écologique.

7 Problématiques et hypothèses

Pour le projet à Palavas-les-Flots avec le déploiement d'UpBlocks®, une conception avancée de l'ancrage des modules par l'équipe Ouvrages maritimes et portuaires chez Ingérop va être mise en œuvre. Ainsi, pour anticiper cette étude, les études de ce stage furent développées. Après les études océanographiques faites en canal à houle, ainsi que les études de colonisation du matériau, les études de ce stage s'inscrivent dans le projet du module UpBlock® pour connaître ses effets, ses qualités et ses défauts, pour pouvoir anticiper les problématiques futures et comment les résoudre. Ces études cherchent à répondre aux questionnements suivants :

- Quels sont les efforts auxquels la structure doit résister selon différentes conditions ?
- Quelles sont les limites et les zones de fragilité de la structure ?
- Quels sont les effets de l'assemblage entre les UpBlocks® ?
- Quels sont les effets de l'ancrage par les pieux d'assemblage ?

Il a été décrit, dans l'état de l'art - § 5.3 Mécanique des fluides - les difficultés à anticiper les efforts de charges et la nécessité de simplifier les calculs. Il est supposé que la structure ne se cassera pas puisque construite en béton et étant donné la conception du module avec un gradient rapprochant le point de gravité vers le bas. Cependant, un doute reste sur un potentiel basculement de la structure lors de courant de tempête. Il est supposé que les zones fragiles soient les branches hautes, fines et isolées. Il est envisagé qu'une concentration des efforts fragilise le système d'assemblage avec un cisaillement des pieux d'assemblage (Julien Lesot, 3DConcrete, comm. perso.).

8 Matériels et méthodes

Les études de ce stage sont construites sur la base de la conception des UpBlocks® réalisées en collaboration entre Lineup Ocean, 3DConcrete et XtreeE (Fig. 22).



Figure 22 - Photos des deux UpBlocks® à l'inauguration dans les locaux de 3DConcrete

Les efforts appliqués sur la structure seront simulés via le logiciel *Autodesk Fusion*. Ce logiciel, bien que spécialisé dans l'étude de productions en métaux, permet de créer des matériaux spécifiques, de modéliser des formes complexes et d'assembler et simuler en statique les effort sur un modèle 3D. Il ne permet pas de simuler un fluide comme en CFD (Computational fluid dynamics). Pour l'analyse analytique des forces appliquées à la structure, le logiciel Excel est utilisé.

Pour simuler les efforts via Fusion, il est nécessaire d'avoir un fichier avec des formes lisses, les fichiers STL de modélisation déjà maillé ne sont donc pas utilisables. L'espace de travail simulation permet de réaliser différent type d'étude de simulation. Pour ce stage, les études se font en simulation de contrainte statique (Fig. 23).

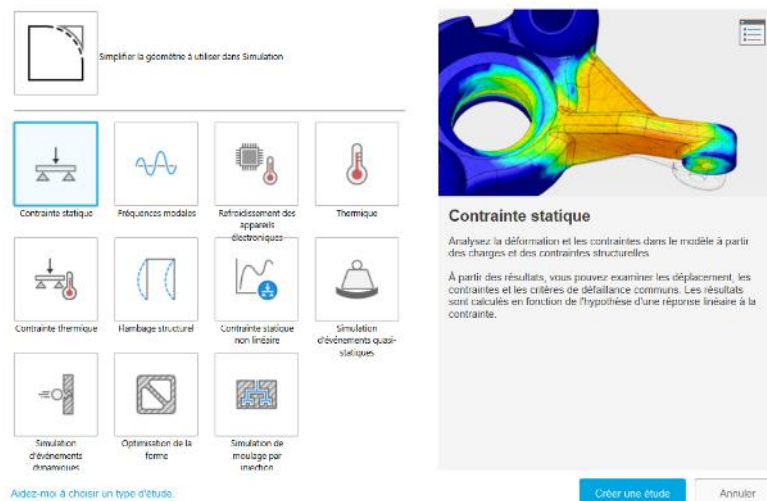


Figure 23 - Etude de simulation possible dans Fusion Autodesk 2.0

Des fonctions comme *matière physique* ou *créer un matériau* permettent de modifier un matériau existant dans la base de données ou bien de créer un matériau selon des paramètres thermiques, physiques et de résistance (Fig. 24). Par défaut, tout corps est en acier. Un biais dans la paramétrisation des matériaux existe pour l'utilisation de béton. En effet, la limite d'élasticité est requise or le béton n'est pas un matériau caractérisé par une limite d'élasticité, mais plutôt par une résistance à la compression. Par conséquent, la limite d'élasticité indiquée pour le béton dans Autodesk Fusion est purement théorique.

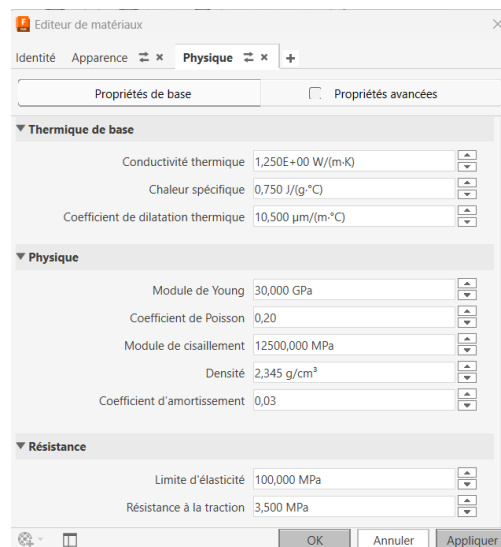


Figure 24 - Onglet de modification de la matière dans Fusion Autodesk 2.0

Dans le cas d'une structure posé sur le fond marin, les efforts appliqués sont ceux représentés figure 25. Le contexte de l'étude avec un environnement théorique reproduisant les conditions en mer Méditerranée permet de négliger les effets de pente trop faible. De ce fait, la structure est considérée comme perpendiculaire au courant, ainsi la force de portance est négligée.

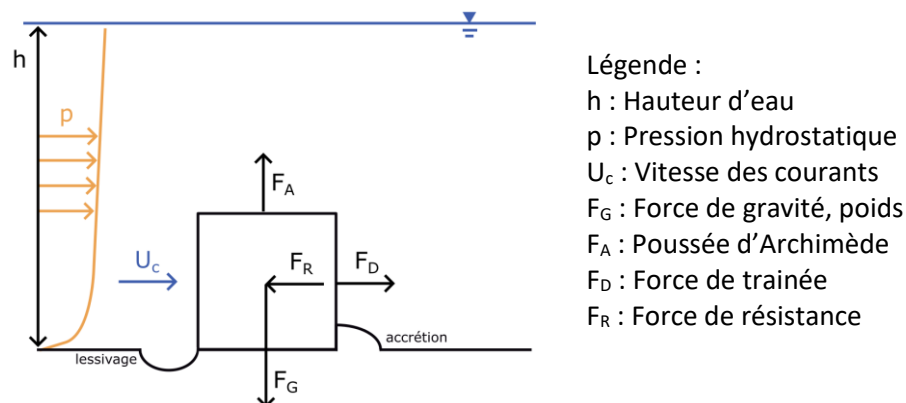


Figure 25 - Bilan des forces sur un récif artificiel, modifié d'après Y.P.Sheng (2000)

Sur Fusion, les forces sont appliquées comme suit :

- Sont calculées par le logiciel : la pression hydrostatique selon le type de fluide et la hauteur d'eau, option « *pression hydrostatique* ». Dans *charges structurelles* : le poids selon le matériau et selon la gravité (option « *activer la gravité* »).
- Sont à calculer puis appliquer en force linéaire : la force de trainée et la poussée d'Archimède (option « *Force* » dans charges structurelles).
- Le courant est une entrée dans les calculs de la force de trainée et de la poussée d'Archimède.

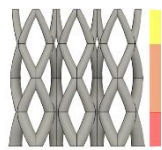
La force de résistance est un des résultats de la simulation.

Pour calculer la force de trainée, l'équation (8) transformé devient l'équation (10).

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_{\text{eau de mer}} \cdot S_{\text{projeté}} \cdot u_c^2 \quad (10)$$

$$S_{\text{projeté}} = \Phi_i \cdot L \quad (11)$$

Au sein de l'équation (10), le coefficient de trainée C_D peut être lu selon le nombre de Reynolds Re (Fig. 13). L'équation (11) comprend L comme la longueur de branche en m. Selon le diamètre de cylindre, le coefficient de trainée va évoluer. Le diamètre évoluant le long de la structure, pour les calculs de force de trainée, la structure est divisée en 3 parties :



- le haut, diamètre 0,10 m ;
- le centre, diamètre 0,145 m ;
- la base, diamètre 0,19 m.

Figure 26 - Gradient en 3 parties de la structure de l'UpBlock©

Pour rappel, il est décrit dans l'état de l'art, § 5.3 Mécanique des fluides, la difficulté de déterminer un coefficient de trainée due aux changements du nombre de Reynolds à l'approche de la structure. De plus, l'impact d'un effet de dissipation des premiers piliers réduisant le coefficient de trainée sur les piliers en arrière ne peut pas être pris en compte puisque complexifiant trop les calculs. Le coefficient de trainée choisi va donc surévaluer les résultats. La méthode choisie pour ce calcul est de calculer la force de trainée pour un pilier et de multiplier ce résultat par 72, qui est le nombre de piliers sur la structure.

Les résultats de simulation sur fusion utile à notre étude sont :

- Le facteur de sécurité, selon la résistance à la traction ;
- Les contraintes axiales, en MPa ;
- Le déplacement, en mm ;
- La force de réaction, en N ;
- La déformation, différence entre la longueur initiale L_0 et la longueur finale ΔL ;
- La pression de contact, en MPa ;
- La force de contact, en N.

9 Protocole

Deux études ont été réalisées avec trois cas d'études chacune. La première étude s'intéresse à la variation de la structure et de son ancrage et son impact sur les résultats de simulation. La deuxième s'intéresse à la variation des conditions environnementales.

Pour toutes les études, le courant suit l'axe Y.

9.1 Étude de variation de la structure

Les données d'entrées de la première étude sont une estimation paroxysmale de conditions extrêmes pour pouvoir visualiser les limites de la structure (Fig. 27). Ainsi, il est envisagé une vitesse de 6m/s pour une hauteur d'eau de 3m et une hauteur de vague de 2m.

