

Rapport de Projet Scientifique et Technique

Eco-conception d'un immeuble flottant



Saad BEN AICHA

Martin MURE

Tuteurs : Emmanuel Mignot, Okba Mostefaoui

Table des matières

1 Remerciements	2
2 Introduction	3
2.1 Mise en contexte	3
2.2 Cahier des charges	3
2.3 Planning	3
2.4 Etat de l'art	4
3 Méthodes	4
3.1 Etude de la flottation et de la stabilité	4
3.2 Choix du matériau	5
3.3 Dimensionnement de l'immeuble	5
3.4 Conception de la maquette et Tests expérimentaux	5
3.5 Etude de l'habitabilité	6
3.6 Etude de la consommation d'énergie	6
3.7 Analyse du cycle de vie	7
4 Résultats	7
4.1 Flottation et stabilité de l'immeuble	7
4.2 Résultat du choix du matériau	7
4.3 Dimensionnement de l'immeuble	8
4.4 Energie et habitabilité	8
4.5 Analyse du cycle de vie	8
4.6 Résultats test expérimentaux et maquette finale	9
5 Discussion	9
5.1 Limites de nos modèles	9
5.2 Choix du matériau	9
5.3 Maquette	10
5.4 Impact envrionemental	10
6 Conclusion	10
Bibliographie	12
7 Annexe	13
7.1 Annexe 0 : Carte Montée des eaux	13
7.2 Annexe 1 : Cahier des charges fonctionnelles	14
7.3 Annexe 2 : Carte mentale immeuble flottant	14
7.4 Annexe 3 : Planning detaillé	17
7.5 Annexe 4 : Etat de l'art exhaustif	18
7.6 Annexe 5 : Développement théorique	20
7.6.1 Flotaison :	20
7.6.2 Stabilité :	20
7.7 Annexe 6 : Resultats de la stabilité	22
7.8 Annexe 7 : Protocole expérimental follataison et stabilité	23
7.9 Annexe 8 : Sélection du matériau par méthode d'Ashby	24
7.10 Annexe 9 : Détails des freins à l'utilisation des bâtiments en bois	28
7.11 Annexe 10 : Définition des indices de performance	29
7.12 Annexe 11 : Code python	30
7.13 Rapport Zotero	30
8 Déclaration éthique	43

1 Remerciements

Dans un premier temps, nous tenons à remercier Emmanuel Mignot et Okba Mostefaoui pour leur accompagnement tout au long de ce projet. Nous tenons également à remercier Romain Bernia pour les ressources mises à disposition et son soutien lors de la fabrication de la maquette. Enfin, un grand merci au département GM pour la mise à disposition des locaux et du matériel.

2 Introduction

2.1 Mise en contexte

L.A.G.O.N. (Logements Aquatiques et Gestion d’Ouvrages Nautiques)¹ est une entreprise lyonnaise spécialisée dans la conception, le dimensionnement et la production de véhicules et structures fluviales et océaniques. Initialement spécialisée dans la production de yachts de croisière et de jet-skis, l’entreprise aspire désormais à diversifier ses activités en se tournant vers des solutions plus écoresponsables.

Dans ce cadre, LAGON a répondu à un appel d’offres lancé par le réputé cabinet d’architecture Waterstudio.NL, afin d’effectuer une étude de faisabilité destinée à construire un immeuble flottant dans le quartier flottant d’IJburg à Amsterdam. Le cabinet a, par exemple, réalisé des projets comme le théâtre de l’île Ô sur le Rhône à Lyon (Figure 1), ainsi que de nombreuses maisons et villas flottantes aux Pays-Bas et dans les Caraïbes (1). À travers cette réponse à l’appel d’offres, LAGON satisfera les besoins du client en assurant la conception et le dimensionnement d’un immeuble flottant à faible empreinte carbone.

Lors de ce projet, nous tenterons de répondre à nos hypothèses, à savoir qu’un immeuble peut flotter stablement avec une répartition de masse optimisé et qu’un matériau plus écologique que le béton peut être utilisé pour construire notre immeuble.

Nous verrons donc dans ce rapport de quelle manière concevoir un immeuble flottant à taille réelle, puis le prototyper à échelle réduite, tout en garantissant qu’il soit durable, stable et capable de répondre aux contraintes environnementales et climatiques actuelles.



FIGURE 1 – Théâtre l’Île Ô sur le Rhône, à Lyon

2.2 Cahier des charges

Afin de répondre au mieux à nos hypothèses et aux besoins du client, nous avons reformulé l’appel d’offres publié par Waterstudio.NL en un cahier des charges techniques, que nous avons transmis à notre bureau d’études et que vous pouvez retrouver en (Annexe 7.2). Grâce à ce cahier des charges, nous avons défini les fonctions principales de l’immeuble :

- FP1 : Assurer la flottabilité et la stabilité de l’immeuble
- FC1 : Respecter les contraintes dimensionnelles du client
- FC2 : Garantir l’habitabilité de l’immeuble
- FC3 : Valider la conception avec un test à échelle réduite
- FC4 : Assurer un immeuble à faible impact environnemental réaliste

De plus, pour représenter plus visuellement ces contraintes, nous avons confectionné une carte mentale reprenant les sujets abordés dans ce rapport (Annexe 7.3).

2.3 Planning

Une fois le cahier des charges reçu, nous avons planifié les grandes étapes de notre projet et déterminé les actions à réaliser pour répondre au mieux aux besoins du client (Annexe 7.4) :



FIGURE 2 – Planning des étapes du projet

1. L.A.G.O.N. : entreprise fictive que nous avons créée.

2.4 Etat de l'art

En raison du dérèglement climatique, William Llovel a estimé que le niveau des mers et des océans augmentera en moyenne de 10 à 20 cm d'ici 2100 (2). C'est pourquoi, plusieurs projets de structures flottantes ont déjà vu le jour. Par exemple, aux Pays-Bas, les quartiers flottants d'habitations de Schoonschip à Amsterdam et de Waterbuurt à La Haye existent. De plus, en Corée du Sud, la construction du quartier flottant d'Oceanix Busan, situé sur une plateforme flottante de 30 000 m², commencera en 2025 (3) (4).



FIGURE 3 – Quartier de Schoonschip à Amsterdam



FIGURE 4 – Concept Oceanix Busan

Ces projets reposent sur des flotteurs avec une faible profondeur immergée, ce qui limite leur stabilité pour des structures plus hautes. Toutefois, des solutions techniques utilisées sur ces projets peuvent nous être utiles. Par exemple, un système intégré de récolte, de filtration, de recyclage et de distillation de l'eau, ainsi qu'une production d'énergie issue de sources renouvelables telles que le solaire, l'éolien et la houle, ont été mis en place à Oceanix Busan pour garantir la neutralité carbone du projet. Ces technologies pourraient être particulièrement utiles dans notre projet, car nous souhaitons garantir une autonomie énergétique à notre immeuble. Enfin, une étude de l'art plus exhaustive des projets et technologies flottants, que nous avons utilisée pour construire notre immeuble, est disponible en annexe (Annexe 7.5).

3 Méthodes

3.1 Etude de la flottaison et de la stabilité

Tout d'abord, nous avons cherché à comprendre les critères permettant de déterminer la stabilité et la flottabilité de notre immeuble. Grâce aux vidéos de l'académie de Montpellier (5) (6), nous avons identifié les paramètres mécaniques à calculer afin de garantir la flottaison et la stabilité de l'immeuble : *Poids*, *Géométrie de l'immeuble*, *Poussée d'Archimède*, *Moment* et *Barycentre*.

Les conditions de stabilité du bâtiment flottant sont résumées dans le tableau suivant :

Condition de flottabilité	Condition de stabilité statique
<p>La poussée d'Archimède F_a doit être supérieure au poids total du bâtiment P :</p> $F_a = \rho g V_{\text{eau-déplacée}} \quad \text{et} \quad P = \sum_{i=1}^n \rho_{s,i} g V_{s,i}$ <p>Pour que le bâtiment flotte :</p> $m_{\text{immeuble}} < \rho V_{\text{eau-déplacée}}$	<p>Le couple de redressement M_r, généré par la poussée d'Archimède, doit être positif pour garantir la stabilité après une inclinaison :</p> $M_r = \rho g V_{\text{eau-déplacée}} \cdot h \cdot \sin(\theta)$ <p>La condition est satisfaite si :</p> <ul style="list-style-type: none"> — $h > 0$: le centre de masse est sous le centre de carène, — $\rho g V_{\text{eau-déplacée}} > P$.

TABLE 1 – Résumé du développement théorique (Annexe 7.6)

Grâce à ces paramètres et conditions, nous avons pu estimer avec un script Python l'angle de chavirement, le tirant d'eau, la masse maximale de l'immeuble et la répartition de masse dans l'immeuble nécessaire à la stabilité du bâtiment.

3.2 Choix du matériau

Pour sélectionner un matériau écologique, nous avons appliqué la méthode d'Ashby, méthode développée par Michael F. Ashby en 1992 et détaillée dans un document rédigé par des enseignants de l'UTC (7). Cette méthode repose sur la définition d'indices de performance, que l'on va venir optimiser pour obtenir le matériau le plus adapté à notre besoin. Ainsi, nous avons défini 4 indices de performance en utilisant les concepts de la résistance des matériaux (Annexe 7.11) :

- Critère 1 : Le matériau doit être recyclable. Ce critère est aligné avec notre objectif de concevoir un immeuble bas carbone.
- Indice 1 : Le matériau doit être rigide et bas carbone ($I_p = \frac{E}{CO_2eq}$)
- Indice 2 : Le matériau doit être résistant et bas carbone ($I_p = \frac{\sigma_y}{CO_2eq}$)
- Indice 3 : Le matériau doit être résistant à l'eau pour garantir la durabilité de l'immeuble dans un environnement humide.
- Indice 4 : Le matériau doit être économique et bas carbone ($I_p = \frac{Price}{CO_2eq}$)

Puis, nous avons tracé un diagramme d'Ashby par indice, ce qui nous a permis d'obtenir le matériau répondant le mieux à notre besoin (Annexe 7.9).

3.3 Dimensionnement de l'immeuble

Une fois le matériau sélectionné, nous avons vérifié qu'un immeuble à taille réelle est capable de résister aux différentes sollicitations. Pour cela, nous avons défini les forces agissant sur notre immeuble :

Types d'efforts	Nom de l'effort	Valeur
Efforts extérieurs	Poids	526,4 t
	Force du vent (252km/h = cyclone)	600 000 N
	Effort admissible par étage	250 kg/m ²

TABLE 2 – Efforts appliqués sur l'immeuble

Puis, nous avons modélisé notre immeuble sur le logiciel de CAO Solidworks, afin de déterminer la contrainte de Von Mises maximale appliquée sur l'immeuble. Cet outil servira à vérifier que la contrainte de l'immeuble reste inférieure à la limite élastique ($\sigma_y > \sigma_{immeuble}$).

3.4 Conception de la maquette et Tests expérimentaux

Dans un premier temps, nous avons imprimé en 3D un premier prototype de notre immeuble en plastique PLA, afin de valider des paramètres comme l'angle de chavirement ou le tirant d'eau² de notre simulation Python (Annexe 7.12). De plus, un protocole expérimental détaillé a été rédigé (Annexe 7.8).

