LIÈGE université Library

https://lib.uliege.be

https://matheo.uliege.be

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Analyse multi-critère de la pertinence de différents systèmes structurels pour la construction de villes flottantes en Mer du Nord

Auteur : Jennen, Thomas
Promoteur(s) : Denoël, Vincent
Faculté : Faculté des Sciences appliquées
Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine
Année académique : 2024-2025
URI/URL : http://hdl.handle.net/2268.2/23264

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

UNIVERSITE DE LIEGE
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

Analyse multi-critère de la pertinence de différents systèmes structurels pour la construction de villes flottantes en Mer du Nord

Jennen Thomas

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de :
Ingénieur Civil Architecte, à finalité spécialisée en Ingénierie Architecturale et Urbaine

Promoteur :
Denoël Vincent

Année académique: **2024 - 2025**

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement mon promoteur, M. le Professeur Vincent Denoël, pour son accompagnement tout au long de ce travail. Malgré l'éloignement géographique entre la Belgique et les États-Unis, il a toujours été disponible pour me guider et répondre à mes questions.

Je souhaite également adresser mes remerciements à Mme Vicky, de chez Blue 21, pour l'échange de ressources et de documents qui ont nourri ma réflexion et enrichi le contenu de ce mémoire.

Ma reconnaissance va également à M. Joep van der Zanden, de chez MARIN, pour le temps qu'il m'a accordé, sa disponibilité et les informations techniques particulièrement utiles qu'il m'a transmises. Son aide a été déterminante pour certaines parties de mon analyse.

Merci également à M. Koen Olthuis, du bureau Water Studio, pour avoir pris le temps de répondre à mes questions, ainsi qu'à Mme Sarah Hahn, du bureau Bjarke Ingels, pour l'échange d'informations qui a contribué à étoffer ma compréhension du sujet.

Je n'oublie pas Mme Azin Amini, de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, que je remercie pour sa disponibilité et le temps qu'elle m'a consacré.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien constant tout au long de mon parcours universitaire.

Je tiens à préciser que ce mémoire a bénéficié d'une relecture orthographique à l'aide d'un outil d'intelligence artificielle, utilisé uniquement dans le but de corriger d'éventuelles fautes de langue. Il est important de souligner que l'ensemble du travail de recherche, d'analyse, de rédaction et de réflexion a été entièrement réalisé par mes soins.

Résumé

La construction de villes flottantes représente une piste innovante pour répondre aux enjeux croissants liés à la montée du niveau des mers, à la saturation du foncier et aux pressions environnementales globales. Bien que cette solution soit encore très peu explorée à grande échelle, elle suscite un intérêt croissant en raison de son potentiel à offrir des habitats résilients, modulables et respectueux de l'environnement marin.

En parallèle, les progrès technologiques dans le domaine des structures flottantes permettent aujourd'hui d'envisager des applications plus ambitieuses. Néanmoins, la faisabilité technique, la durabilité des systèmes, la tenue aux charges environnementales et l'organisation spatiale de ces plateformes doivent encore faire l'objet d'analyses approfondies.

Le présent travail de fin d'études s'inscrit dans cette dynamique. Il vise à analyser, de manière multicritère, la pertinence de différents systèmes structurels pour la construction de villes flottantes en mer du Nord. L'étude débute par une revue de littérature approfondie, abordant l'évolution des constructions flottantes, les motivations liées à leur émergence, les contraintes techniques, économiques et environnementales, ainsi que les concepts existants à travers le monde.

Dans la seconde partie, une approche expérimentale est développée. Elle consiste en l'analyse structurelle comparative de plusieurs types de plateformes flottantes (caisson en béton, grillage de poutres en béton classique et en béton allégé), à travers des modélisations numériques, des vérifications de flottabilité, de résistance mécanique, et des simulations de comportement en mer agitée. Les implications de la géométrie, des matériaux, des connexions et des systèmes d'amarrage sont également étudiées. L'étude a, en supplément, exploré les enjeux d'approvisionnement en eau et en alimentation, les contraintes d'aménagement, ainsi que les possibilités de mobilité interne par navettes maritimes.