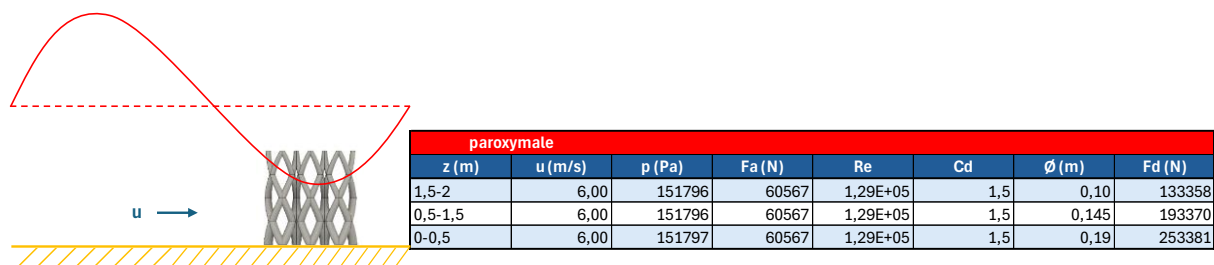


Figure 27 - Données d'entrées pour des conditions paroxysmales

Les trois cas sont les suivants (Fig. 28) :

- Un UpBlock® unitaire maintenu par son poids avec une orientation optimisée face aux courants ;
- Un UpBlock® au sein d'un assemblage en linéaire isolé pour les simulations ;
- Un UpBlock® au sein d'un assemblage en linéaire avec un ancrage dans le substrat isolé pour les simulations.

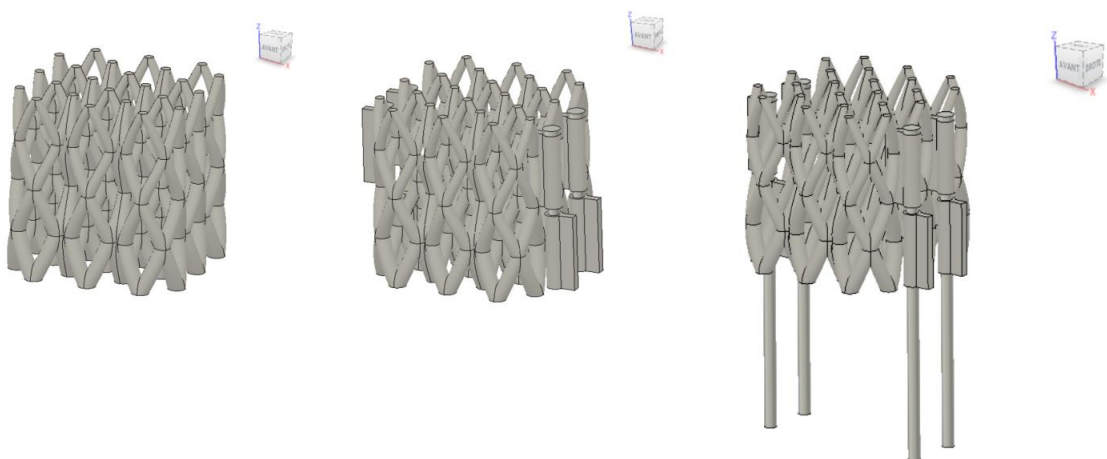


Figure 28 - Modélisation du UpBlock® selon les 3 cas

Pour le premier cas, une orientation optimisée pour dissiper la houle est utilisée. Cette face dissipative, avec une orientation de $10,5^\circ$ de la structure face aux courants (Fig. 29) a été testé lors d'étude en canal à houle. Pour ce cas d'étude, on suppose que la structure est immergée seule et que son poids permettrait à lui seul de maintenir la structure. Dans le cas d'une immersion seule, il peut être envisagé cette orientation dissipative selon le besoin de taux de dissipation pour restaurer la plage.

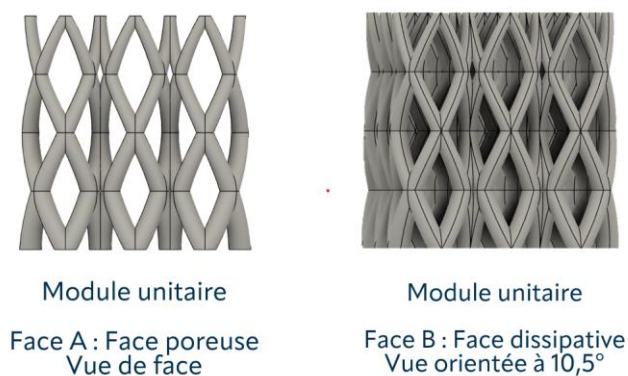
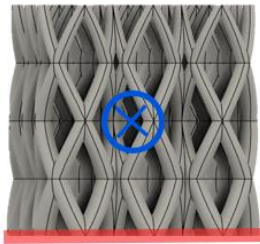


Figure 29 - Orientation du UpBlock®

Pour simuler le maintien de la structure par son propre poids, la fixation est placée à chaque face de dessous des piliers. La structure est alors immobilisée par le contact avec le substrat (Fig. 30).



- Contrainte d'immobilisation
- ➔ Direction du courant

Figure 30 - Placement d'immobilisation du UpBlock® pour le cas 1

Pour le deuxième et troisième cas, il est supposé que des modules sont immergés assemblés linéairement (Fig. 31). Pour faciliter les simulations, un module est isolé dans cette configuration. Dans la simulation reste l'UpBlock® étudié, les pieux d'assemblage en acier inox 316L pour la simulation et le système d'assemblage des UpBlocks® adjacents.

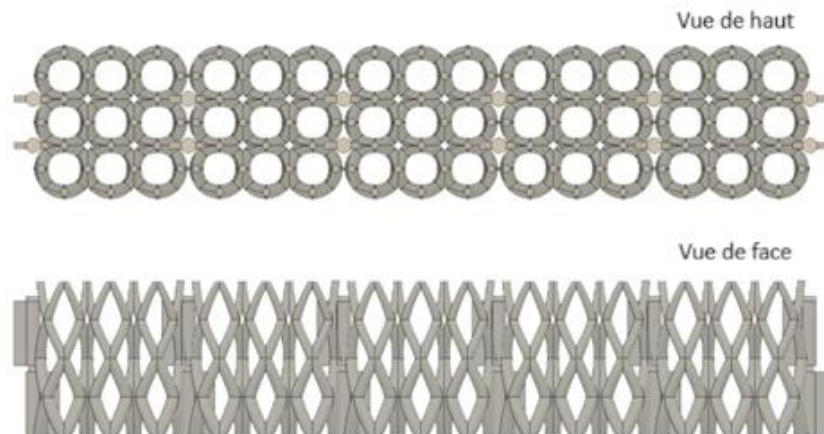


Figure 31 - Modules assemblés linéairement

La partie servant à assembler les modules ensemble est simplifiée pour la modélisation 3D à cause des limites de la carte graphique ne permettant pas d'ajouter les détails de maintien (Fig. 32).

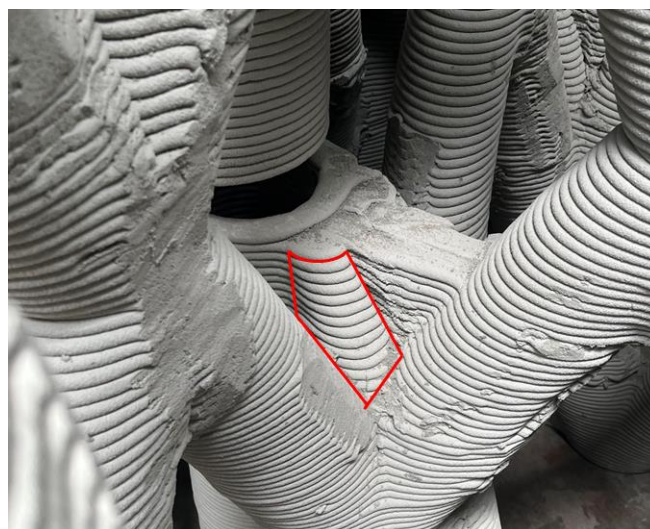


Figure 32 - Zoom sur l'impression 3D

Pour le deuxième cas, il est supposé que la structure du UpBlock® isolé est maintenu par les modules adjacents (Fig. 33). Une contrainte d'appui sur les faces de dessous de chaque pilier permet de simuler le substrat.

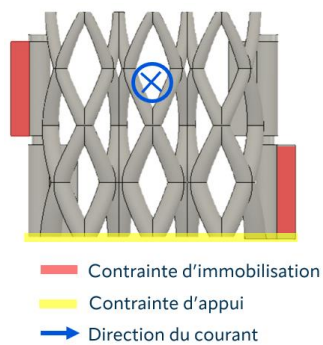


Figure 33 - Placement d'immobilisation du UpBlock® pour le cas 2

Pour le troisième cas, les suppositions sont les mêmes que pour le deuxième cas, mais en ajoutant que le module étudié est un module ancré par les pieux en acier. Ces quatre pieux sont allongés de 2m et ancrés dans le substrat comme des vis à sable (P.Francour and al., 2006).

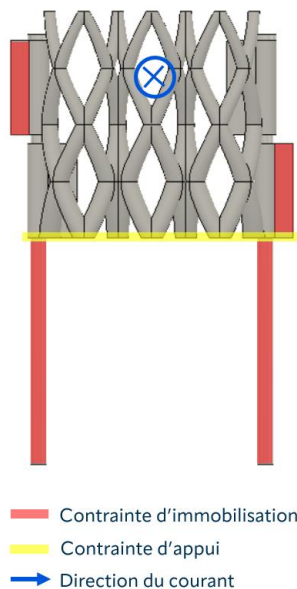


Figure 34 - Placement d'immobilisation du UpBlock® pour le cas 3

9.2 Étude de variation des conditions

La deuxième étude s'intéresse aux différentes réactions selon trois types de conditions de houle (Fig. 35). Les conditions typiques : en min, et des conditions de tempête d'été et d'hiver : en moy et max (Tab. 1). Ces trois cas permettront d'intégrer les résultats de simulations à des études de fatigue de la structure dans le temps.

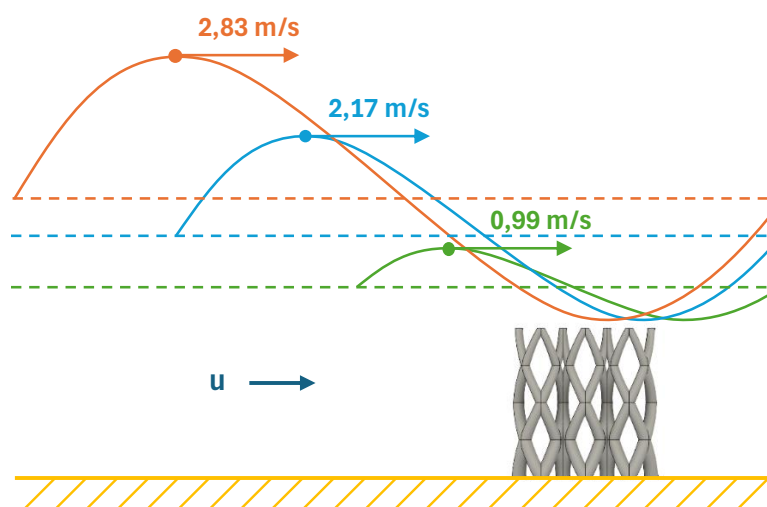


Figure 35 - Représentation schématiques des conditions étudiées

Tableau 1 - Données de conditionnement de la houle pour les trois types de conditions étudiées

état	c (m/s)	L (m)	k (m ⁻¹)	kd (/)	eau selon kd	d/L	eau selon d/L	u (m/s)
min	4,95	385,2	0,016	0,041	peu profonde	0,006	intermédiaire	0,99
moy	5,65	755,1	0,008	0,027	peu profonde	0,004	peu profonde	2,17
max	6,07	1248,2	0,005	0,019	peu profonde	0,003	peu profonde	2,83

Ainsi, les données d'entrée pour les trois cas sont décrites de la figure 36 à la figure 38.