2. Tirant d'eau : hauteur de la partie immergée de l'immeuble



FIGURE 5 – Prototype de l'immeuble en plastique (60g)



FIGURE 6 – Lestage en acier (410g)

Dans un second temps, nous avons conçu sur CAO, puis fabriqué un premier prototype réaliste à l'échelle 1 :100 de l'immeuble. Pour ce faire, nous avons utilisé :

- Une découpeuse laser pour fabriquer les murs et les étages du bâtiment en bois contreplaqué, ainsi que les vitres en plexiglas
- Une découpe jet d'eau pour fabriquer les tôles d'acier utilisées pour le lestage de l'immeuble
- Une imprimante 3D pour fabriquer le cadre des fenêtres, les balcons, les escaliers de secours, le bac de lestage et le toit de l'immeuble
- Du vernis, de la colle à bois et des joints pour assembler et garantir l'étanchéité de la maquette

3.5 Etude de l'habitabilité

Notre structure offre un espace limité. Nous avons donc réfléchi à une optimisation de l'espace. Notre immeuble est donc divisé en 8 étages de $100m^2$:

- 5 étages habitables
- 2 étages de vie commune
- 1 étage de stockage
- 1 étage composé de locaux techniques

Pour répondre aux enjeux environnementaux, une démarche de sobriété doit être mise en place. Notre méthode est simple : mutualiser les ressources comme l'électroménager (frigo centralisé, cuisine commune). De plus, nous avons décidé d'installer de grandes baies vitrées pour utiliser moins d'éclairage artificiel. En outre, chaque appartement est composé de 5 chambres de $10m^2$, d'une salle d'eau et d'un salon pour assurer un bon confort de vie.

3.6 Etude de la consommation d'énergie

Une fois que les besoins des habitants sont établis, nous pouvons estimer la quantité d'énergie nécessaire au fonctionnement de l'immeuble. D'après les statistiques de la société ENGIE (8), nous avons pu estimer les dépenses énergétiques de notre immeuble :

Types de dépenses	Consommation pour 15 jours
Chauffage pour $100m^2$	28,9 kWh/jour/étage
Eau chaude	5,6 kWh/jour/appartement
Cuisson	3,2 kWh/jour/appartement
Autres (éclairage, électronique, électroménager)	8,7 kWh/jour/étage
Propulsion de l'immeuble	Utilisation de remorqueur (non pris en compte)

TABLE 3 – Cahier des charges fonctionnelles

Grâce à ces données, nous avons pu estimer l'impact des démarches de sobriété que nous avons appliquées dans notre immeuble.

3.7 Analyse du cycle de vie

Notre objectif est de comparer l'impact écologique des alternatives au béton. Pour ce faire, nous réalisons une analyse du cycle de vie des deux matériaux à l'aide du logiciel Granta Edupack. Cette analyse prend en compte les critères suivants :

- Procédés de fabrication du composant
- Procédés d'assemblage et finition du composant
- Transport des matières premières et transformées
- Durée de vie de l'immeuble
- Fin de vie

Grâce à cette analyse du cycle de vie, nous pouvons évaluer la pertinence de notre choix de matériau.

4 Résultats

4.1 Flottation et stabilité de l'immeuble

Les résultats de notre simulation Python sont les suivants (Figure 7) :

- Pour garantir qu'une partie de l'immeuble reste émergée, la masse doit être inférieure à 4500 tonnes. Nous estimons que la masse de notre immeuble sera de 2176 tonnes.
- Le centre de masse doit être situé sous le centre de carène pour garantir un angle de chavirement de 90° (Annexe 7.7).
- Le tirant d'eau de notre maquette sera situé à 19 mètres pour une hauteur totale de l'immeuble de 45 mètres. Ainsi, 58% de notre immeuble sera émergé.

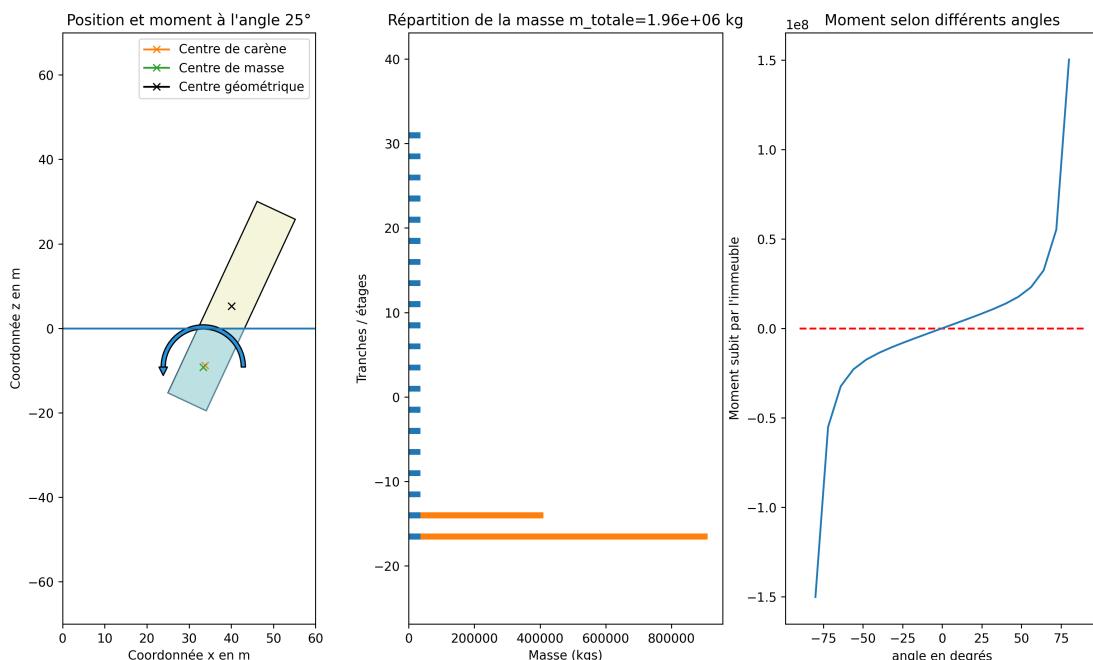


FIGURE 7 – (A) Moment subi par l'immeuble. (B) Répartition de la masse. (C) Évolution du moment de redressement selon l'angle.

4.2 Résultat du choix du matériau

En appliquant la méthode Ashby de sélection des matériaux, nous trouvons que le **bois de mélèze** est le matériau qui répond le mieux à notre besoin (Annexe 7.9). En effet, ce matériau est grandement utilisé dans la construction de bateaux, de charpentes ou de chalets. Ses propriétés, décrites par la société E-WOOD (9), telles que son imputrescibilité, sa résistance aux intempéries et aux insectes, ainsi que sa bonne résistance au feu grâce à sa densité, en font un excellent candidat pour la construction de notre immeuble.

4.3 Dimensionnement de l'immeuble

Une fois le bois de mélèze sélectionné, nous avons vérifié sa capacité à résister aux contraintes appliquées. Nous avons déterminé que la contrainte maximale dans l'immeuble flottant est de 16,5 MPa. Étant donné que la résistance élastique du mélèze est de 80 MPa, la condition $\sigma_y > \sigma_{\text{immeuble}}$ est vérifiée. Cela nous permet de valider notre dimensionnement structurel.

4.4 Energie et habitabilité

La qualité de vie dans notre immeuble est intrinsèquement liée à sa consommation d'énergie. Pour 8 étages, nous calculons que l'apport en énergie nécessaire est de 371,2 kWh/jour. Toutefois, en appliquant une démarche de sobriété et la mutualisation des cuisines, il est certain que cette consommation sera drastiquement diminuée. D'après les chiffres de la société Engie (10), un panneau solaire de 1 m^2 produit en moyenne 274 kWh/an, soit 0,75 kWh/jour. Ainsi, nous avons besoin de 495 m^2 de panneaux solaires pour alimenter notre immeuble.

Ce chiffre nous a directement permis d'écartier l'utilisation unique de panneaux solaires. En effet, pour compenser l'intermittence de l'énergie solaire, il serait nécessaire de produire plus d'énergie afin de pouvoir la stocker et couvrir les périodes de faible production. Cela impliquerait une augmentation de la surface des panneaux solaires à au moins 700 m^2 . Cependant, nous ne disposons que de 100 m^2 de toit et d'une surface limitée sur les murs, ce qui rend cette solution impossible. Ainsi, une des seules solutions permettant de produire de l'énergie décarbonée est un MMR³ (Micro Modular Reactor), qui permettrait à l'immeuble d'être auto-suffisant. Cette technologie, encore immature, complique la réalisation de cet immeuble. Finalement, la seule solution viable dès à présent serait la connexion de l'immeuble au réseau électrique à quai. Lors du déplacement de l'immeuble, la combinaison de 100 à 150 m^2 de panneaux solaires avec l'utilisation de groupes électrogènes, bien que néfaste pour le bilan carbone, permettrait de fournir l'énergie nécessaire à son fonctionnement.

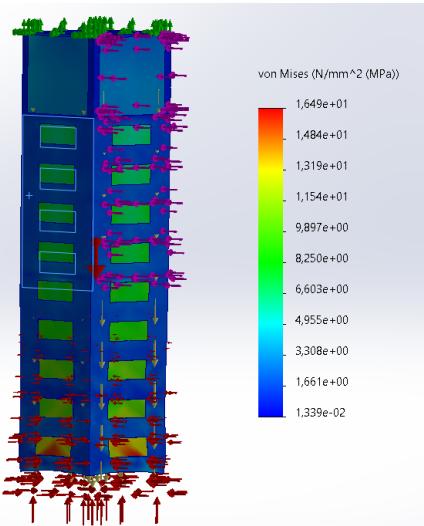


FIGURE 8 – Contraintes de von Mises appliquées sur l'immeuble

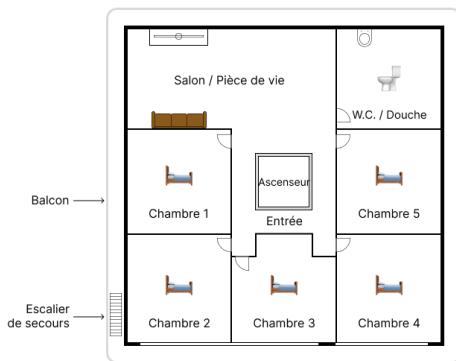


FIGURE 9 – Plan d'un étage

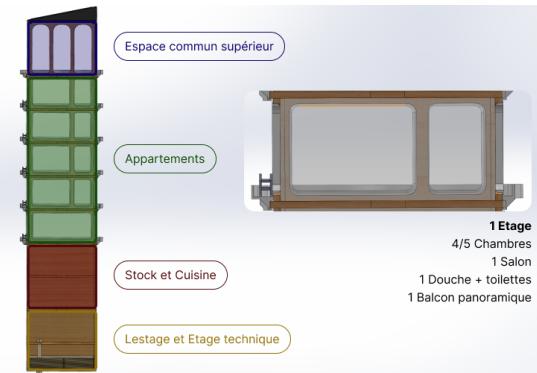


FIGURE 10 – Répartition des espaces

De plus, nous avons essayé de créer un cadre de vie naturel tout en imposant une démarche de sobriété :

- Mutualisation de l'électroménager (cuisines et buanderies communes)
- Grandes fenêtres pour utiliser moins d'éclairage artificiel
- Circuits fermés d'air au sein de l'immeuble permettant de diminuer le besoin en énergie

4.5 Analyse du cycle de vie

Grâce à notre analyse du cycle de vie, nous avons évalué la pertinence de la sélection du bois de mélèze en comparant l'analyse du cycle de vie d'un immeuble en bois de mélèze provenant d'Europe avec celle d'un immeuble en béton.

3. MMR : petits réacteurs nucléaires conçus pour être modulaires et déployés rapidement

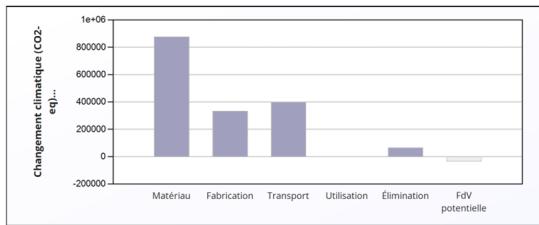


FIGURE 11 – Analyse du cycle de vie de l'immeuble en béton

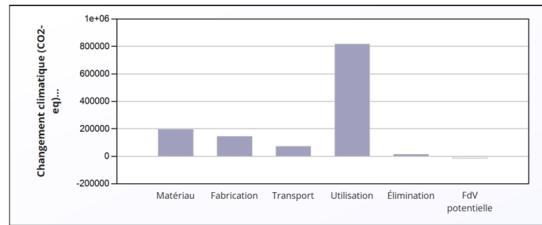


FIGURE 12 – Analyse du cycle de vie de l'immeuble en bois

Nous constatons que l'extraction des minéraux nécessaires à la conception du béton, ainsi que la fabrication et le transport de ce matériau, sont de 2 à 4 fois plus impactants que ceux liés au bois. Cependant, nous avons supposé que l'immeuble en bois devait être mobile, conformément à la demande du client. Par conséquent, la phase d'utilisation de l'immeuble s'avère bien plus impactante que celle d'un immeuble classique. Cela s'explique par l'utilisation de bateaux remorqueurs pour déplacer l'immeuble chaque année jusqu'au chantier naval de Saint-Nazaire, afin d'y effectuer sa maintenance. Enfin, notre immeuble en bois présente un impact de 15 600 kgCO₂/an, contre 20 900 kgCO₂/an pour l'immeuble en béton. Nos choix se révèlent donc pertinents.