Les résultats obtenus permettent de dégager les avantages et les limites de chaque système étudié, et de proposer des recommandations concrètes pour le développement futur de villes flottantes. Ce travail a permis d'objectiver, par la simulation numérique, les avantages et les limites mécaniques de chaque solution dans le cadre d'une ville maritime de grande envergure en mer du Nord. Il a démontré la faisabilité technique de plusieurs types de structures flottantes, et identifié clairement le caisson en béton comme la solution structurelle la plus pertinente pour ce contexte. Il a également mis en lumière les défis liés à l'autonomie des ressources, à la stabilité dynamique et à l'urbanisme maritime. Ce travail contribue ainsi à la réflexion sur des solutions urbaines durables face aux défis du XXIe siècle.

Mots-clés : Villes flottantes, Structures flottantes, Urbanisme maritime, Résilience climatique, Aménagement maritime, Habitat alternatif . . .

Abstract

The construction of floating cities represents an innovative approach to address the growing challenges related to rising sea levels, land scarcity, and global environmental pressures. Although this solution remains largely unexplored on a large scale, it is attracting increasing interest due to its potential to offer resilient, adaptable, and environmentally friendly habitats.

At the same time, technological advancements in floating structures now make it possible to consider more ambitious applications. However, technical feasibility, long-term durability, resistance to environmental loads, and spatial organization of these platforms still require in-depth analysis.

This final thesis is part of that broader context. It aims to evaluate, through a multi-criteria approach, the relevance of different structural systems for the construction of floating cities in the North Sea. The study begins with an extensive literature review, covering the evolution of floating construction, the motivations behind its emergence, the technical, economic and environmental constraints, as well as existing concepts around the world.

In the second part, an experimental approach is developed. It consists of a comparative structural analysis of several types of floating platforms (concrete caisson, grid of beams in conventional concrete and in lightweight concrete), using numerical modeling, buoyancy and mechanical strength assessments, and simulations of behavior in rough sea conditions. The implications of geometry, materials, structural connections, and mooring systems are also explored. In addition, the study considers challenges related to water and food supply, spatial planning, and internal mobility via maritime shuttles.

The results highlight the advantages and limitations of each structural system studied and lead to concrete recommendations for the future development of floating cities. Through numerical simulation, the study objectively assesses the mechanical performance of each solution in the context of a large-scale floating city in the North Sea. It confirms the technical feasibility of several types of floating structures and clearly identifies the concrete caisson as the most relevant structural solution for this specific context. The work also brings to light critical issues such as resource autonomy, dynamic stability, and maritime urban planning. As such, it contributes to the ongoing reflection on sustainable urban solutions in response to the major challenges of the 21st century.

Keywords : Floating cities, Floating structures, Maritime urbanism, Climate resilience, Marine spatial planning, Alternative habitat . . .

TABLE DES MATIÈRES

Introduction **1**

Objectif **3**

1 État de l'art **4**
1.1 Évolution des constructions flottantes . . . 4
1.2 Pourquoi construire flottant ? . . . 6
1.2.1 Applications et cas d'usage . . . 7
1.2.2 Villes flottantes comme alternative au remblaiement et à l'extension des terres . . . 8
1.2.3 Maintenance et durabilité . . . 9
1.3 Freins et caractéristiques importantes à prendre en compte . . . 9
1.3.1 Obstacles institutionnels et juridiques . . . 10
1.3.2 Contraintes techniques et environnementales . . . 10
1.3.3 Risques associés . . . 10
1.4 Aspects financiers . . . 11
1.4.1 Hub de transport et logistique . . . 11
1.4.2 Habitations flottantes . . . 12
1.4.3 Fermes flottantes . . . 13
1.5 Écologie . . . 13
1.6 Spécificités de la mer du Nord . . . 14
1.6.1 Vents . . . 14
1.6.2 Vagues . . . 14
1.6.3 Courants . . . 14
1.6.4 Températures . . . 15
1.6.5 Pluviométrie . . . 15
1.7 Architecture flottante . . . 15
1.7.1 Organisation . . . 15
1.7.2 Critères généraux de qualité . . . 15
1.7.3 Forme des plateformes . . . 17
1.7.4 Taille de la ville et fonctions associées . . . 19
1.7.5 Implantation des bâtiments sur plateforme . . . 19
1.8 Social et culturel . . . 20
1.8.1 Acceptation sociale . . . 20
1.8.2 Accessibilité et équité sociale . . . 20
1.9 Structure . . . 20
1.9.1 Éolien flottant . . . 20
1.9.2 Types de structures flottantes . . . 22
1.9.3 Systèmes de connexion . . . 22
1.9.4 Systèmes d'amarrage . . . 23
1.9.5 Flottabilité . . . 25
1.9.6 Forces appliquées et charges environnementales . . . 27
1.9.7 Modèle de fondation élastique (Winkler) . . . 28
1.9.8 Géométrie, taille et confort . . . 29
1.9.9 Matériaux . . . 30
1.10 Insularité des villes flottantes . . . 31
1.10.1 Prévenir l'isolement des villes flottantes . . . 31
1.10.2 Typologie des relations avec le continent . . . 32
1.10.3 Conséquences économiques de l'insularité . . . 32