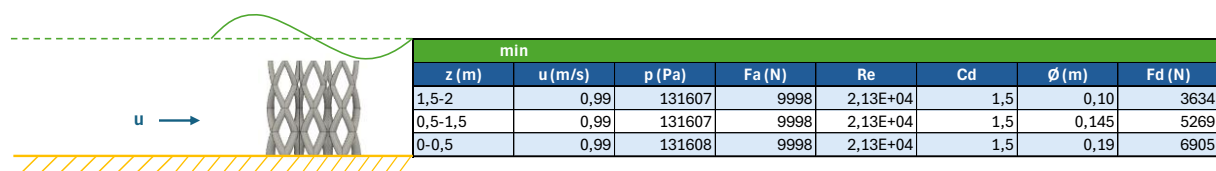


Figure 36 - Données d'entrée pour des conditions minimales

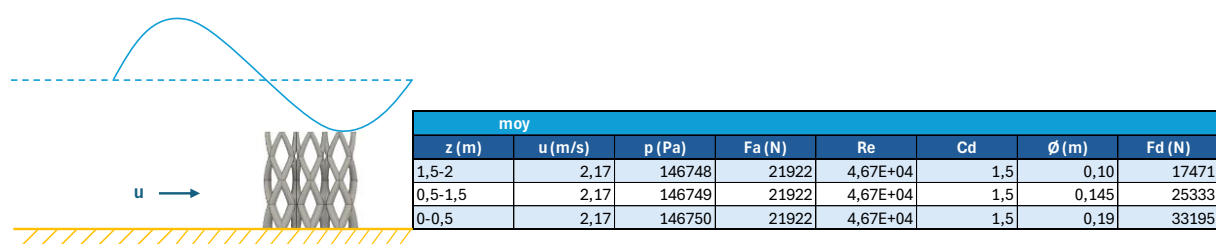


Figure 37 - Données d'entrée pour des conditions moyennes

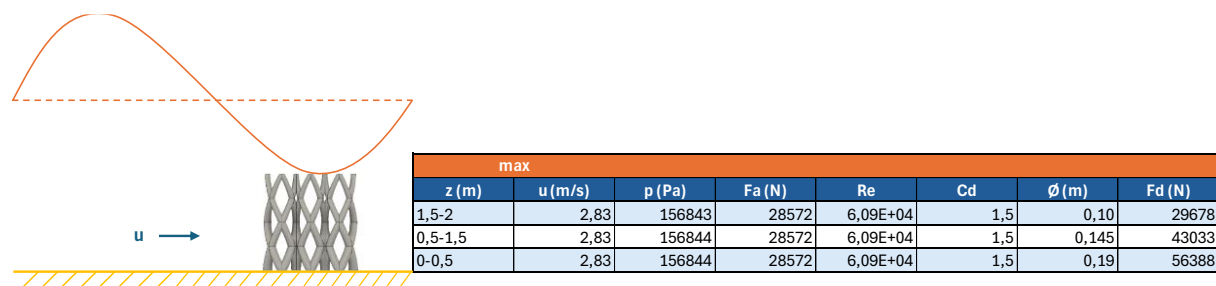


Figure 38 - Données d'entrée pour des conditions maximales

10 Résultats

10.1 Résultats de l'étude de variation de la structure

10.1.1 Étude d'un module unitaire

La figure 39 regroupe les résultats clés de la simulation sur Fusion Autodesk, présentant plusieurs aspects cruciaux pour cette étude. Le facteur de sécurité en lien avec la résistance à la traction met en évidence des zones de fragilité où le facteur de sécurité est inférieur à 2, ainsi que des zones de faiblesse en contrainte de cisaillement en XZ, où le cisaillement dépasse 1 MPa.

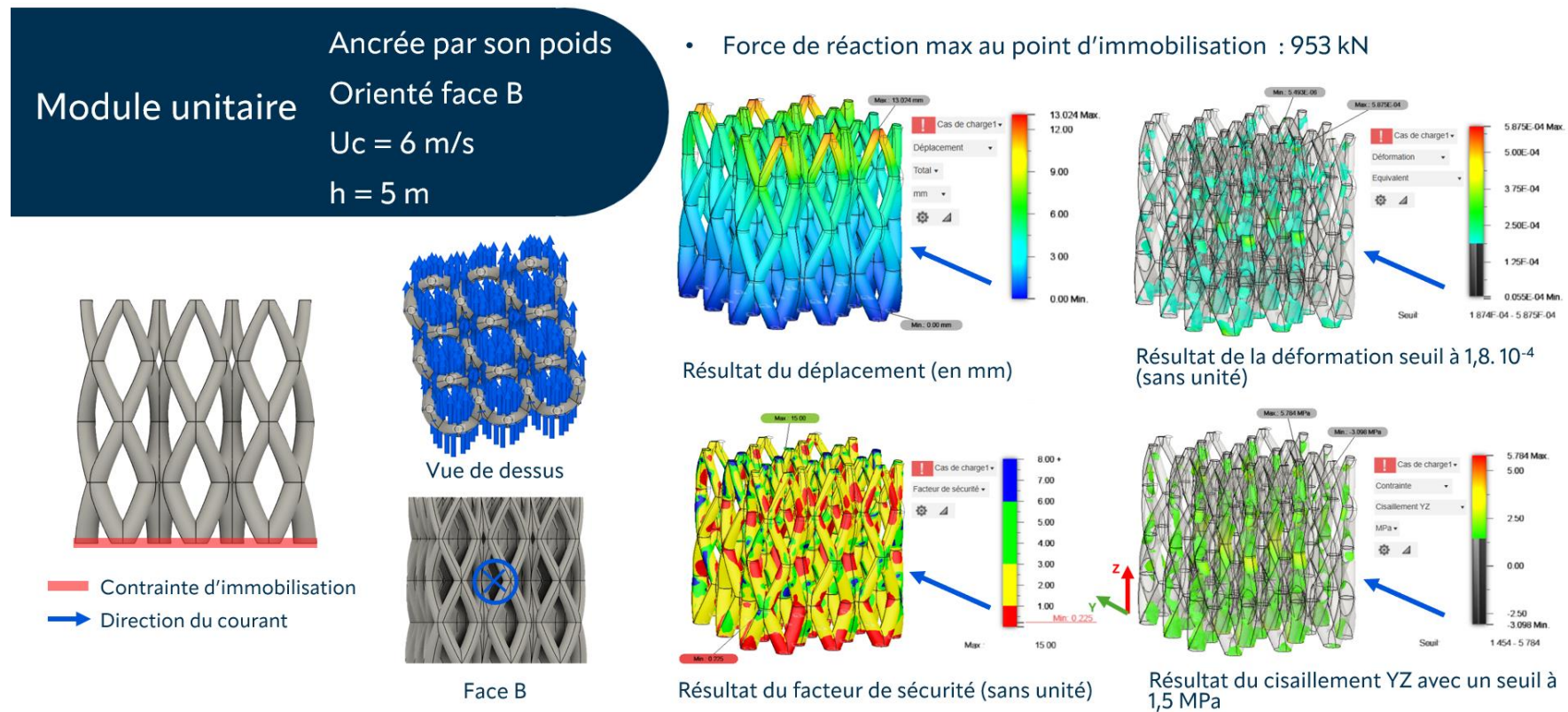


Figure 39 - Présentation des résultats de l'étude pour le cas 1

10.1.2 Étude d'un module assemblé

En adaptant la simulation d'un module unitaire avec de nouveaux composants pour représenter l'assemblage de modules adjacents et en modifiant les contraintes structurelles, il est obtenu une simulation d'un module tenu par les modules adjacents fixes.

Les figures 40 et 41 regroupent plusieurs résultats clés de l'analyse. Le facteur de sécurité en lien avec la résistance à la traction révèle une surcharge de la structure, avec des zones où le facteur est inférieur à 2. La contrainte de cisaillement aux différentes références axiales met en évidence des charges élevées, notamment aux zones de liaison entre les pièces d'assemblage, suggérant un léger effet de flexion sur les pieux d'assemblage. Le déplacement en millimètres montre une différence d'impact entre les deux faces équipées de systèmes d'assemblage. La force de réaction, avec une valeur maximale de $1,259 \times 10^9$ N, indique un effort localisé sur l'angle entre les faces fixes et le reste du système mobile, illustrant l'effet de bras de levier des efforts de courant appliqués sur la structure. Enfin, la déformation met en lumière les zones les plus fragiles, particulièrement les liaisons entre les modules, avec une déformation plus marquée des piliers proches des systèmes d'assemblage.

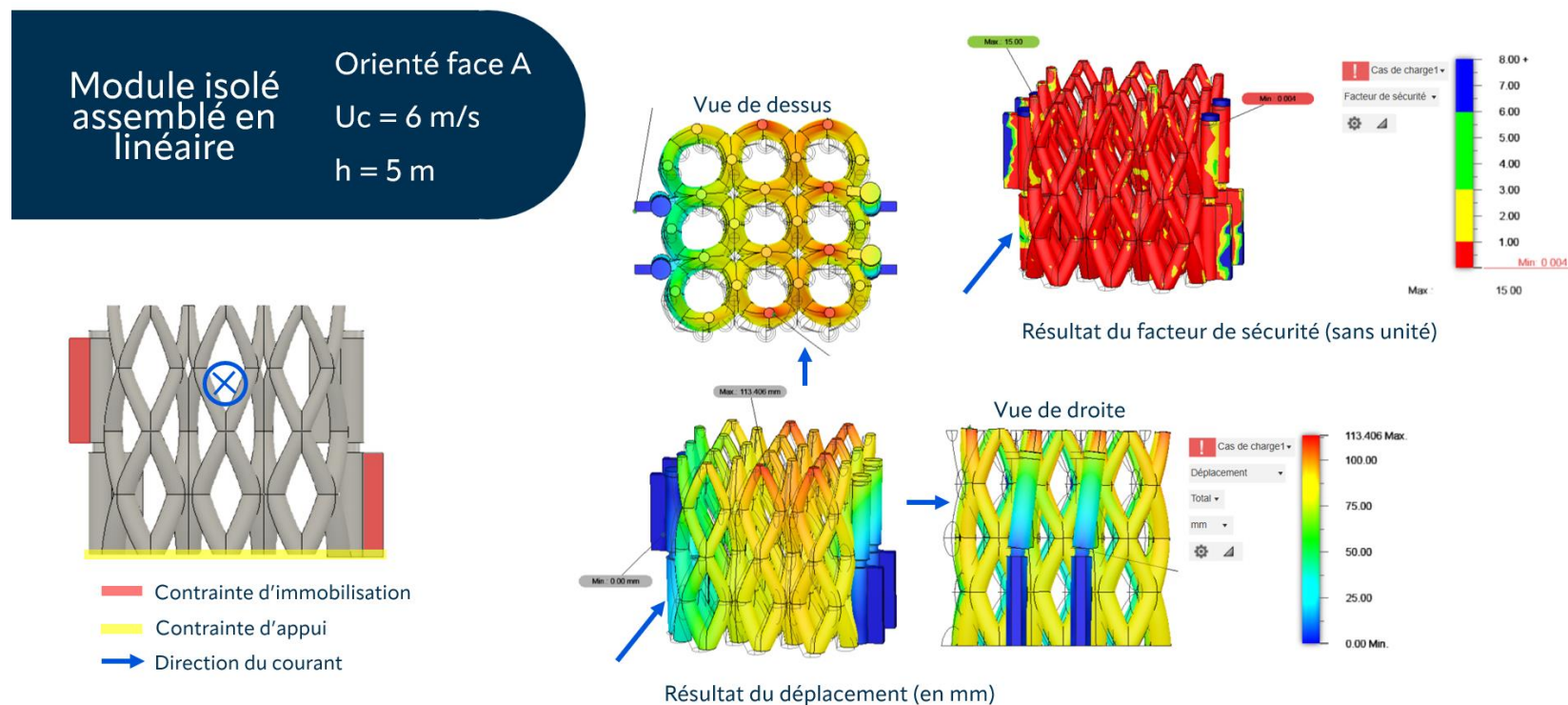
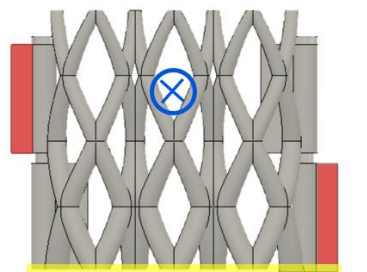