4.6 Résultats test expérimentaux et maquette finale

Nos tests initiaux avec l'immeuble imprimé en 3D se sont avérés concluants. En effet, nous avons retrouvé les mêmes résultats que nos estimations. Ensuite, nous avons conçu et fabriqué le prototype final livré au client. La maquette obtenue est la suivante. Cette maquette représente fidèlement l'immeuble à l'échelle 1 :100, avec des étages, des fenêtres, des balcons, des lumières et un ascenseur. Elle possède les mêmes propriétés de flotabilité et de stabilité que l'immeuble à taille réel.



5 Discussion

5.1 Limites de nos modèles

Notre simulation Python présente des limites. Elle ne permet pas de modéliser l'immeuble en dynamique, en représentant des forces transitoires comme le courant marin ou les oscillations de l'immeuble avant qu'il ne retrouve une position verticale stable. Nous avons uniquement cherché à analyser les cas extrêmes pour vérifier le non-chavirage de l'immeuble.

De plus, pour calculer la contrainte appliquée sur notre immeuble, nous avons fixé notre immeuble en liaison encastrement au niveau du tirant d'eau. Cette modélisation est peu réaliste, car l'immeuble pivote autour de son plan médian lorsqu'il flotte.

5.2 Choix du matériau

Grâce à la méthode d'Ashby, nous pensons avoir identifié le matériau le plus adapté à nos critères : le bois de mélèze. Cependant, nous pouvons nous interroger sur les raisons pour lesquelles davantage d'immeubles ne sont pas construits en bois en Europe. Plusieurs facteurs expliquent cette situation (Annexe 7.10) :

- Coût de construction
- Normes de sécurité incendie
- Exposition à l'eau
- Durabilité des ressources

Pour ces raisons, les constructeurs se tournent majoritairement vers des matériaux plus traditionnels, comme le béton armé, qui offrent un compromis entre coût, durabilité, sécurité et facilité de mise en œuvre.

5.3 Maquette

Pour réaliser notre maquette, nous avons choisi d'utiliser du contreplaqué. Ce choix est principalement esthétique : en effet, la réalisation de la maquette en bois permettra au client de mieux visualiser l'apparence de l'immeuble réel. De plus, ce matériau représente assez bien la masse volumique du matériau choisi pour l'immeuble, car $\rho_{\text{contreplaqué}} = 0.75\rho_{\text{bois mélèze}}$.

Cependant, lors de la flottation de la maquette finale, nous mesurons que la ligne d'eau est de 18,5 cm, ce qui représente un décalage d'environ un centimètre par rapport à nos estimations, soit 5%.. Ce décalage est lié aux différences de masse volumique entre notre estimation et la réalité. En effet, la masse volumique du métal utilisé pour le lestage est de 6650 kg/m^3 , ce qui est loin des 7800 kg/m^3 prévus.

5.4 Impact environnemental

Bien que notre ACV permet d'estimer l'impact de notre immeuble, il ne prend pas en compte plusieurs facteurs, notamment l'écotoxicité . De plus, nous pouvons nous intéresser au possible effet rebond⁴ impliqué par ce type de bâtiment. Une mise en place à grande échelle d'immeuble flottant en bois, pourrait entraîner une sur-exploitation des ressources et ainsi provoquer une destruction de la biodiversité et de la perturbation des milieux dans les forêts d'exactions.

D'ailleurs, un immeuble en bois classique aurait un bilan carbone meilleur que notre immeuble flottant. Ainsi, on atteint ici une des limites de ce projet.

6 Conclusion

Au début de ce projet, l'entreprise LAGON avait pour objectif de diversifier ses activités en se tournant vers des projets plus éco-responsables. Pour répondre à cet objectif, nous avons répondu à l'appel d'offres de Waterstudio.NL concernant l'étude de faisabilité d'un immeuble flottant. Nous avons adopté une démarche de type projet, en effectuant une phase de recherche, de conception et de fabrication, afin de répondre aux attentes du client.

Pour démarrer notre étude, nous nous sommes appuyés sur des projets existants de villes flottantes, ce qui nous a permis de définir les fonctions principales et les contraintes du projet. Puis, nous avons démontré la flottabilité, la stabilité et la résistance mécanique de l'immeuble à travers des simulations.

Par ailleurs, nous avons sélectionné un matériau écologique pour la structure et justifié ce choix grâce à une analyse du cycle de vie. En outre, nous avons fabriqué un prototype réduit, ce qui a permis de valider nos simulations tout en offrant au client un visuel clair de l'immeuble.

Enfin, nous avons comparé le projet fini avec notre cahier des charges initial pour nous assurer que la solution proposée répondait aux besoins du client. Grâce à cette démarche, nous sommes en mesure de présenter une solution innovante et écologique, et nous espérons que le client choisira notre immeuble.

Ce projet nous a permis de valider une approche de modélisation structurelle pour des immeubles flottants. Il nous a également permis d'augmenter nos connaissances sur la flottabilité et la stabilité des structures, tout en renforçant nos compétences en simulation Python et en CAO.

Cependant, il faut garder à l'esprit qu'il n'existe actuellement aucune solution de production d'énergie bas carbone mature pour les immeubles flottants. De plus, un immeuble en bois terrestre reste une solution plus respectueuse de l'environnement, en raison de son empreinte carbone plus faible et de la simplicité de sa conception.

Pour conclure, ce projet représente une première étape prometteuse vers la conception d'immeubles flottants, qui pourraient être une solution structurelle innovante pour faire face à la montée des eaux.

4. Effet rebond : le gain en efficacité d'un système (ici immeuble flottant au lieu de immeuble en béton classique) entraîne une augmentation de la consommation totale des ressources

GON - LAGON - LAGO

Dimensions: 10m x 10m x 45m
Base carrée 100m²

Masse nu: 526 tonnes
Structure en bois (Mélèze)

Lestage: ≈ 1400 tonnes
Permet d'être stable dans toutes les conditions

Chantier naval: Saint-Nazaire
Construction et maintenance future

Masse interne: 250 tonnes
250kg/m²/étage – Norme Française

Masse totale: ≈ 2 176 tonnes
Fluctue selon l'usage



FIGURE 14 – Récapitulatif du projet

Bibliographie

- [1] Lorgnier A. Les incroyables maisons flottantes de Waterstudio [Site d'informations architecturales]; 2023. Available from : <https://ideat.fr/les-incroyables-maisons-flottantes-de-waterstudio/>. 3
- [2] Llovel W. Hausse du niveau de la mer et impact du changement climatique global [Thèse doctorat]. Toulouse : Université Paul Sabatier - Toulouse III; 2010. Available from : <https://theses.hal.science/tel-00558287>. 4, 18
- [3] Engineering B. Projet oceanix [Commercial];. Available from : <https://bee-eng.com/oceanix-city-le-projet-de-villes-flottantes-autonomes-et-modulables/>. 4, 19
- [4] Campetella E. Une ville flottante construite en Corée du Sud : voici à quoi elle ressemble et pourquoi elle a été construite ! [Site d'actualité spécialisé]; 2024. Section : Actualité. Available from : <https://urlr.me/48SQT5>. 4, 19
- [5] Calliet JJ. E18 étude de la stabilité d'un navire, domaine 2. Montpellier : Académie de Montpellier ; 2022. Available from : <https://www.youtube.com/watch?v=fNg2FVcCJ3w>. 4
- [6] Fabre P. E15 : domaine 2, flottabilité d'un navire. Montpellier : Académie de Montpellier ; 2022. Available from : <https://www.youtube.com/watch?v=MvF7G67N1GA>. 4
- [7] Blanc J, Choulier D, Cotte M, Guigon M. Choix des matériaux par la méthode d'Ashby ;. Available from : https://www.utc.fr/~special_m6_fr/SOUSCHAPITRE_JJD.html#. 5
- [8] Engie. Estimer sa consommation électrique à la maison ; 2024. Available from : <https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/conseils-tarifs-electricite/consommation-electrique-moyenne-logement-par-superficie.html>. 6
- [9] WOOD SE. Bois de Mélèze - Caractéristiques et Usages - EWOOD [Commercial];. Available from : <https://www.e-wood.fr/essences/meleze.html>. 7
- [10] Engie. Quelle est la production d'un panneau solaire en kwh pour 1 m2 ? ; 2024. Available from : <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/caracteristiques-panneaux-solaires/quelle-est-la-production-d-un-panneau-solaire-en-kwh-pour-1-m2.html>. 8
- [11] FCBA IT. Marinewood durabilité des bois au contact de l'eau de mer [Site institutionnel spécialisé]; 2016. Available from : <https://www.fcba.fr/travaux/marinewood-durabilite-des-bois-au-contact-de-leau-de-mer/>. 28

7 Annexe

7.1 Annexe 0 : Carte Montée des eaux

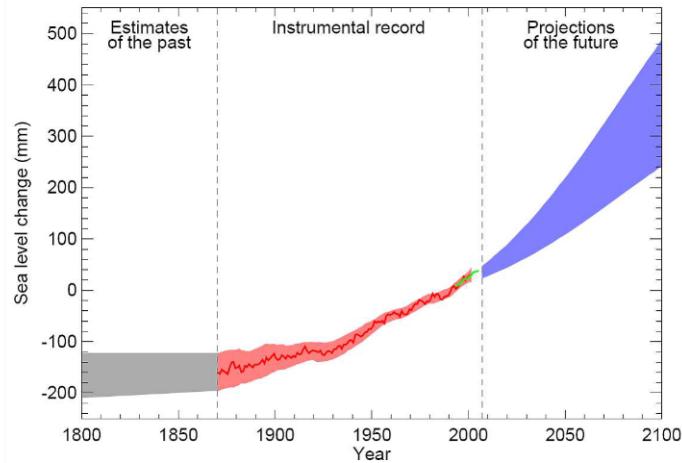


FIG. 2.9 – Evolution du niveau moyen global de la mer entre 1800 et 2100 (IPCC, 2007). La courbe grise représente les estimations faites à partir des études géologiques. La courbe rouge représente le niveau de la mer observé par les marégraphes (Church et al. [2004]). La courbe verte représente le niveau moyen global observé par altimétrie spatiale. Enfin, l'enveloppe bleue représente les estimations basées sur les modèles numériques climatiques de l'IPCC (2007).