1.10.4 Activités dominantes et qualité de vie . . . 32
1.10.5 Un ancrage logistique : le rôle des ports . . . 32
1.10.6 Comparaison avec des îles existantes . . . 33
1.10.7 Alimentation . . . 35
1.10.8 Énergies . . . 36
1.11 Océanix City . . . 36
1.11.1 Dimensions et modularité . . . 36
1.11.2 Échelle et perspectives . . . 36
1.11.3 Coût financier . . . 38
1.12 Conclusion de l'état de l'art . . . 38

2 Approche expérimentale et résultats obtenus 39
2.1 Étude structurelle . . . 39
2.1.1 Choix de la géométrie de référence . . . 39
2.2 Étude structurelle du caisson . . . 40
2.2.1 Définition des dimensions du caisson en béton . . . 40
2.2.2 Vérification de la flottabilité . . . 43
2.2.3 Amarrage . . . 43
2.2.4 Modélisation numérique du caisson . . . 45
2.2.5 Vérification et calcul du moment de résistance (M_{Rd}) dans le caisson en béton . . . 57
2.3 Étude structurelle du grillage de poutres en béton . . . 59
2.3.1 Définition et vérification structurelle du grillage de poutres . . . 59
2.3.2 Vérification de la flottabilité . . . 62
2.3.3 Descente de charges . . . 62
2.3.4 Modélisation numérique de la poutre principale sur fondation élastique de Winkler 66
2.4 Étude structurelle du grillage de poutres avec béton allégé . . . 70
2.4.1 Définition des dimensions du grillage de poutres . . . 70
2.4.2 Vérification de la flottabilité . . . 71
2.4.3 Descente de charges . . . 71
2.4.4 Modélisation numérique . . . 71
2.4.5 Vérification et calcul du Moment de résistance (M_{Rd}) dans la poutre en béton allégé 75
2.5 Organisation des villes . . . 77
2.5.1 Analyse de la forme de la ville et sa taille . . . 77
2.5.2 Implantation des villes flottantes . . . 80
2.5.3 Mobilité . . . 87
2.5.4 Forme des bâtiments . . . 88
2.5.5 Répartition des fonctions au sein de la ville . . . 90
2.6 Insularité . . . 93
2.6.1 Approvisionnement en eau . . . 93
2.6.2 Approvisionnement en denrées alimentaires . . . 94
2.6.3 Approvisionnement en énergie . . . 95

3 Discussions des résultats 97
3.1 Étude structurelle . . . 97
3.1.1 Comparaison des systèmes . . . 97
3.1.2 Choix de la solution la plus adaptée . . . 98
3.2 Organisation et comportement insulaire de la ville . . . 99
3.2.1 Organisation . . . 100