Figure 40 - Présentation des résultats de facteur de sécurité et de déplacement pour le cas 2

Module isolé assemblé en linéaire

Orienté face A
 $U_c = 6 \text{ m/s}$
 $h = 5 \text{ m}$



- Contrainte d'immobilisation
- Contrainte d'appui
- Direction du courant

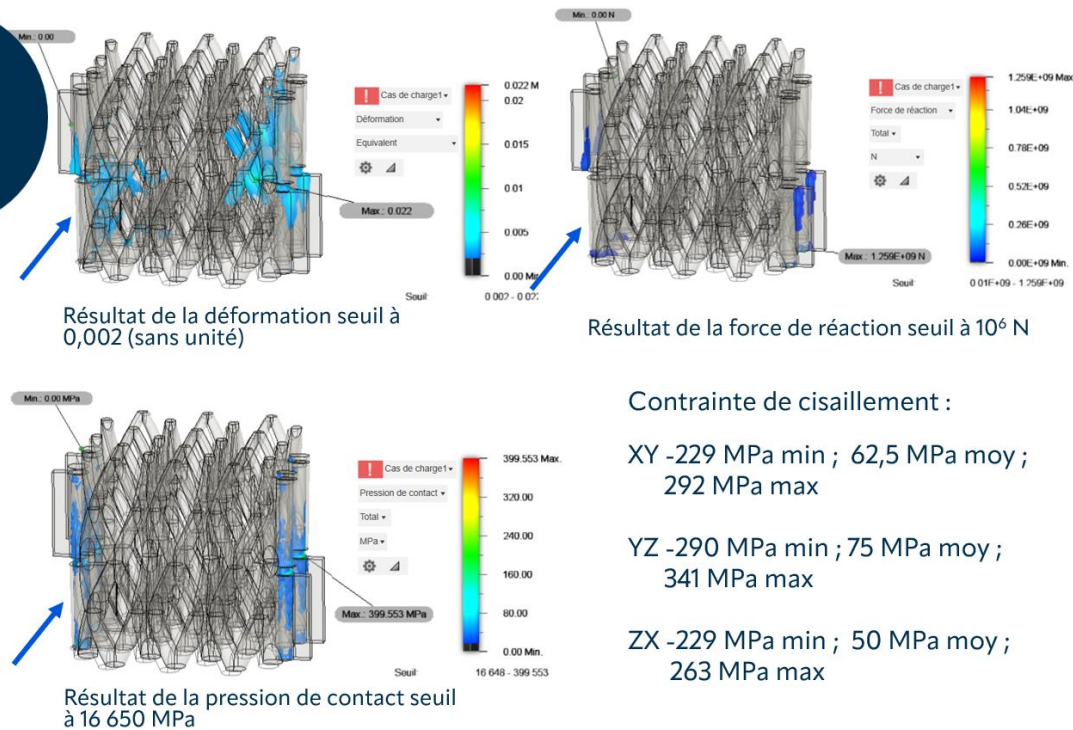


Figure 41 - Présentation des résultats de la déformation, de la force de réaction et de la pression de contact pour le cas 2

10.1.3 Étude d'un module d'ancrage

En adaptant la modélisation des pieux, il est possible de représenter un module en situation d'ancrage. Le module est alors maintenu par les points fixes des modules adjacents et par les pieux d'ancrage dans le substrat. Les résultats de cette étude sont similaires à ceux de l'étude 2 (Fig. 42, 43 et 44).

Le facteur de sécurité met en évidence une surcharge de la structure, tandis que la contrainte de cisaillement aux différentes références axiales montre des charges assez élevées, majoritairement autour de 40 MPa, avec des variations importantes. Une zone de surcharge est visible au niveau des piliers liés au système d'assemblage. L'étude amplifie la différence d'impacts sur le déplacement entre les deux faces du UpBlock[®] équipées de systèmes d'assemblage, entraînant le délogement d'un pieu. La force de réaction, avec une valeur maximale de $9,4 \times 10^8 \text{ N}$, montre un effort localisé sur l'angle entre les faces fixes et le reste du système mobile, illustrant l'effet de bras de levier des forces de courant appliquées sur la structure. Enfin, la déformation révèle que les zones les plus fragiles sont celles liant les modules entre eux, avec une déformation plus marquée des piliers proches des systèmes d'assemblage.

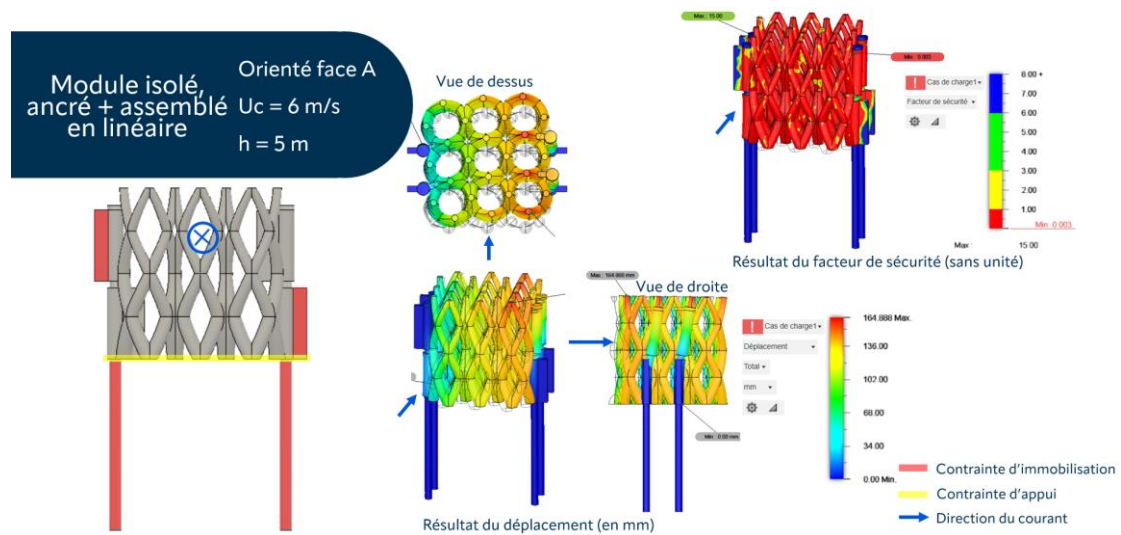


Figure 42 - Présentation des résultats de facteur de sécurité et de déplacement pour le cas 3

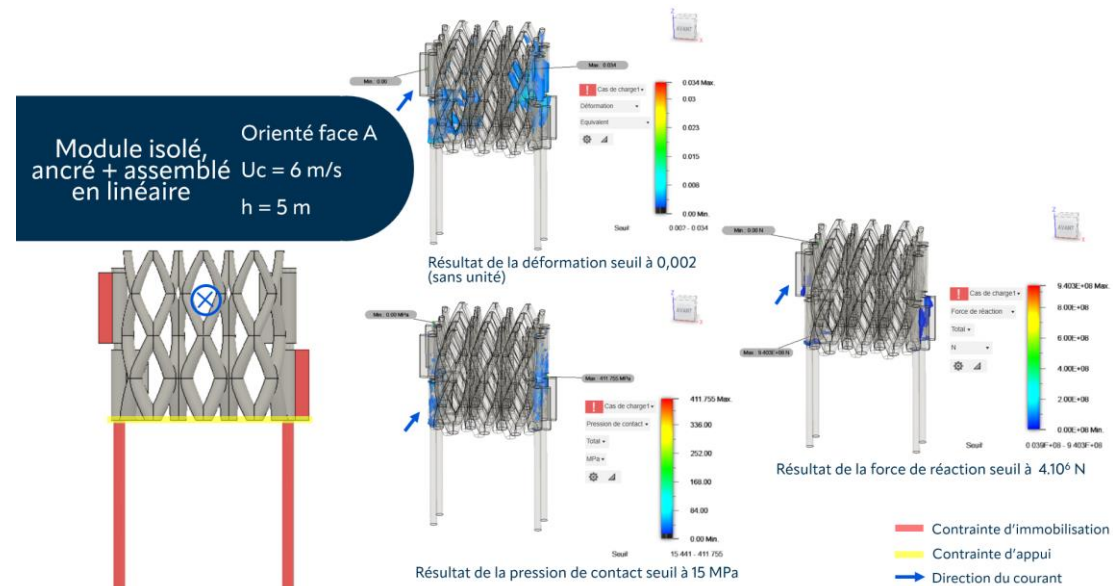


Figure 43 - Présentation des résultats de la déformation, de la force de réaction et de la pression de contact pour le cas 3