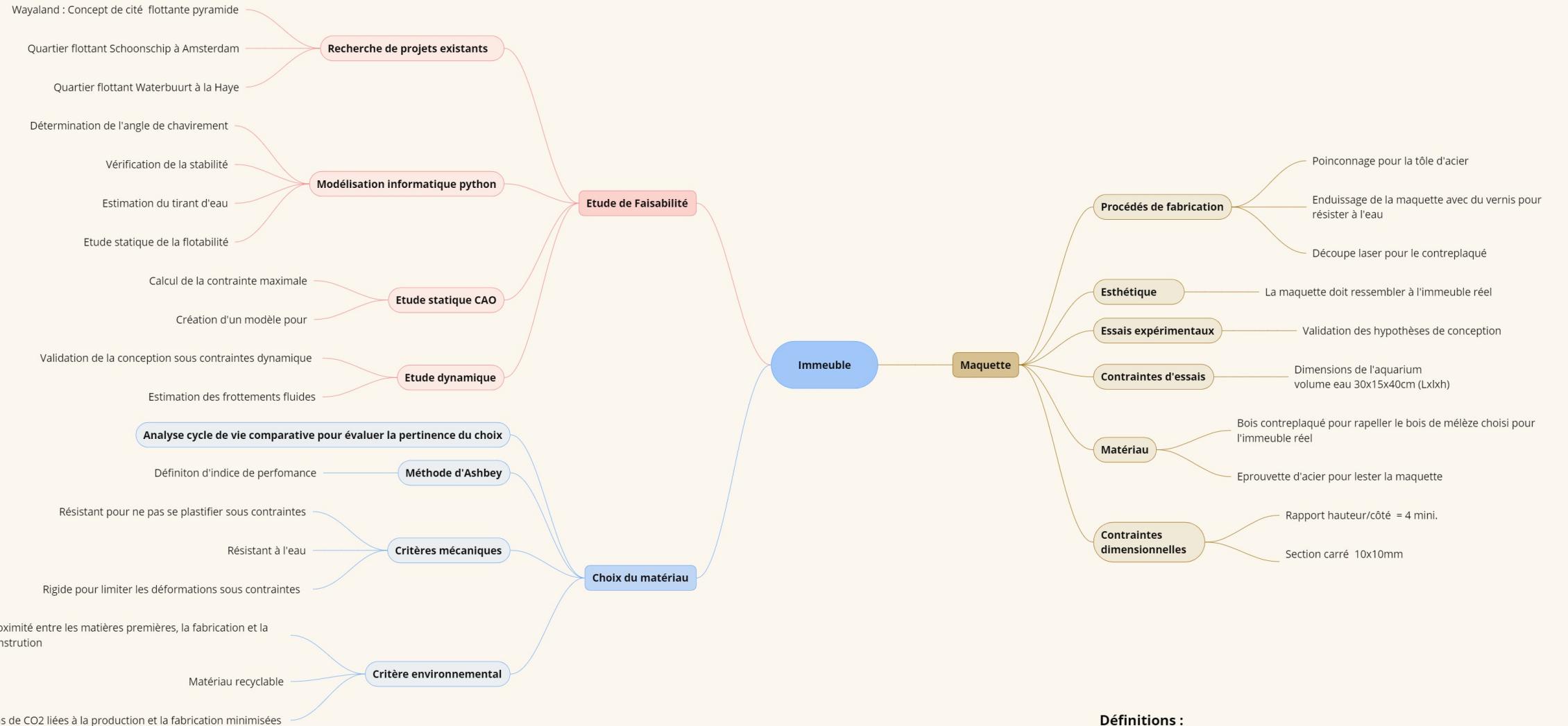
FIGURE 15 – Graphique représentant la prévision de la montée des eaux jusqu'à 2100

7.2 Annexe 1 : Cahier des charges fonctionnelles

Fonction	Intitulé	Critères	Niveau	Flex.
FP1	Assurer la flottabilité et la stabilité de l'immeuble	Angle chavirement Poussée d'Archimède Angle max. d'inclinaison	70° mini. > Poids < 10°	F0 F0 F0
FC1	Respecter les contraintes dimensionnelles du client	Base carré Rapport longueur /côté	C = C 4 mini.	F0 F0
FC2	Garantir l'habitabilité de l'immeuble	Provisions Accès à l'eau Accès à l'électricité	Autonomie = 7 jours	F0 F0 F0
FC3	Valider la conception avec un test à échelle réduite	Dimensions maquette Flottabilité Résistance aux perturbations Adéquation modèle /maquette Esthétique	Côté max. = 10cm 10N	F0 F0 F0 F1 F2
FC4	Assurer un immeuble à faible impact environnemental réaliste	Matériau bas carbone Transport Résistance aux perturbations Prix	< 197 kgC02eq/kg (béton) < 3500km 10N = prix immeuble standard	F1 F1 F0 F1

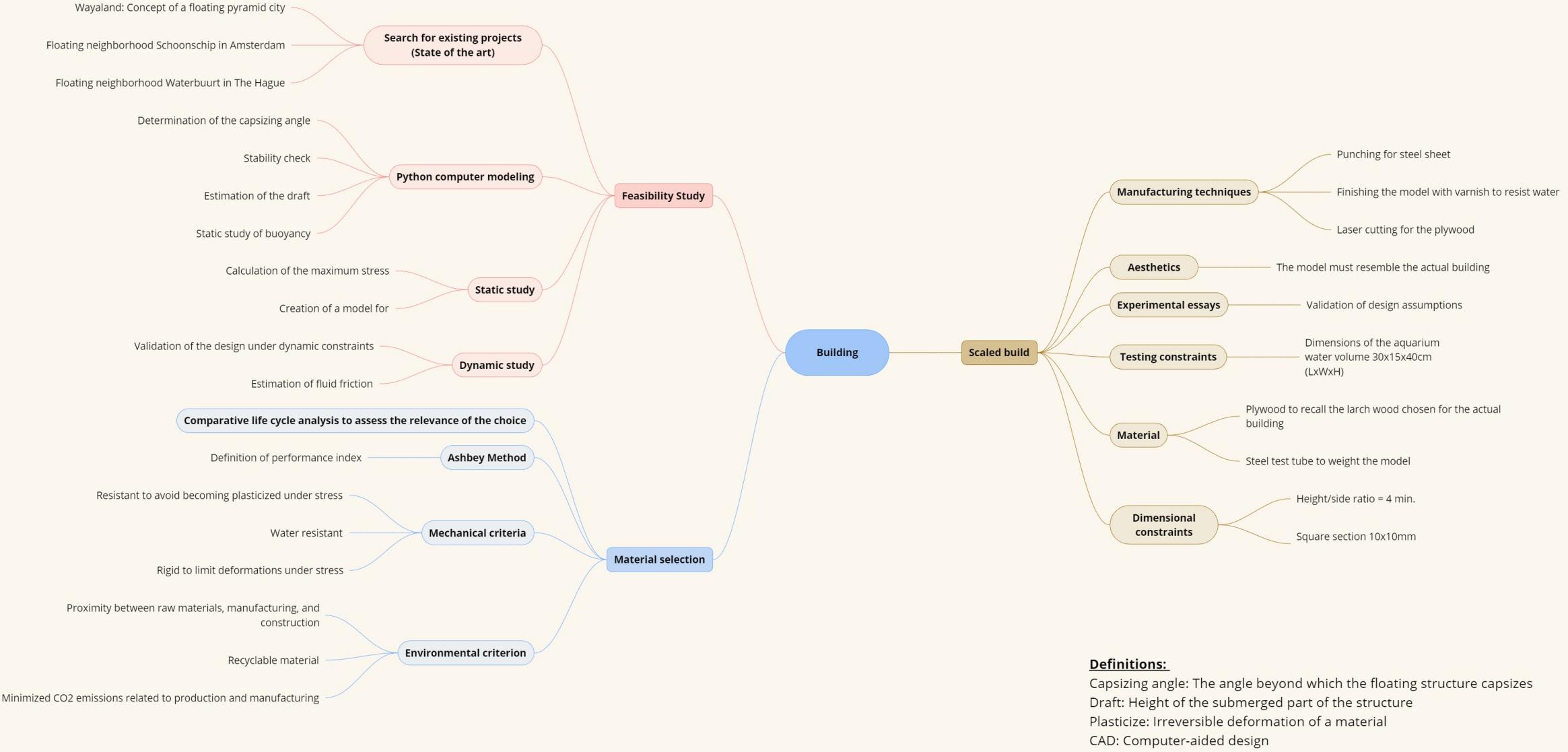
TABLE 4 – Cahier des charges fonctionnelles

7.3 Annexe 2 : Carte mentale immeuble flottant



Définitions :

- Angle de chavirement : Angle au delà duquel la structure flottante chavire
- Tirant d'eau : Hauteur de la partie immergée de la structure
- Plastifier : Déformation irréversible d'un matériau
- CAO : Conception assistée par ordinateur



7.4 Annexe 3 : Planning détaillé

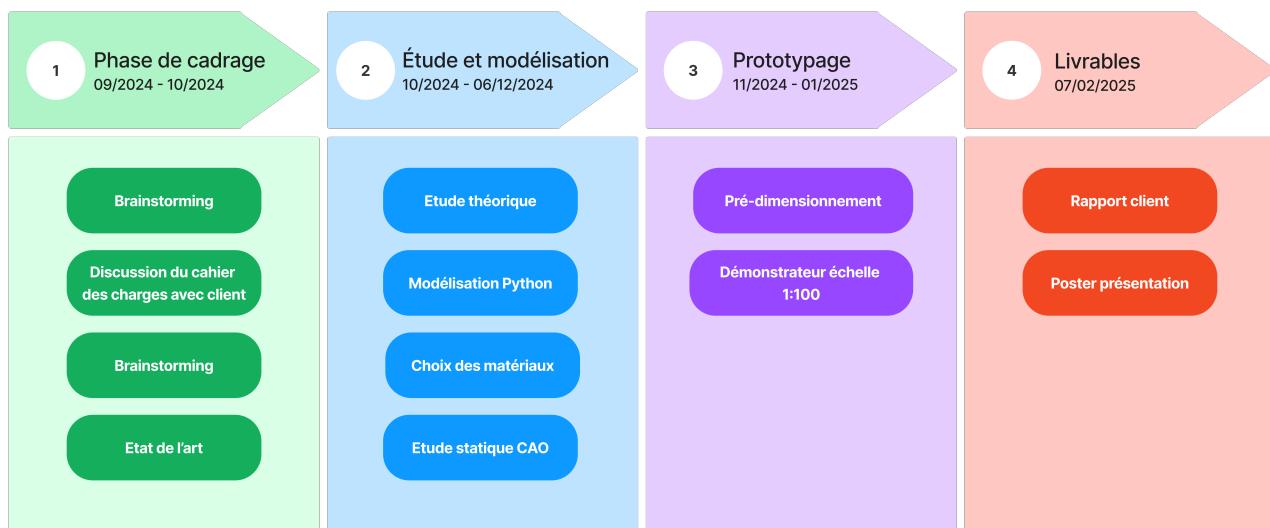


FIGURE 16 – Planning du projet

7.5 Annexe 4 : Etat de l'art exhaustif

En raison du dérèglement climatique, il est estimé que le niveau des mers et des océans augmentera en moyenne de 10 à 20 cm d'ici 2100 (2). De plus, certaines régions du monde seront plus touchées que d'autres. Par exemple, on peut observer sur la carte en annexe, que les régions d'Asie du Sud subissent une augmentation des niveaux des mers quatre fois plus rapide que les côtes françaises. Certains pays, comme les Pays-Bas, situés sous le niveau de la mer, seront également fortement impactés par cette montée des eaux.

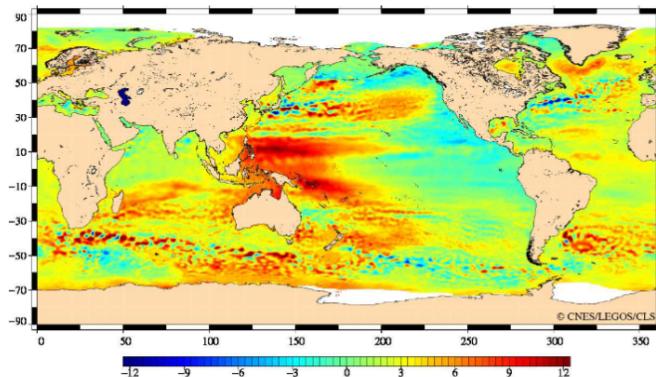


FIG. 2.8 – Cartographie des vitesses du niveau de la mer entre 1993 et 2009 d'après les observations des satellites Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2 (Cazenave and Llovel [2010])

FIGURE 17 – Evolution de la montée des eaux entre 1993 et 2009

Dans ce contexte, plusieurs projets de structures flottantes, tels que des quartiers flottants, voient le jour afin de lutter contre ces montées des eaux : - Aux Pays-bas, plusieurs quartiers d'habitations flottantes existent déjà, comme le quartier de Schoonschip à Amsterdam ou celui de Waterbuurt à La Haye.