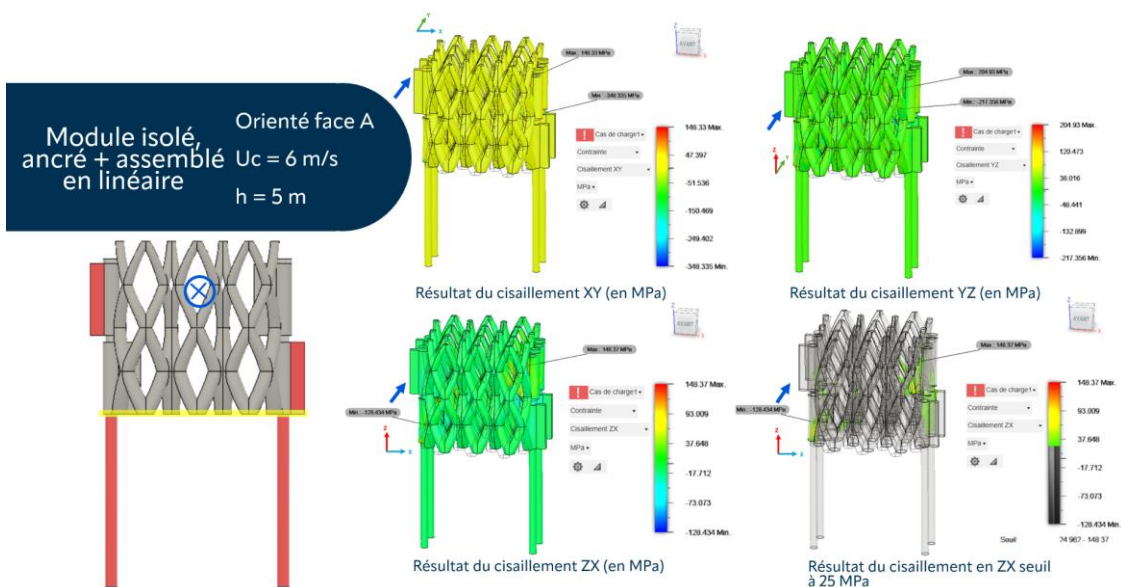


Figure 44 - Présentation des résultats de cisaillement pour le cas 3

10.2 Résultats de l'étude de variation des conditions

Les résultats de l'étude de variation des conditions sont résumés du tableau 2 au tableau 4.

Tableau 2 - Résultats pour des conditions minimales

min		Résultats							
seuil	Facteur sécurité	TcisXY (MPa)	TcisYZ (MPa)	TcisZX (MPa)	L (mm)	Fr (N)	L/ΔL	Pcontact (MPa)	Fcontact (N)
min	6,1	-5,7	-7,3	-6,2	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0	0,00E+00
max	15,0	7,0	8,4	7,41	3,22	4,04E+07	5,06E-04	10,33	1,52E+06
médiane	12,0	0,000	0,000	0,00	1,75	0,0	8,40E-06	0	0

Tableau 3 - Résultats pour des conditions moyennes

moy		Résultats							
seuil	Facteur sécurité	TcisXY (MPa)	TcisYZ (MPa)	TcisZX (MPa)	L (mm)	Fr (N)	L/ΔL	Pcontact (MPa)	Fcontact (N)
min	1,3	-25,3	-31,5	-28,5	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0	0,00E+00
max	15,0	32,7	38,8	31,03	12,83	1,48E+08	2,00E-03	44,79	7,07E+06
médiane	12,0	0,00	0,00	0,00	8,55	0,0	0,00E+00	0	0

Tableau 4 - Résultats pour des conditions maximales

max		Résultats							
seuil	Facteur sécurité	TcisXY (MPa)	TcisYZ (MPa)	TcisZX (MPa)	L (mm)	Fr (N)	L/ΔL	Pcontact (MPa)	Fcontact (N)
min	0,7	-45,0	-56,0	-51,1	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0	0,00E+00
max	15,0	58,8	69,5	55,02	23,13	2,58E+08	5,00E-03	79,80	1,27E+07
médiane	12,0	0,00	0,00	0,17	14,5	0,0	0,00E+00	0	0

En comparaison, les résultats du 2^{ème} cas de la première étude, correspondant à la même modélisation que les cas de cette deuxième étude, avec des conditions paroxysmales, sont résumés tableau 5.

Tableau 5 - Résultats pour des conditions paroxysmales

paroxymale		Résultats							
seuil	Facteur sécurité	TcisXY (MPa)	TcisYZ (MPa)	TcisZX (MPa)	L (mm)	Fr (N)	L/ΔL	Pcontact (MPa)	Fcontact (N)
min	0,0	-229,8	-290,9	-229,0	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0	0,00E+00
max	15,0	292,0	340,9	263,05	113,40	1,26E+09	2,20E-02	399,55	7,12E+07
médiane	0,7	0,00	0,00	0,00	75	0,0	2,50E-03	0	0

Dans la figure 45, les différents résultats sont représentés selon l'évolution des conditions allant de 1 pour les conditions minimum jusqu'à 4 pour les conditions paroxysmales.

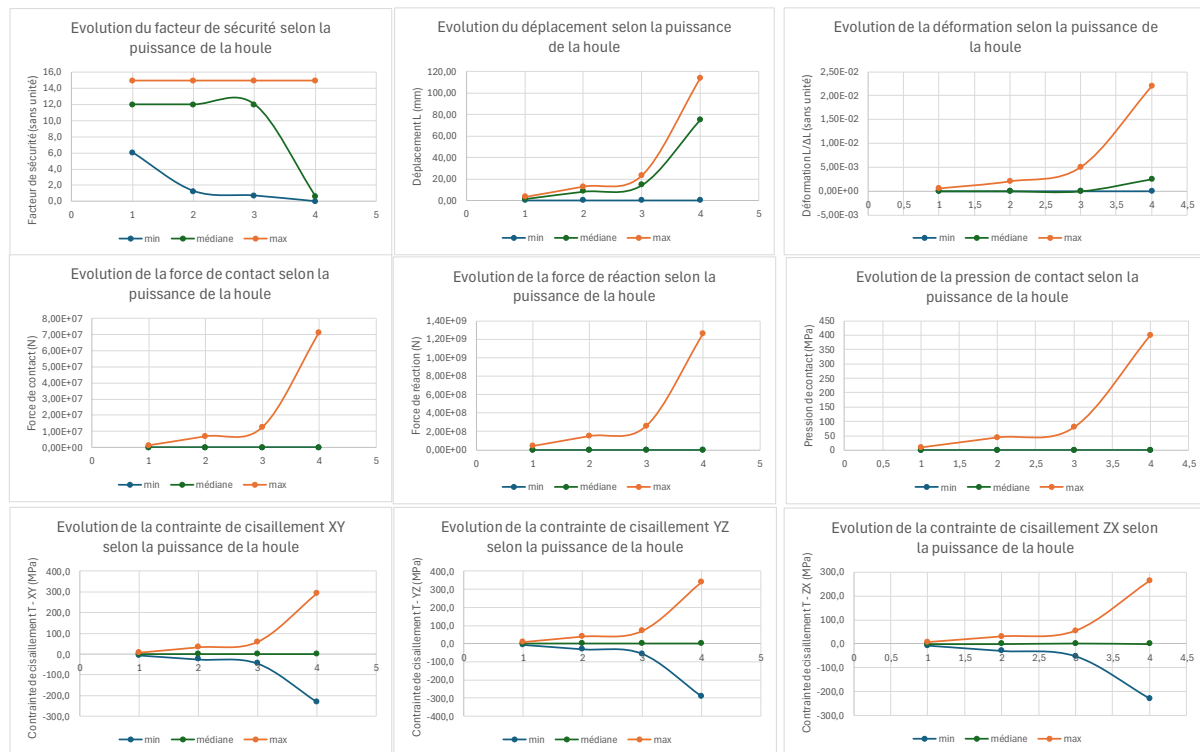


Figure 45 - Représentations graphiques des résultats de l'étude de variation des conditions

Il est intéressant de remarquer que le facteur de sécurité minimum va être inférieur à un facteur 1 à partir des conditions de houle maximale. Le déplacement et la déformation vont augmenter drastiquement entre les conditions maximum et les conditions paroxysmales. Les résultats des forces de réaction et de contact ainsi que la pression de contact sont sur la structure globalement nulles ; ainsi la médiane est, de même, quasiment nulle alors que les valeurs maximales, localisées sur des zones précises de la structure - comme remarqué dans l'étude de variation de la structure - vont augmenter drastiquement entre les conditions moyennes et les conditions paroxysmales.

11 Discussion

Des biais existent dans ces simulations et résultats. La fixation numérique étant strictement à 100% d'immobilisation des faces choisies, induit des erreurs notamment dans l'emplacement de la force de réaction et n'est pas représentative de l'immobilisation des structures dans la réalité de terrain. Il serait intéressant d'étudier le maillage du modèle 3D pour déterminer l'impact de celui-ci sur les valeurs de force de réaction. Le substrat sableux ne peut pas être correctement représenté, il n'y a donc pas de représentation des effets d'enfouissement, de lessivage et d'accrétion dans les résultats de déplacement et de déformation. De plus, ne pas pouvoir modéliser un assemblage complet de plusieurs modules, dus aux limites de la carte graphique, ne permet pas d'avoir une visualisation de résultats réels des contraintes sur un assemblage de module.

Pour l'étude de variation de la structure, d'après les résultats de cette étude, il n'y aura pas de descente de charge mais un cisaillement important, c'est donc l'assemblage et l'ancrage qui va engendrer un cisaillement sur une zone ou une autre selon la solution choisie. D'autres solutions d'assemblages pourraient être envisagées comme des pieux en cône pour s'assurer l'ajustement du jeu, un pieu central au milieu du UpBlock®, écarter les points d'ancrage des pieux pour les rapprocher des 4 coins du UpBlock® ou bien un système de chaîne ou de câble pour maintenir l'ensemble des UpBlocks® avec des ancrages (A.L.Hocine, Ingérop, comm. pers.).

Il est envisageable d'ajouter des œillets pendant l'impression 3D des UpBlock® pour rendre solidaires les œillets aux UpBlocks® et renforcer leurs liens (J.Lesot, 3DConcrete, comm. pers.).

12 Conclusion

À la suite des réunions avec Ingérop et aux discussions en interne chez Lineup Ocean, deux stratégies d'ancrage sont retenues pour continuer d'être explorées par approche analytique et numérique. La première serait d'améliorer le système d'ancrage avec les pieux d'assemblage comme pour le cas 3 de la première étude de ce compte rendu. La deuxième serait d'étudier un ancrage par chaîne ou câble avec des œillets intégrés aux UpBlocks® lors de l'impression. Les études de stabilisation et d'ancrage des UpBlocks® vont par la suite être menées par les équipes d'ouvrage maritime d'Ingérop en tant que partenaire de Lineup Ocean. Ainsi, l'étude de variation de la structure aura permis de démarrer les discussions de stabilisation et d'ancrage entre Lineup Ocean et Ingérop et de montrer des premières solutions envisagées par Lineup Ocean pour assembler et ancrer les modules d'UpBlock® entre eux. L'étude de variation des conditions sera exploitée par Lineup Ocean comme ordre de grandeur d'effort sur la structure pour d'autres études ou discussions, pour pouvoir étudier par exemple la fatigue dans le temps d'un module UpBlock®. Ces études sont accompagnées d'un livrable pour l'entreprise expliquant la démarche à suivre pour réaliser une simulation sur Fusion Autodesk 2.0® similaire aux études décrites.

13 Retour d'expérience

13.1 Perspective d'amélioration

Ce projet de simulation des efforts sur une structure immergée aurait pu, avec des moyens informatiques plus avancés, être plus développée, notamment en simulant un assemblage entier de modules. Un matériel plus avancé aurait aussi permis d'envisager l'utilisation de logiciels plus spécifiques à l'étude de structures immergées. Avec les outils utilisés pour ce projet, une amélioration possible, en envisageant plus de temps, serait d'analyser le maillage de la simulation.

13.2 Bilan personnel

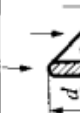
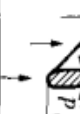
Personnellement, ce stage s'inscrit dans mon parcours universitaire et professionnel comme lien entre mes études. Ayant commencé celles-ci par un Bachelor de Technologie aux Arts et Métiers (ENSAM) d'Angers, formation orientée vers l'ingénierie mécanique, j'ai continué mon cursus avec une formation d'ingénieur en aménagement et environnement spécialisée en Ingénierie des milieux aquatiques (IMA) à Polytech Tours. Ce parcours me permet de réunir des connaissances en mécanique avec une expertise de gestion environnementale des milieux aquatiques. Ainsi, bien que la mission de ce stage demandait plus d'apport de mes connaissances en mécanique, la mission de l'entreprise Lineup Ocean et le milieu foreshore de l'étude nécessitait une connaissance en gestion environnementale.

Traduit à travers l'état de l'art, ce stage m'aura permis d'améliorer mes connaissances sur les milieux littoraux français et sur la gestion des zones foreshore ainsi que de toute structure immergée. Je considère que ces connaissances des milieux littoraux est un apport fort pour la suite de mon parcours professionnel. En effet, je cherche aujourd'hui à utiliser mes connaissances en conception et en mécanique, acquises lors de mon Bachelor, pour la gestion et la protection de milieux naturels aquatiques au sein d'instituts, de fédérations ou de conservatoires ayant comme rôle la gestion d'espaces naturels.

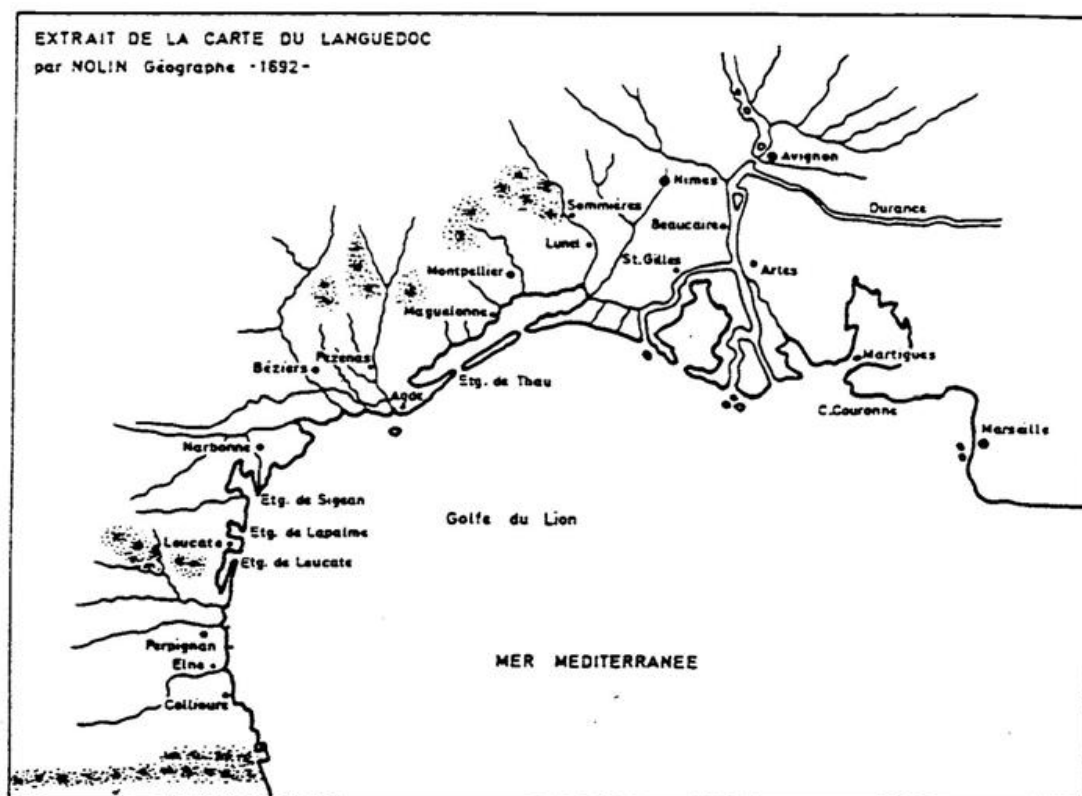
Être au sein d'une start-up m'a aussi permis d'avoir un nouveau point de vue sur le monde du travail et le management des équipes. Cette expérience m'aura permis de définir plus précisément mes attentes et envies en termes de responsabilité sociétale des entreprises et de qualité de vie au travail que peut offrir une société employeur.

14 Annexes

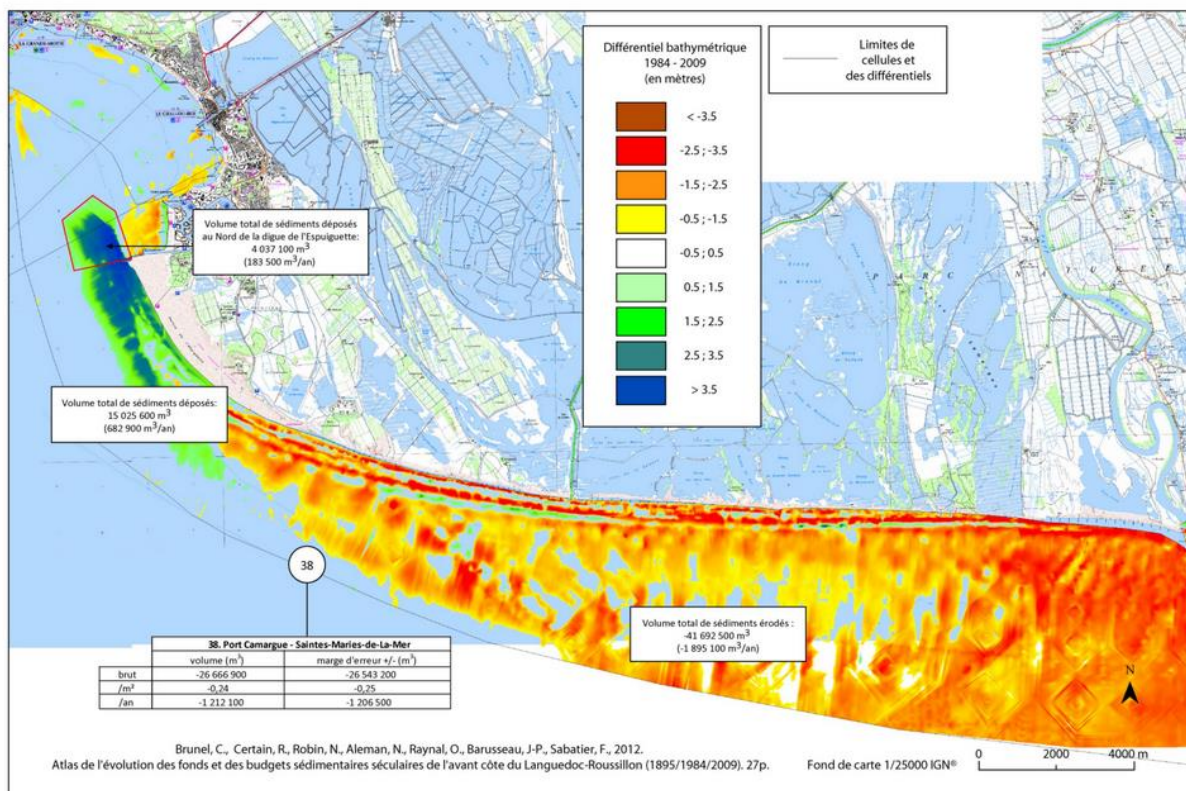
Coefficients de pénétration dans l'air c_x

Forme du solide	c_x	Forme du solide	c_x
 Disque, plaque	1,1	 Barre cylindrique	
 Demi-sphère creuse, parachute	1,4	$Re < 200\ 000$	1,0
 Sphère		$Re > 450\ 000$	0,35
$Re < 200\ 000$	0,45	 Plaque longue	
$Re > 250\ 000$	0,20	$l : d = 30$	0,78
 Corps aérodynamique profilé	0,05	$Re = 500\ 000$	0,66
$l : d = 6$		$Re = 200\ 000$	
		 Tronçon d'aile	
		$l : d = 18$	0,2
		$l : d = 8$	0,1
		$l : d = 5$	0,08
		$l : d = 2$	0,2
		$Re = 10^6$	
		$Re = 2 \cdot 10^5$	

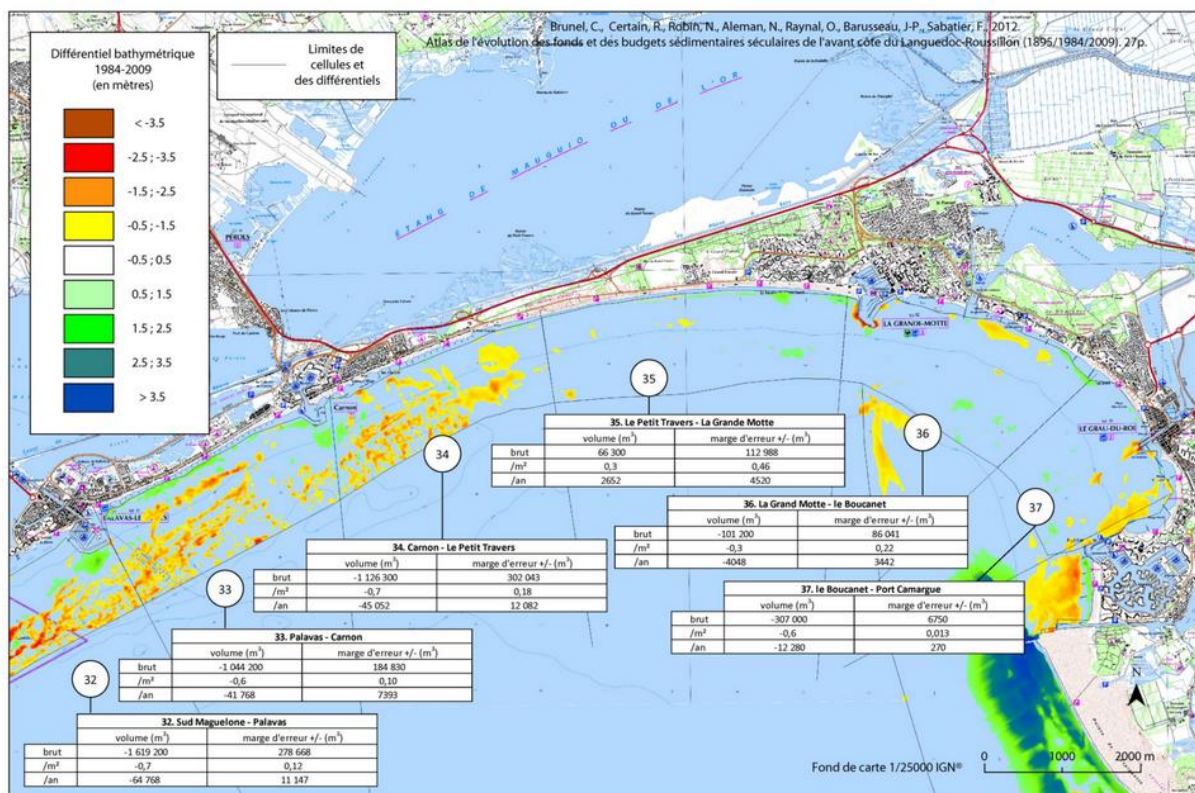
Annexe 1 - Exemple de l'évolution de coefficient de trainée, ici nommée C_x , selon la forme du solide, d'après B.Munson, D.Young and T.Okiishi (1998)