FIGURE 18 – Quartier de Schoonschip à Amsterdam



FIGURE 19 – Waterbuurt à La Haye

En Italie, un concept de ville flottante nommé Wayaland, en forme de pyramide et inspiré à la fois des pyramides mayas et des temples japonais, a été conçu par l'architecte Pierpaolo Lazzarini.



FIGURE 20 – Concept Wayaland

En Corée du Sud, la construction du quartier flottant Oceanix Busan (3) (4), situé sur une plateforme flottante de 30 000 m², est prévue pour débuter en 2025.



FIGURE 21 – Concept Oceanix Busan

Les quartiers flottants, tels que Schoonschip ou Waterbuurt, démontrent la faisabilité d'habitations flottantes à petite échelle. Cependant, ces projets reposent sur des flotteurs avec une faible profondeur immergée, ce qui limite leur stabilité pour des structures plus imposantes.

Dans notre étude, afin de garantir une bonne stabilité face aux forces environnementales, notamment le vent, une partie significative de l'immeuble devra être immergée. Ce choix permet de réduire les risques d'inclinaison et d'augmenter la résistance aux perturbations, tout en posant de nouveaux défis en matière de flottabilité et de poids.

Toutefois, des solutions techniques utilisées sur ces projets peuvent nous être utile. Par exemple, un système intégré de récolte, de filtration, de recyclage et de distillation de l'eau et une production d'énergie issue de sources renouvelables telles que le solaire, l'éolien et la houle ont été mis en place à Oceanix Busan pour garantir la neutralité carbone du projet. De plus, la technologie Biorock, processus d'agglomération d'éléments inorganiques sur la partie submergé de l'immeuble, pourra nous être utiles car il augmente la durabilité de la structure et réduit la perturbation des milieux marins. Ce projet présente de nombreuses similarités avec le nôtre, puisque les objectifs des concepteurs de ce quartier flottant sont d'atteindre une neutralité carbone annuelle, de limiter l'utilisation des énergies fossiles et d'assurer une autonomie de la plateforme pendant 7 jours.

Pour cela, certaines solutions techniques ont été mises en place, comme un système intégré de récolte, de filtration, de recyclage et de distillation de l'eau. En outre, la neutralité carbone énergétique est assurée grâce à une production d'énergie issue de sources renouvelables telles que le solaire, l'éolien et la houle. De plus, l'utilisation de la technologie Biorock garantit la durabilité de la structure dans le temps. Cette technologie, également appelée accrétion⁵, repose sur l'application d'un faible courant électrique sur une structure métallique. Ce procédé accélère l'accrétion de roches calcaires autour de la structure, permettant de recréer des coraux rapidement tout en protégeant la structure métallique contre l'oxydation.

Ces technologies pourraient être particulièrement utiles dans notre projet si nous souhaitons garantir une autonomie énergétique accrue ou si notre structure intègre une charpente métallique.

5. Accrétion : Processus d'agglomération d'éléments inorganiques

7.6 Annexe 5 : Développement théorique

7.6.1 Flotaison :

- Poussée d'Archimède :

$$F_a = \rho g V_{\text{eau-déplacée}} \quad (1)$$

La poussée d'Archimède est une force égale au poids du volume de fluide déplacé par un objet. Cette force s'oppose au poids de l'objet. Pour que l'immeuble flotte, il faut respecter la condition suivante :

$$m_{\text{immeuble}} g < \rho g V_{\text{eau-déplacée}} \Leftrightarrow m_{\text{immeuble}} < \rho V_{\text{eau-déplacée}} \quad (2)$$

- Poids total du bâtiment :

Le poids total du bâtiment est calculé en considérant la contribution de chaque étage i , avec une masse volumique $\rho_{s,i}$ et un volume $V_{s,i}$. Ainsi, le poids total est donné par :

$$P = \sum_{i=1}^n \rho_{s,i} \cdot g \cdot V_{s,i} \quad (3)$$

Où :

- $\rho_{s,i}$: Densité moyenne de l'étage i (kg/m^3),
- $V_{s,i}$: Volume de l'étage i (m^3),
- n : Nombre total d'étages.
-

7.6.2 Stabilité :

Pour évaluer la stabilité de notre immeuble, nous étudions le **couple de redressement**, généré par la poussée d'Archimède et le poids en cas d'inclinaison.

- Couple de redressement :

Lorsqu'un bâtiment s'incline d'un angle θ , un bras de levier d est créé entre le centre de masse G et la ligne d'action de la poussée d'Archimède. Le couple de redressement M_r s'exprime comme :

$$M_r = F_a \cdot d = \rho g V_{\text{eau-déplacée}} \cdot d \quad (4)$$

Où d est la distance perpendiculaire entre le centre de masse et la ligne d'action de F_a . d peut être approximée par :

$$d = h \cdot \sin(\theta) \quad (5)$$

Ici, h est la distance entre le centre de masse (G) et le centre de carène (C) à l'état d'équilibre. Ainsi, le couple de redressement devient :

$$M_r = \rho g V_{\text{eau-déplacée}} \cdot h \cdot \sin(\theta) \quad (6)$$

- Centre de masse total :

Pour calculer la position du centre de masse total (z_G) en tenant compte de la répartition des masses volumétriques par étage, nous utilisons la formule pondérée suivante :

$$z_G = \frac{\sum_{i=1}^n (\rho_{s,i} \cdot V_{s,i} \cdot z_i)}{\sum_{i=1}^n (\rho_{s,i} \cdot V_{s,i})} \quad (7)$$

Où z_i est la hauteur du centre de gravité de l'étage i par rapport à une origine donnée (par exemple, le bas du bâtiment).

Pour que le bâtiment reste stable, le couple de redressement M_r doit être suffisant pour contrer tout couple de chavirement. Cela impose que :

$$M_r > 0 \Rightarrow \rho g V_{\text{eau-déplacée}} \cdot h \cdot \sin(\theta) > 0 \quad (8)$$

Cette condition est assurée si :

- $h > 0$: le centre de masse doit être situé sous le centre de carène pour garantir un bras de levier positif,
- $\rho g V_{\text{eau-déplacée}} > P$: la poussée d'Archimède doit surpasser le poids total du bâtiment.

En pratique, cela implique une répartition judicieuse des masses pour maintenir h suffisamment élevé.

— Grâce à ces formules, nous avons pu estimer à l'aide d'un script Python :

- la flotabilité de l'immeuble,
- l'angle de chavirement (limite d'inclinaison avant chavirement),
- le tirant d'eau (hauteur immergée de l'immeuble),
- la masse maximale de l'immeuble,
- la répartition de masse nécessaire à la stabilité.

7.7 Annexe 6 : Resultats de la stabilité

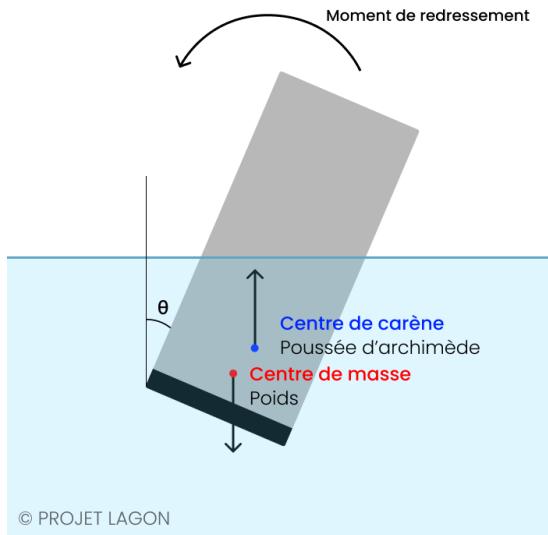


FIGURE 22 – Immeuble lesté subissant un moment de redressement

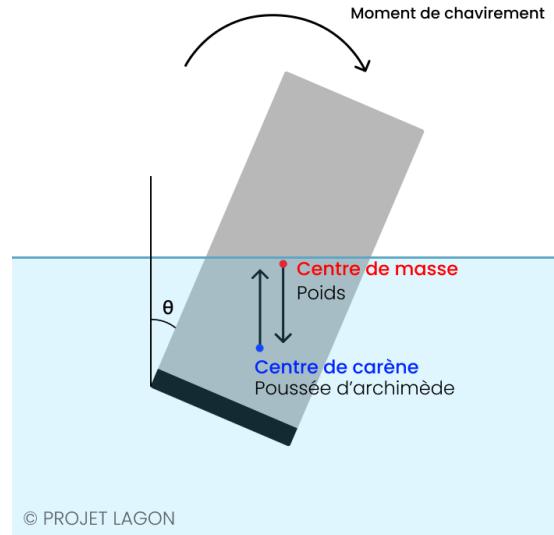


FIGURE 23 – Immeuble homogène subissant un moment de chavirement

Sur la figure 23, nous observons que l'objet est capable de flotter lorsqu'il est statique à la verticale. Toutefois, l'angle de chavirement de cet immeuble est de 0 degré. Car le moment au voisinage de sa position d'équilibre ne permet pas de le redresser. Cela signifie que toute perturbation fait chavirer notre immeuble.

De plus, sur la figure 22, nous avons abaissé le centre de masse sous le centre de carène. Ici, le moment de l'immeuble est toujours un moment de redressement (0° à 90°). De ce fait, on en déduit que l'angle de chavirement est de 90° . Par conséquent, l'immeuble sera capable de résister à de petites perturbations.

7.8 Annexe 7 : Protocole expérimental follataison et stabilité

D'une part, en essayant de faire flotter l'immeuble sans ballast, nous avons observé qu'il est impossible de trouver un équilibre stable en position verticale, et que l'immeuble chavire dès qu'il n'est plus maintenu. En simulation, nous avions déterminé qu'un équilibre stable vertical existait, mais dans les faits, cet équilibre s'avère impossible à atteindre.

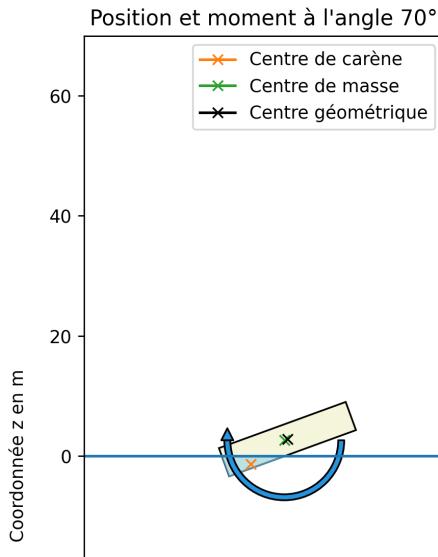


FIGURE 24 – Simulation python de notre expérience



FIGURE 25 – Immeuble flottant stablement

Ensuite, en lestant notre immeuble, nous avons obtenu des résultats identiques à ceux que nous avions simulés avant l'expérience. En effet, l'immeuble flotte avec un tirant d'eau correspondant exactement à celui de la simulation, et il résiste aux perturbations qui lui sont appliquées.

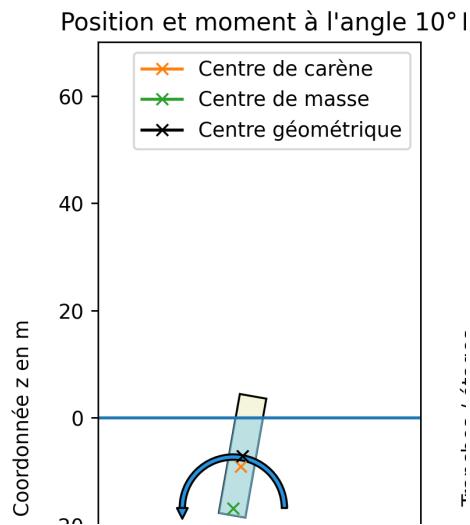


FIGURE 26 – Simulation python de notre expérience



FIGURE 27 – Immeuble flottant stablement

7.9 Annexe 8 : Sélection du matériau par méthode d'Ashby

Pour trouver le matériau optimal, nous avons défini nos indices de performances, puis nous avons éliminer des matériaux au fur et à mesure sur les diagrammes d'Ashby suivant :

Indice 1 : Le matériau est rigide et bas carbone.