Annexe 2 - Carte du Languedoc en 1692, par Nolin (L.C.H.F, 1984), d'après R.Certain (2002)

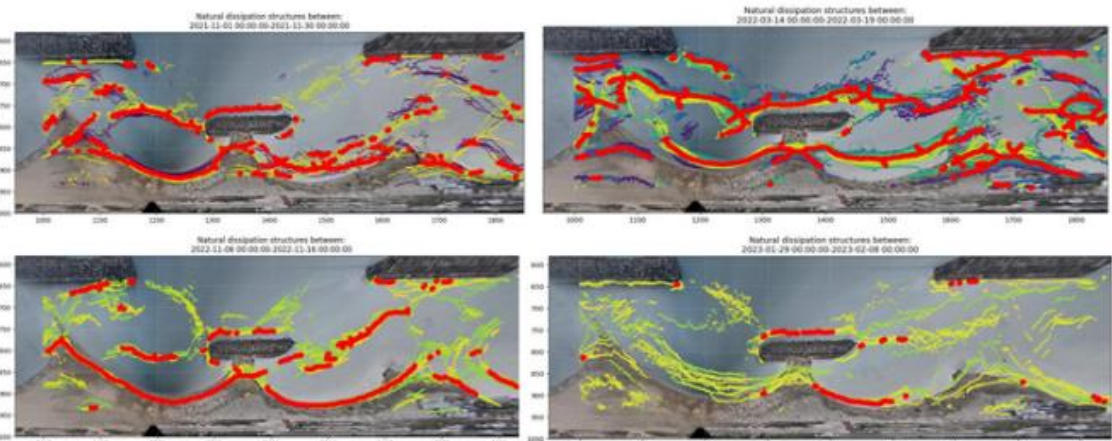


Annexe 3 - Différentiel bathymétrique de 1984 à 2009 à l'Espiguette, d'après C.Brunel and al. (2012)

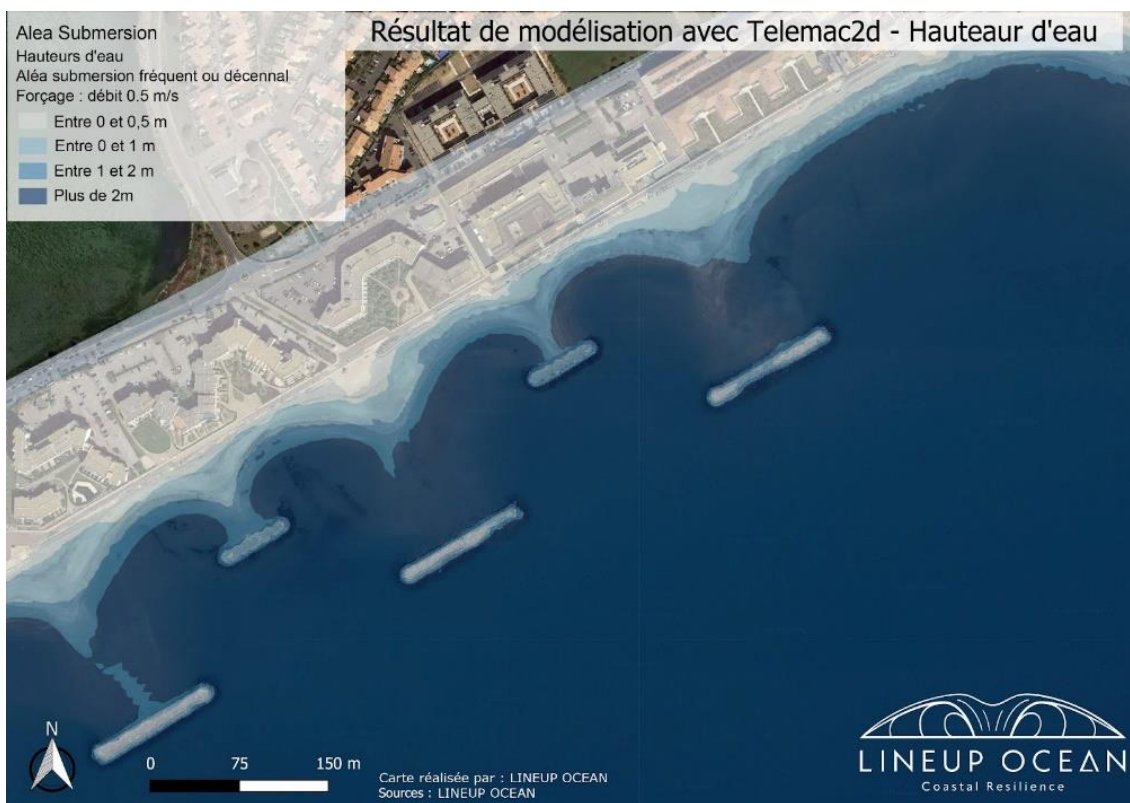


Annexe 4 - Différentiel bathymétrique de 1984 à 2009 à Palavas-les-Flots, d'après C.Brunel and al. (2012)

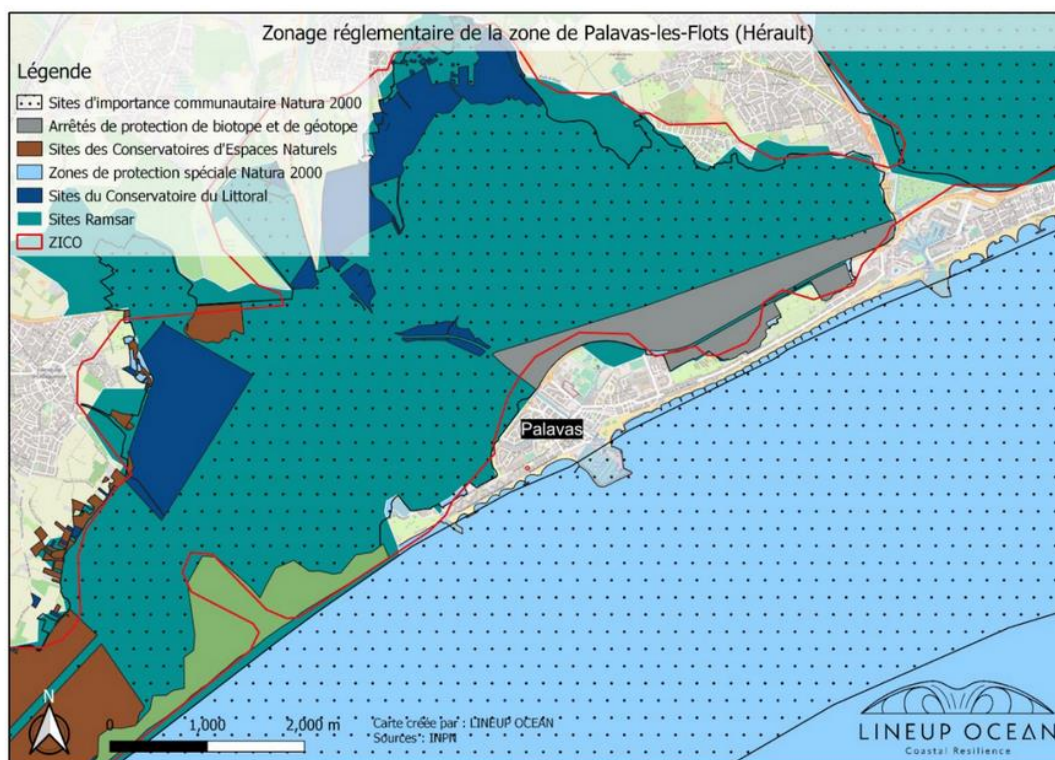
2021 - 2022
2022 - 2023



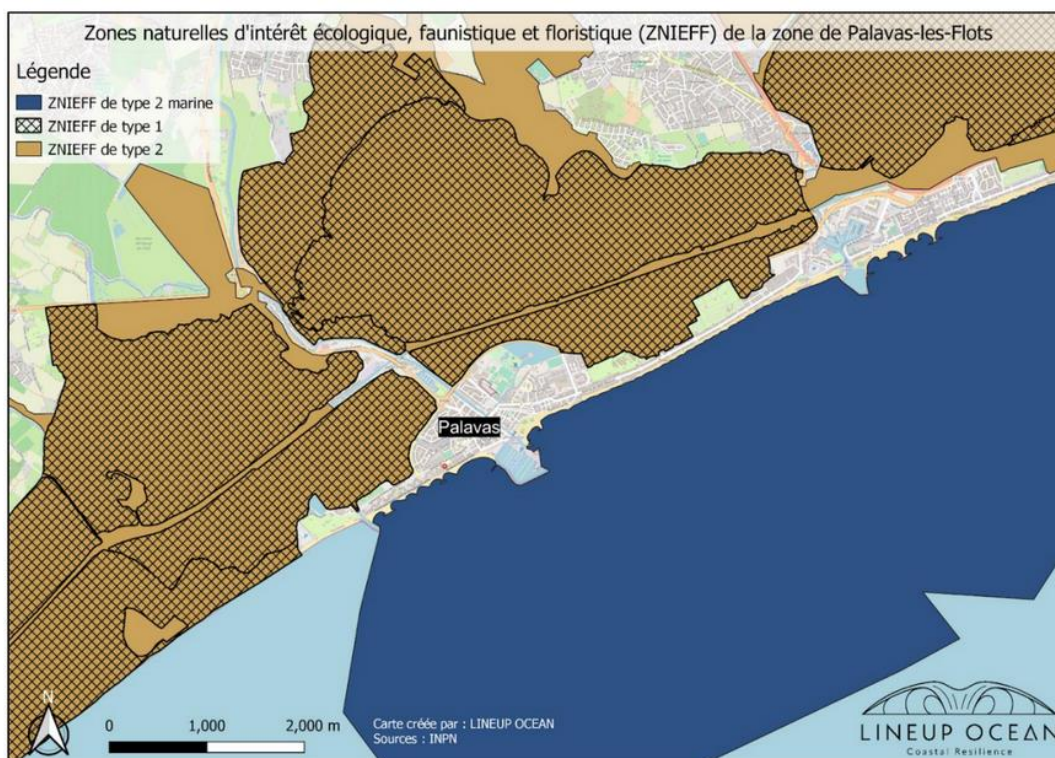
Annexe 5 - Exemple de résultats de suivi avec les WaveCams®



Annexe 6 - Risque de submersion de la côte de Palavas-les-Flots, d'après Lineup Ocean (2021)



Annexe 7 - Zonage réglementaire de la zone de Palavas-les-Flots, d'après Lineup Ocean (2021)



Annexe 8 - ZNIEFF de la zone de Palavas-les-Flots, d'après Lineup Ocean (2021)

15 Bibliographie

15.1 Entreprise

Ministère de l'économie des finances et de la souveraineté industrielle et numérique EFSIN. (2022, November 10). Que sont les sociétés à mission ? | [economie.gouv.fr](https://www.economie.gouv.fr/cedef/societe-mission). [economie.gouv.fr](https://www.economie.gouv.fr/cedef/societe-mission). <https://www.economie.gouv.fr/cedef/societe-mission>

GIEC. (2018). Annexe I: Glossaire [Matthews, J.B.R. (éd.)]. Dans: Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte [Publié sous la direction de V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield]. Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, 32 p.

Lineup Ocean. (2024). Lineup. LINEUP OCEAN. <https://www.lineup-ocean.com/lineup>

Montpellier3m. (2023, October 18). Dossier de presse : Halle de l'innovation. [montpellier3m. \[https://www.montpellier3m.fr/sites/default/files/2023-09/20231018-dp_halle_de_linnovation_bd.pdf\]\(https://www.montpellier3m.fr/sites/default/files/2023-09/20231018-dp_halle_de_linnovation_bd.pdf\)](https://www.montpellier3m.fr/sites/default/files/2023-09/20231018-dp_halle_de_linnovation_bd.pdf)

Gerard, A., Thouard, E., Veron, G., Denis, J., & Thebaud, O. (2008, January 1). *Les récifs artificiels - Etat des connaissances et recommandations*. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/6533/>

15.2 Dynamique sédimentaire

Bird, E.C.F. (1985). *Coastline Changes*. Wiley Interscience, Chichester.

Vivier, B., Dauvin, J., Navon, M., Rusig, A., Mussio, I., Orvain, F., Boutouil, M., & Claquin, P. (2021). Marine artificial reefs, a meta-analysis of their design, objectives and effectiveness. *Global Ecology and Conservation*, 27, e01538. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01538>

Cowell, P., Roy, P., & Jones, R. (1995). Simulation of large-scale coastal change using a morphological behaviour model. *Marine Geology*, 126(1–4), 45–61. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(95\)00065-7](https://doi.org/10.1016/0025-3227(95)00065-7)

Castelle, B., & Masselink, G. (2022). Morphodynamics of wave-dominated beaches. *Cambridge Prisms Coastal Futures*, 1. <https://doi.org/10.1017/cft.2022.2>

Phillips, O. M. (1957). On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics*, 2(05), 417. <https://doi.org/10.1017/s0022112057000233>

Choblet, C. (2005, June 17). *Espace littoral et décisions d'aménagement, Limites et potentialités des études d'impact et des enquêtes publiques. Exemple du littoral atlantique français*. <https://theses.hal.science/tel-00010191>

Ottmann, F. (1965). Introduction to marine and littoral Geology. *Edi [1] tion Masson and Cie*, 81-114. R.Certain, 2002,

Cowell, P. J., Hanslow, D. J. and Meleo, J. F. (1999). The shoreface. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*, Short, A. D. (dir.), John Wiley & Sons, 39-71 p.

Dehouck, A. (2006, October 3). *Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise (Finistère)*. <https://theses.hal.science/tel-00109373>

15.3 Mécanique des fluides

Munk, W. H. (1950). Origin and generation of waves. *Coastal Engineering Proceedings*, (1), 1-1.

ISIN, I. Y. A. (2007). HOULES FONDAMENTALES ET EFFETS HYDRODYNAMIQUES.

Sheng, Y. P. (2000). Physical characteristics and engineering at reef sites. *Artificial reef evaluation with application to natural marine habitats*, 51-94.

Yang, M., Tang, Y., Zhao, F., Xu, S., & Fang, G. (2022). Numerical Simulation of Local Scour Around Square Artificial Reef. *OMAE 2022*. <https://doi.org/10.1115/omae2022-78941>

Morison, J. R., Johnson, J. W., & Schaaf, S. A. (1950). The force exerted by surface waves on piles. *Journal of Petroleum Technology*, 2(05), 149-154.

Kim, T. I. (1981). Wave forces on submerged artificial reefs fabricated from scrap tires. l'université de DelaWare

Mebarek-Oudina, F., Laouar, A., & Boudiaf, M. (2013). Numerical Simulation of the Flows around two Cylinders of Different Diameters.

J.Dinh et C.Koriba (2014). Étude des efforts de l'eau sur une barrière sous-marine de protection anti-requins.

V.Kitsikoudis et al. (2017). Clear-water scour and flow field alteration around an inclined pile. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.09.001>

M.Debacq (2020). Interactions fluide/solide. <https://hal.science/hal-02444412>

B.Munson, D.Young and T.Okiishi (1998). Fundamentals of Fluid Mechanics. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.

15.4 Biologie

M.J.Anderson and A.J.Underwood. (1994) Effects of substratum on the recruitment and development of an intertidal estuarine fouling assemblage

O'Reilly, L. M., & Willerth, S. M. (2024). Evaluating the biocompatibility of ceramic materials for constructing artificial reefs. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1292584>

Ly, O., Yoris-Nobile, A. I., Sebaibi, N., Blanco-Fernandez, E., Boutouil, M., Castro-Fresno, D., ... & Stafford, R. (2021). Optimisation of 3D printed concrete for artificial reefs: Biofouling and mechanical analysis. *Construction and Building Materials*, 272, 121649.

Georges, M. (2021). *Interaction entre le matériau cimentaire et les micro-organismes marins* (Doctoral dissertation, Normandie Université).

SOUCHE, J. C., SALGUES, M., PIOCH, S., & DE WEERDT, K. R-029 L'ÉCOCONCEPTION MARITIME: LE PARAMÈTRE MATÉRIAUX. *NoMaD 2018*.

Cépralmar, R. L. R. (2015). Guide pratique d'aide à l'élaboration, l'exploitation et la gestion des récifs artificiels en Languedoc-Roussillon. *Languedoc-Roussillon, France, 236p*.

Nguyen, D. H., Boutouil, M., Sebaibi, N., Baraud, F., & Leleyter, L. (2017). Durability of pervious concrete using crushed seashells. *Construction and Building Materials, 135*, 137-150.

Ruslan, H. N., Muthusamy, K., Mohsin, S. M. S., Jose, R., & Omar, R. (2022). Oyster shell waste as a concrete ingredient: A review. *Materials Today: Proceedings, 48*, 713-719.

Zeghad, M. (2018). *Recyclage des déchets inorganiques dans les nouveaux bétons: bétons autoplaçants (BAP), bétons fibrés ultra-hautes performances (BFUHP)* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

Hasan, M., Saidi, T., Muyasir, A., Alkhaly, Y. R., & Muslimsyah, M. (2020, September). Characteristic of calcined diatomaceous earth from Aceh Besar District-Indonesia as cementitious binder. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 933, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.

15.5 Gestion du Golfe du Lion

DREAL. (2020 June). ETUDE POUR LA GESTION DES SEDIMENTS DU LITTORAL D'OCCITANIE. Rapport n°CI-19027-A Phase 1-rev03.

C. Brunel, R. Certain, N. Robin, N. Aleman, O. Raynal, J-P. Barusseau et F. Sabatier. (2012). Atlas de l'évolution des fonds et des budgets sédimentaires séculaires de l'avant côte du Languedoc-Roussillon 1895 / 1984 / 2009. CEFREM, Université de Perpignan Via Domitia (UPVD), LMUSCA.



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Aurore BROSSERON
2023-2024

Stage éco-conception : simulation mécanique

Résumé : Ce document décrit les recherches de mon stage de 4^{ème} année du cycle ingénieur dans le cadre de la formation IMA à Polytech Tours. Pour ce stage j'ai eu l'opportunité de rejoindre l'équipe de Lineup Ocean, société à mission à Montpellier (34), dont la mission est *d'aider les communautés littorales à anticiper la résilience côtière*. Pour cela l'entreprise conçoit des structures de protection côtière éco-responsables, en cherchant à avoir un impact minime sur les écosystèmes et l'environnement. Ma mission fut de réaliser un protocole d'étude par simulation des efforts mécaniques appliqués aux structures immergées en statique, sur Autodesk Fusion et d'appliquer ce protocole à deux études de cas.

Cette expérience m'a permis de développer mes connaissances sur les milieux marins, les pressions politiques, environnementales et physiques que connaissent ces milieux naturels et les espèces qu'elles abritent. Les projets que j'ai découverts m'ont permis de voir les avantages, les inconvénients, les contradictions ainsi que les critiques qui peuvent être attribuées à un projet techno-solutionniste éco-responsable dont le but final est intrinsèquement lié à la préservation de ces milieux naturels sensibles. Pour conclure, ce stage m'a permis de développer mes capacités de recherche et de rédaction pour un état de l'art complet, et mes capacités à prendre en compte les différents point de vue et les enjeux politiques entourant un projet lié à un environnement naturel.

Abstract : During this first year of IMA's master at Polytech Tours, I had the opportunity to do an internship at Lineup Ocean, in Montpellier (34). This startup's mission is to *support and prepare coastal communities and their populations for Coastal Resilience*. To fulfill this mission, they develop eco-friendly structural protection inspired by natural structure such as mangrove and coral barrier. These structures are multi purposes, they are protecting against coastal erosion, can help rehabilitate marine ecosystems and help the development of eco-responsible activities, to transfer the pressure on some well know ecological spot that suffer of mass tourism). My mission was to develop a method to study mechanical forces applied on the immersed structures with simulation software, Autodesk Fusion and to apply it to 2 studies case.

With this internship I had the opportunity to develop my knowledge on marine problematics and to discover so much information related to the subject of marine eco-friendly development. So many projects where I learned the pros and cons express by different actors or subject that weren't anticipated that appear to be very interesting to solve. To conclude it had helped me to develop my capacity of research and writing skills for a state of the art, as well as my capacity to think about all perspectives and politics surrounding a project.

Mots Clés : Simulation 3D ; modélisation ; Autodesk Fusion ; corail artificiel ; structures immergées

Lineup Ocean :

Halle de l'innovation, 10 place Françoise Héritier, 34000 Montpellier

Tuteur entreprise : Robin ALAUZE

Président, Fondateur et Chef de Projets R&D

Tuteur académique : Vincent ROTGE