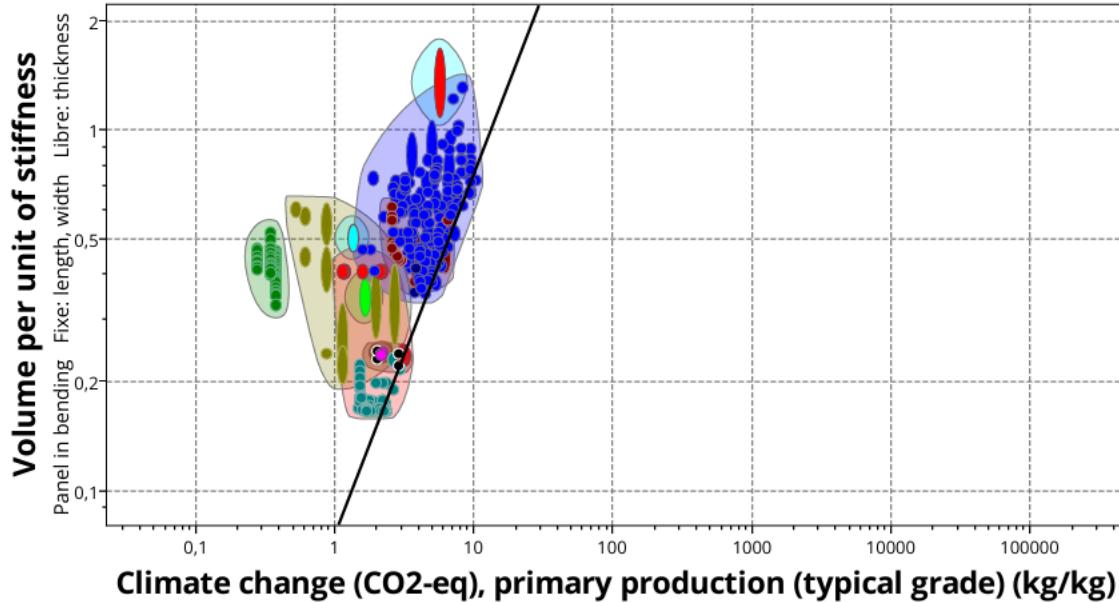


FIGURE 28 – Diagramme d'Ashby de la rigidité en fonction de l'impact CO2 du matériau

Indice 2 : Le matériau est résistant et bas carbone

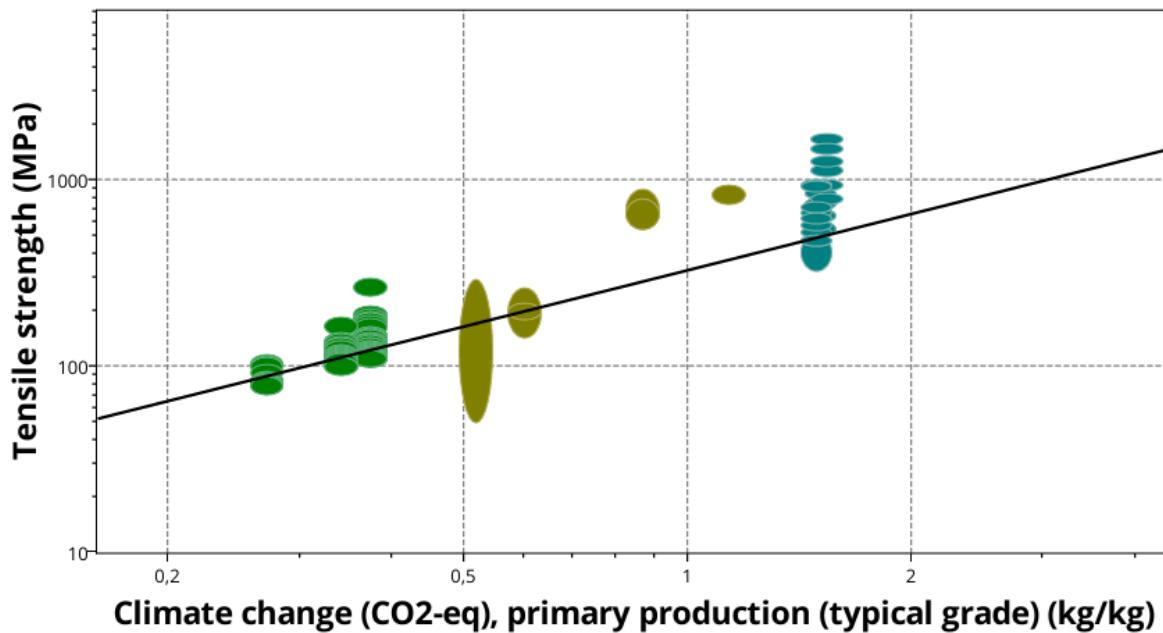


FIGURE 29 – Diagramme d'Ashby de la résistance élastique en fonction de l'impact CO2 du matériau

Indice 3 : Le matériau est résistant à l'eau et bas carbone

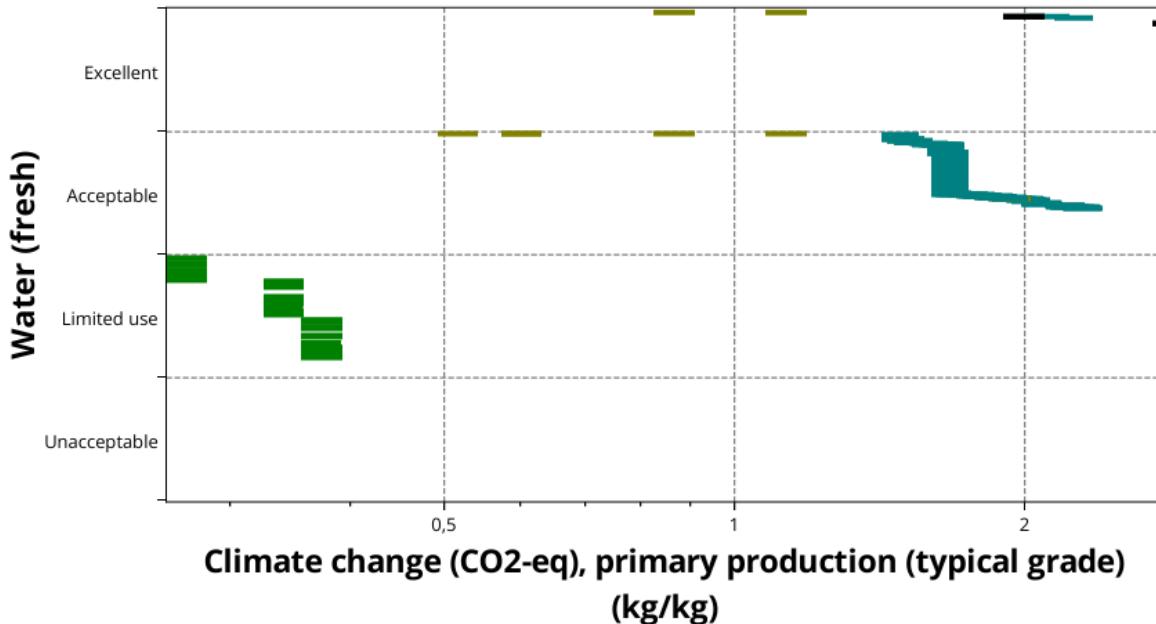


FIGURE 30 – Diagramme de la résistance à l'eau en fonction de l'impact CO2 du matériau

Aucun matériau n'est éliminé. En effet, bien que les bois ont une utilisation limitée, des traitements chimiques peuvent les rendre imputrescibles.

Indice 4 : Le matériau est économique et bas-carbone

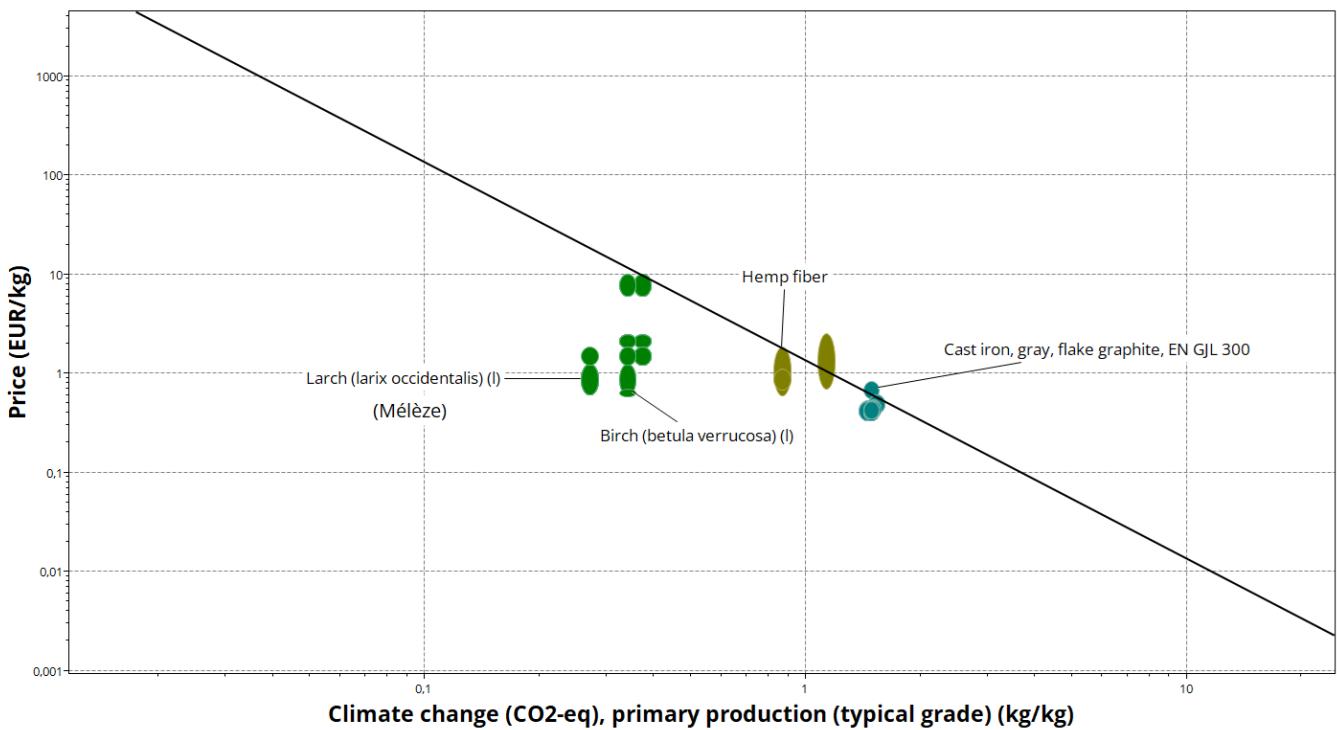


FIGURE 31 – Diagramme d'Ashby du prix en fonction de l'impact CO2 du matériau

Indice 4 optimisé : Nous maximisons l'indice ci-dessous pour trouver le matériau répondant le mieux à notre besoin.

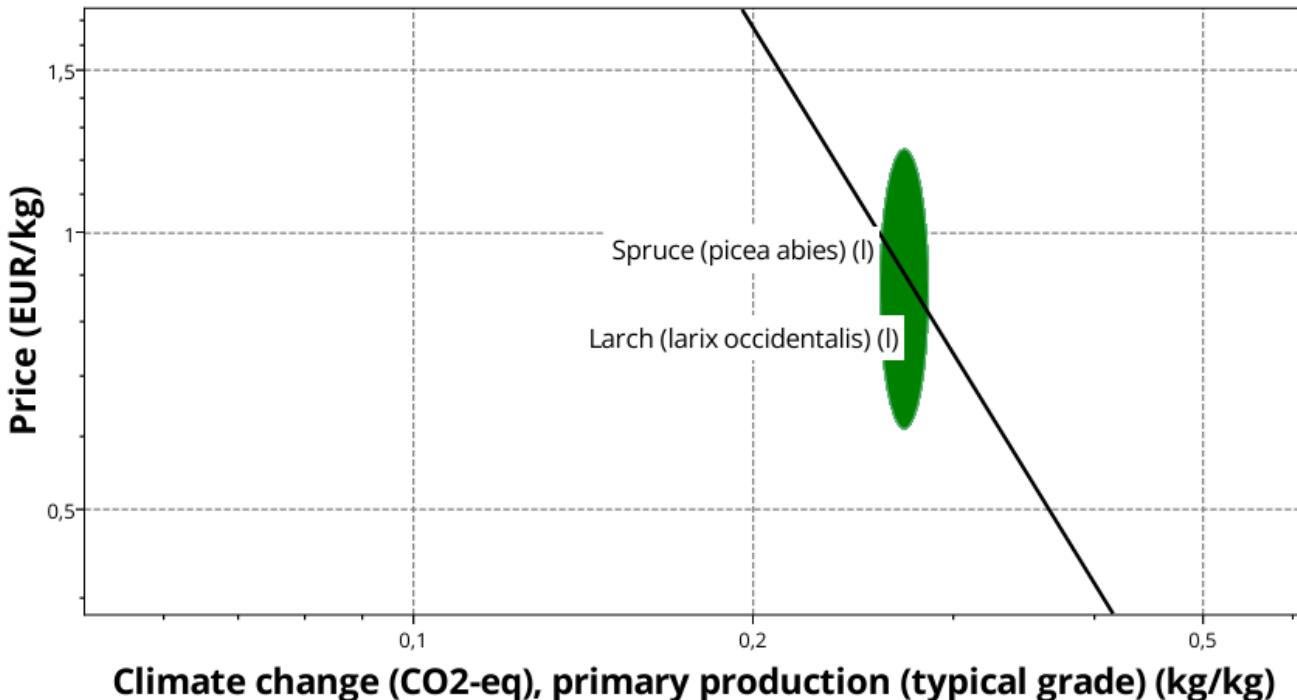


FIGURE 32 – Diagramme d'Ashby de l'indice de performance du prix en fonction de l'impact CO2 du matériau optimisé

Nous trouvons donc que les bois capables de répondre à notre besoin sont les suivants :

	Nom
<input type="checkbox"/>	Douglas fir (<i>pseudotsuga menziesii</i>) (l)
<input type="checkbox"/>	Douglas fir (<i>pseudotsuga menziesii</i>) (l)
<input type="checkbox"/>	Douglas fir (<i>pseudotsuga menziesii</i>) (l)
<input type="checkbox"/>	Larch (<i>larix decidua</i>) (l)
<input type="checkbox"/>	Larch (<i>larix occidentalis</i>) (l)
<input type="checkbox"/>	Pine (<i>pinus echinata</i>) (l)
<input type="checkbox"/>	Pine (<i>pinus elloittii</i>) (l)
<input type="checkbox"/>	Pine (<i>pinus palustris</i>) (l)
<input type="checkbox"/>	Pine (<i>pinus sylvestris</i>) (l)
<input type="checkbox"/>	Pine (<i>pinus taeda</i>) (l)
<input type="checkbox"/>	Pine (<i>pinus virginiana</i>) (l)
<input type="checkbox"/>	Spruce (<i>picea abies</i>) (l)

FIGURE 33 – Listes des bois répondant à notre besoin

Parmi ces bois, ceux principalement utilisé pour la construction de structures et de bateaux est le bois de douglas et le bois de mélèze (Larch). D'ailleurs ces deux bois sont aussi disponibles dans nos forêts françaises et/ou européennes ce qui est une bonne nouvelle.

7.10 Annexe 9 : Détails des freins à l'utilisation des bâtiments en bois

- Coût de construction :

Le bois est significativement plus cher que le béton pour la construction. Une ossature en bois coûte entre 2 et 10 fois plus cher qu'une ossature en béton, ce qui représente un frein économique majeur.

- Normes de sécurité incendie :

Bien que des traitements thermiques puissent améliorer les caractéristiques du bois, ce matériau reste bien plus inflammable que le béton. Les normes de sécurité incendie pour les immeubles en bois sont donc plus strictes, ce qui complique leur utilisation à grande échelle. Nous pouvons par exemple observer ces derniers jours à Los Angeles, qu'une ville faite de maison en bois entraîne une propagation rapide des incendies.

- Exposition à l'eau :

Dans le cas spécifique d'un immeuble flottant, le bois serait en permanence en contact avec l'eau. Bien que le bois de mélèze soit naturellement résistant à l'humidité, cette résistance peut être renforcée par l'application de vernis. Cependant, un immeuble en bois flottant nécessiterait une maintenance beaucoup plus fréquente qu'un immeuble en béton(11).

- Durabilité des ressources :

Une exploitation durable du bois ne permettrait pas de construire des milliers d'immeubles sans compromettre les écosystèmes forestiers. Cela limite la viabilité à grande échelle de ce matériau pour des projets d'urbanisation massive.

7.11 Annexe 10 : Définition des indices de performance

En utilisant la méthode d’Ashby, nous avons obtenu des indices de performances qui sont regroupés dans ce tableau :

objectif	poutre pleine	poutre creuse
rigide/léger	$I_{\delta,m}^p = \frac{\sqrt{E}}{\rho}$	$I_{\delta,m}^c = \frac{E}{\rho}$
solide/léger	$I_{\sigma_Y,m}^p = \frac{\sigma_Y^{2/3}}{\rho}$	$I_{\sigma_Y,m}^c = \frac{\sigma_Y}{\rho}$
rigide/durable	$I_{\delta,CO_2}^p = \frac{\sqrt{E}}{C\rho}$	$I_{\delta,CO_2}^c = \frac{E}{C\rho}$
solide/durable	$I_{\sigma_Y,CO_2}^p = \frac{\sigma_Y^{2/3}}{C\rho}$	$I_{\sigma_Y,CO_2}^c = \frac{\sigma_Y}{C\rho}$

TABLEAU 1 – Indices de performances

FIGURE 34 – Indices de performance usuelles

7.12 Annexe 11 : Code python

Veuillez trouver notre code python à ce lien Github :

https://github.com/saadze/gm3_pst

7.13 Rapport Zotero

Bois de Mélèze - Caractéristiques et Usages - EWOOD

Type de document Page Web

Auteur Société E.WOOD

Résumé La page décrit les caractéristiques et usages du bois de mélèze, ses avantages, et son impact environnemental après utilisation

Date s.d

Titre abrégé Bois de Mélèze - Caractéristiques

URL <https://www.e-wood.fr/essences/meleze.html>

Consulté le 06/12/2024 21:37:35

Type de site Web Commercial

Titre du site Web E.WOOD

Date d'ajout 06/12/2024 21:37:35

Modifié le 16/01/2025 16:38:14

Marqueurs :

Choix du matériau

Pièces jointes

- Bois de Mélèze - Caractéristiques et Usages - EWOOD
-

Choix des matériaux par la méthode d'Ashby

Type de document Page Web

Auteur Jérôme Blanc

Auteur Denis Choulier

Auteur Michel Cotte

Auteur Michèle Guigon

Résumé Cours sur la sélection de matériau par la méthode d'Ashby

Date s.d

Langue Français

URL https://www.utc.fr/~special_m6_fr/SOUSCHAPITRE_JJD.html#

Consulté le 07/01/2025 23:10:13

Titre du site Web UTC

Date d'ajout 07/01/2025 23:10:13

Modifié le 16/01/2025 16:35:42

Marqueurs :

Choix du matériau

Notes :

Utilisation de ce document pour choisir notre matériaux

Pièces jointes

- Choix des matériaux par la méthode d'Ashby
-

Coupe des fondations d'un bâtiment à Venise

Type de document Page Web
Auteur Gisèle Nedjar
Résumé Illustration décrivant les fondations des bâtiments à Venise et leur structure spécifique. (Utilisation du mélèze)
Date s.d
Langue fr
Titre abrégé Coupe fondations Venise
URL <http://passerelles.essentiels.bnfr.fr/fr/image/7e5eae94-fad3-4278-ba46-8c872fbaea1a-coupe-fondations-un-batiment-venise>
Consulté le 30/11/2024 13:01:36
Titre du site Web Passerelles
Date d'ajout 30/11/2024 13:01:36
Modifié le 16/01/2025 16:38:01

Marqueurs :

Choix du matériau

Pièces jointes

- Snapshot
-

E15 : domaine 2, flottabilité d'un navire

Type de document Enregistrement vidéo
Metteur en scène Pierre Fabre
Résumé Vidéo pédagogique de l'Académie de Montpellier expliquant le domaine 2 du programme BIMer, consacré à la flottabilité et à la stabilité d'un navire
Date 2022-01-19
Langue Français
Titre abrégé Etude flottabilité navire
Catalogue de bibl. YouTube
URL <https://www.youtube.com/watch?v=MvF7G67N1GA>
Consulté le 06/12/2024 21:39:19
Nb de volumes 1
Lieu Montpellier
Durée 30min 21s
ISBN Non applicable
Format Vidéo youtube
Studio Académie de Montpellier
Date d'ajout 06/12/2024 21:39:19

Modifié le 16/01/2025 16:34:31

Marqueurs :

Flotabilité

Notes :

Cette vidéo est un complément de la vidéo E18 sur la mécaniques des objets flottants

E18 étude de la stabilité d'un navire, domaine 2

Type de document Enregistrement vidéo

Metteur en scène Jean Jacques Calliet

Résumé Vidéo pédagogique de l'Académie de Montpellier expliquant le domaine 2 du programme BIMer, consacré à la flottabilité et à la stabilité d'un navire

Date 2022-02-02

Langue Français

Titre abrégé Etude stabilité navire

Catalogue de bibl. YouTube

URL <https://www.youtube.com/watch?v=fNg2FVcCJ3w>

Consulté le 06/12/2024 21:39:22

Nb de volumes 1

Lieu Montpellier

Durée 44min 58s

ISBN Non applicable

Format Vidéo youtube

Studio Académie de Montpellier

Date d'ajout 06/12/2024 21:39:22

Modifié le 16/01/2025 16:33:48

Marqueurs :

Flotabilité

Notes :

Cette vidéo nous a introduits aux notions de mécanique appliquées aux objets flottants.

Estimer sa consommation électrique à la maison

Type de document Page Web

Auteur Engie

Résumé Explication du calcul et des consommations moyenne d'électricité selon la taille du logement

Date 2024-02-29
Langue fr-FR
URL <https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/conseils-tarifs-electricite/consommation-electrique-moyenne-logement-par-superficie.html>
Consulté le 06/01/2025 11:08:19
Titre du site Web Engie particulier
Date d'ajout 06/01/2025 11:08:19
Modifié le 16/01/2025 16:42:01

Marqueurs :

Énergie

Pièces jointes

- Snapshot
-

Hausse du niveau de la mer et impact du changement climatique global

Type de document Thèse

Auteur William Llovel

Résumé Au cours du 20ème siècle, les enregistrements marégraphiques suggèrent une hausse du niveau de la mer de 1.8 mm/an. Plus récemment, les observations spatiales indiquent une hausse de 3.3 mm/an sur la période 1993-2009. Cette augmentation au cours du temps est attribuée au réchauffement global de la planète enregistré depuis plusieurs années maintenant. Durant cette thèse, nous analysons les observations et les causes de la hausse moyenne globale du niveau de la mer. Nous estimons les variations stériques du niveau de la mer grâce aux données du projet international Argo et, les variations de masse des océans liés aux apports d'eau des continents à l'aide des mesures de la mission GRACE. Une autre étude se concentre sur la variabilité du stock d'eaux continentales des plus grands bassins hydrologiques de la planète, à l'aide des données GRACE, et l'impact de cette composante à la hausse du niveau de la mer. Puis, nous analysons l'impact de la variabilité interannuelle du stock d'eaux continentales aux variations du niveau de la mer sur diverses périodes. Enfin, nous étudions le bilan des contributions climatiques à la hausse observée du niveau de la mer sur la période altimétrique totale et pour les années récentes. Dans une deuxième partie, nous étudions les variations régionales du niveau de la mer. Nous établissons dans un premier temps, les causes de la variabilité régionale du niveau de la mer et nous interprétons le signal résiduel issu de la différence entre le niveau de la mer observé et l'expansion thermique des océans. Nous étudions ensuite les variations passées des structures régionales du niveau de la mer sur les dernières décennies (1950-2003). Le but est de reconstruire les variations passées du niveau de la mer en 2-D et ainsi d'avoir une connaissance plus approfondie de l'évolution régionale du niveau moyen des mers. Ce travail a pour objectif ultime de contraindre les modèles climatiques couplés utilisés par l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) pour prédire l'évolution future du niveau de la mer au cours du 21ème siècle. Cette analyse nous permet de détecter un signal basse fréquence dans la variabilité régionale du niveau de la mer que nous observons non seulement dans les données in situ mais aussi dans les modèles climatiques couplés.

Date 2010-12-06

Langue Français

Catalogue de bibl. theses.hal.science

URL <https://theses.hal.science/tel-00558287>
Consulté le 06/12/2024 21:37:11
Lieu Toulouse
Nb de pages 235
Type Thèse doctorat
Université Université Paul Sabatier - Toulouse III
Date d'ajout 06/12/2024 21:37:11
Modifié le 16/01/2025 16:35:26

Marqueurs :

Etat de l'art

Pièces jointes

- Full Text PDF
-

Iceberg dynamics

Type de document Page Web
Auteur Christian
Date 2021-02-22
Langue Français
URL <https://scipython.com/blog/iceberg-dynamics/>
Consulté le 12/12/2024 15:21:44
Titre du site Web SciPython
Date d'ajout 12/12/2024 15:21:44
Modifié le 16/01/2025 16:38:53

Notes :

Ce document nous a aidé à implémenter notre simulation python.

Pièces jointes

- Iceberg dynamics
-

Le lin : une fibre d'avenir pour la construction

Type de document Page Web
Auteur Joy Cordier
Résumé Le lin devient une alternative durable dans la construction grâce à ses propriétés mécaniques, thermiques et environnementales, offrant une solution innovante pour le secteur.
Date 2023-02-09
Langue Français

URL <https://www.bouygues-construction.com/blog/fr/lin-fibre-construction/>
Consulté le 06/12/2024 21:37:40
Type de site Web Blog
Titre du site Web Bouygues Construction
Date d'ajout 06/12/2024 21:37:40
Modifié le 16/01/2025 16:36:56

Marqueurs :

Etat de l'art

Pièces jointes

- Le lin : une fibre d'avenir pour la construction
-

Les incroyables maisons flottantes de Waterstudio

Type de document Page Web
Auteur Antoine Lorgnier
Résumé Aux Pays-Bas, le cabinet d'architecture Waterstudio imagine et construit depuis plus de vingt ans des maisons flottantes.
Date 2023-12-14
Langue Français
URL <https://ideat.fr/les-incroyables-maisons-flottantes-de-waterstudio/>
Consulté le 06/12/2024 21:39:13
Type de site Web Site d'informations architecturales
Titre du site Web IDEAT
Date d'ajout 06/12/2024 21:39:13
Modifié le 16/01/2025 16:35:37

Marqueurs :

Etat de l'art

Pièces jointes

- Snapshot
-

Maçonnerie de petits éléments BNTEC P10A

Type de document Norme
Auteur M Troton
Résumé Ce document décrit les règles de calcul et dispositions constructives minimales pour les maçonneries traditionnelles de petits éléments, notamment les parois et murs, selon la norme NF DTU 20.1 P4 (utilisation du document pour connaître la charge admissible sur les sols et l'épaisseur des murs)
Date 2008-10-10
Langue Français

Catalogue de bibl. Zotero
Consulté le 21/11/2024 01:00:00
Lieu La Plaine Saint-Denis, France
Maison d'édition AFNOR
Numéro identifiant P 10-202-4
Nb de pages 83
Version 2008-10-10
Commission BNTEC (Bureau de Normalisation des Techniques et des Equipements de la Construction
Statut Norme française homologuée
Organisation Association Française de Normalisation (AFNOR)
Date d'ajout 30/11/2024 10:13:20
Modifié le 16/01/2025 16:38:30

Marqueurs :

Dimensionnement

Pièces jointes

- PDF
-

Maîtriser la consommation d'énergie

Type de document Page Web
Auteur Fédération Nationale du Bois
Résumé La page présente des stratégies pour réduire la consommation d'énergie dans la première transformation du bois. Elle met en avant des pratiques optimisées, l'utilisation d'équipements performants et le recours aux énergies renouvelables pour améliorer l'efficacité énergétique du secteur. (Utilisation pour l'analyse du cycle de vie afin de déterminer la consommation d'énergie pour chaque étape de fabrication)
Date 2014
Langue Français
URL <https://www.fnbois.com/premiere-transformation/maitriser-la-consommation-denergie/>
Consulté le 03/12/2024 15:09:22
Type de site Web Site institutionnel spécialisé
Titre du site Web Maîtriser la consommation d'énergie
Date d'ajout 03/12/2024 15:09:22
Modifié le 16/01/2025 16:37:21

Marqueurs :

Énergie

Pièces jointes

- Snapshot

Marinewood durabilité des bois au contact de l'eau de mer

Type de document Page Web

Auteur Institut Technologique FCBA

Résumé Le projet MarineWood explore la durabilité des bois utilisés au contact de l'eau de mer, en particulier le long du littoral Aquitain. Il compare les performances des bois non traités face aux solutions en béton et propose des recommandations pour prolonger leur durée de vie. (utilisation pour évaluer la durabilité de notre bois)

Date 2016-11-01

Langue Français

URL <https://www.fcba.fr/travaux/marinewood-durabilite-des-bois-au-contact-de-leau-de-mer/>

Consulté le 30/11/2024 12:59:34

Type de site Web Site institutionnel spécialisé

Titre du site Web Marinewood durabilité des bois au contact de l'eau de mer

Date d'ajout 30/11/2024 13:00:06

Modifié le 16/01/2025 16:37:33

Marqueurs :

Choix du matériau

Pièces jointes

- Snapshot

[MyCO2] Empreinte carbone française moyenne : mise à jour 2021 | Carbone 4

Type de document Page Web

Auteur Romain Ledoux

Auteur Juliette Blais

Résumé Bilan carbone des dépenses annuelles énergétiques par habitant en fonction des domaines (logement, nourriture...)

Date 2023-05-11

Langue fr

Titre abrégé [MyCO2] Empreinte carbone française moyenne

URL <https://carbone4.com/fr/analyse-myco2-empreinte-carbone-moyenne-2021>

Consulté le 06/01/2025 11:32:10

Type de site Web Site commercial

Titre du site Web Carbone 4

Date d'ajout 06/01/2025 11:32:10

Modifié le 16/01/2025 16:37:47

Marqueurs :

Habitabilité

Pièces jointes

- Snapshot
-

Projet oceanix

Type de document Page Web

Auteur Bee Engineering

Date s.d

Langue Français

URL <https://bee-eng.com/oceanix-city-le-projet-de-villes-flottantes-autonomes-et-modulables/>

Consulté le 03/12/2024 15:45:33

Type de site Web Commercial

Titre du site Web “Oceanix City” : le projet de villes flottantes autonomes et modulables

Date d'ajout 03/12/2024 15:45:33

Modifié le 16/01/2025 16:41:34

Marqueurs :

Etat de l'art

Notes :

Utilisation de ce document pour découvrir les technologies flottantes existantes

Pièces jointes

- projet oceanix - Recherche Google
-

Quelle est la production d'un panneau solaire en kwh pour 1 m2 ?

Type de document Page Web

Auteur Engie

Résumé Production électrique d'un panneau solaire par an par mètre carré

Date 2024-03-19

Langue fr-FR

URL <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/caracteristiques-panneaux-solaires/quelle-est-la-production-d-un-panneau-solaire-en-kwh-pour-1-m2.html>

Consulté le 06/01/2025 11:49:51

Titre du site Web Engie my power

Date d'ajout 06/01/2025 11:49:51

Modifié le 16/01/2025 16:36:43

Marqueurs :

Énergie

Pièces jointes

- Snapshot
-

Une ville flottante construite en Corée du Sud : voici à quoi elle ressemble et pourquoi elle a été construite !

Type de document Page Web

Auteur Enzo Campetella

Résumé La Corée du Sud construit une ville flottante innovante pour répondre aux enjeux liés à l'élévation du niveau des mers. Ce projet futuriste vise à créer un espace urbain résilient, durable et adapté aux défis du changement climatique.

Date 2024-05-17

Langue Français

Titre abrégé Une ville flottante construite en Corée du Sud

URL <https://www.tameteo.com/actualites/actualite/incroyable-une-ville-flottante-construite-en-coree-du-sud-pour-lutter-contre-l-elevation-du-niveau-des-mers-futur-innovation.html>

Consulté le 06/12/2024 21:39:10

Extra Section: Actualité

Type de site Web Site d'actualité spécialisé

Titre du site Web Tameteo.com | Meteored

Date d'ajout 06/12/2024 21:39:10

Modifié le 16/01/2025 16:32:36

Marqueurs :

Etat de l'art

Notes :

Utilisation de ce document pour découvrir les technologies flottantes existantes en Asie

Pièces jointes

- Snapshot
-

Waya | Your place in the future

Type de document Page Web

Auteur Pierpaolo Lazzarini

Résumé WAYA propose des solutions architecturales innovantes, notamment des structures flottantes inspirées de la nature. Ces projets allient durabilité, design futuriste et

technologie pour créer des habitats autosuffisants et écologiques adaptés aux environnements aquatiques.

Date s.d

Langue Anglais

URL <https://www.waya.it/>

Consulté le 07/12/2024 13:39:55

Type de site Web Site commercial

Titre du site Web Waya Architecture

Date d'ajout 07/12/2024 13:39:55

Modifié le 16/01/2025 16:32:40

Marqueurs :

Etat de l'art

Pièces jointes

- Waya | Your place in the future
-

Wayaland, l'art de vivre sur l'eau

Type de document Page Web

Auteur Harmonies

Résumé Wayaland est un concept futuriste d'habitat flottant conçu pour offrir un mode de vie durable sur l'eau. Inspiré des pyramides, ce projet modulaire intègre des technologies écologiques et autosuffisantes, proposant une nouvelle façon de vivre en harmonie avec les milieux aquatiques.

Date 2020-09-16

Langue Français

URL <https://www.harmoniesmagazine.com/fr/architecture-interieurs-fr/projets-en-relief-fr/wayaland-lart-de-vivre-sur-leau/>

Consulté le 06/12/2024 21:39:16

Type de site Web Site d'actualité

Titre du site Web Harmonies Magazine

Date d'ajout 06/12/2024 21:39:16

Modifié le 16/01/2025 16:34:24

Marqueurs :

Etat de l'art

Pièces jointes

- Snapshot

8 Déclaration éthique



DECLARATION ETHIQUE DE NON PLAGIAT

Je m'engage sur les points suivants

- 1 - Cette production est le fruit d'un travail personnel et constitue un document original
- 2 - Je sais que s'approprier sous mon nom la production d'une autre personne est une pratique sévèrement sanctionnée par la loi
- 3 - Personne d'autre que moi n'a le droit de faire valoir cette production en totalité ou en partie comme la sienne
- 4 - Les propos d'autres auteurs figurent comme des citations (entre guillemets, en italique)
- 5 - Les productions sur lesquelles je m'appuie sont systématiquement citées et référencées selon un système clair et précis

Nom :
MURE
BENAICHA

Date :
06/01/2025

Prénom :
Martin
Saad

Signature :

A handwritten signature consisting of two stylized, cursive lines.