4 Conclusions et perspectives **101**
4.1 Conclusions . . . 101
4.2 Limites et perspectives . . . 103

Bibliographie **104**

Annexe **114**
4.3 Interviews . . . 114
4.3.1 Interview Avec Joep Van Der Zanden, 20 février 2025 . . . 114
4.3.2 Inteview de Koen Olthuis (Waterstudio), 2025 . . . 120
4.4 Étude structurelle du caisson . . . 124
4.4.1 Définition des dimensions du caisson en béton . . . 124
4.4.2 Vérification de la flottabilité . . . 126
4.4.3 Codes modélisation numérique . . . 127
4.4.4 Résultats modélisations numériques . . . 130
4.4.5 Calcul du Moment de résistance (M_{Rd}) dans le caisson en béton . . . 136
4.5 Étude structurelle du grillage de poutre en béton . . . 138
4.5.1 Définition des dimensions des poutres . . . 138
4.5.2 Vérification de flottabilité . . . 140
4.5.3 Modélisation numérique de la poutre secondaire . . . 142
4.5.4 Modélisation numérique de la poutre en état hydrostatique . . . 143
4.5.5 Modélisation numérique poutre en béton en conditions de houle . . . 145
4.5.6 Calcul du Moment de résistance (M_{Rd}) de la poutre en béton allégé . . . 155
4.6 Étude structurelle de la poutre en béton allégé . . . 156
4.6.1 Définition des dimensions de la poutre . . . 156
4.6.2 Vérification de flottabilité . . . 158
4.6.3 Modélisation numérique . . . 160
4.6.4 Calcul du Moment de résistance (M_{Rd}) de la poutre en béton allégé . . . 167

TABLE DES FIGURES

0.1 Scénarios d'élévation du niveau de la mer aux Pays-Bas (KNMI, s.d.) . . . 1
0.2 Zones inondables en Belgique et aux Pays-Bas (Wallemacq, 2020) . . . 2

1.1 Ile flottante des Uros sur le lac Titicaca (Demers-Lemay, 2015) . . . 4
1.2 Prix d'un module pour le hub transport et logistique Space@Sean (Dafnomilis, 2020) . . . 12
1.3 Comparaison des prix entre système flottant, construction sur le continent et récupération des terres (Dafnomilis, 2020) . . . 12
1.4 Comparaison des coûts pour des habitations flottantes offshore et nearshore (Czapiewska et al., 2020) . . . 13
1.5 Score de performance selon la forme des plateformes (Chiriac et al., 2019) . . . 17
1.6 Organisation ouverte avec plateformes carrées (Chiriac et al., 2019) . . . 18
1.7 Organisation fermée avec plateformes carrées (Chiriac et al., 2019) . . . 18
1.8 Schéma de mobilité piétonne et cyclable sur plateformes hexagonales (BIG-Bjarke Ingels Group, via communication personnelle S. Hahn, 13 février 2025) . . . 19
1.9 Triangle de stabilité des systèmes éoliens flottants (Morato & Rigo, 2020) . . . 21
1.10 Comparaison des systèmes d'amarrage selon poids, profondeur et type de fond (Kwan et al., 2019) . . . 25
1.11 Équilibre stable : G sous M (Czapiewska et al., 2019) . . . 26
1.12 Équilibre neutre : G coïncide avec M (Czapiewska et al., 2019) . . . 26
1.13 Équilibre instable : G au-dessus de M (Czapiewska et al., 2019) . . . 26
1.14 Score de performance selon les dimensions des plateformes (Chiriac et al., 2019) . . . 29
1.15 Sensibilité aux accélérations et fréquence de mouvement (Czapiewska et al., 2019) . . . 30
1.16 Contributions financières annuelles départementales pour les liaisons (Guingot, 2022). . . . 34
1.17 Trois types de plateformes Oceanix selon leur fonction . . . 37
1.18 Croissance modulaire d'Océanix City — projection de l'extension par modules de 10 000 habitants (communication personnelle, S. Hahn, 13 février 2025). . . . 37

2.1 Types de structures en béton utilisées dans l'étude. . . . 40
2.2 État hydrostatique du caisson . . . 48
2.3 Comportement du caisson à t=2s (déplacement max) . . . 50
2.4 Comportement du caisson à t=5s (moment max) . . . 50
2.5 Structure sur vagues de 4m de hauteur . . . 51
2.6 Comportement du caisson à t=2s (moment max) . . . 52
2.7 Comportement du caisson à t=5s (déplacement max) . . . 53
2.8 Comparaison caisson continu et rotulé pour une ville de 10 000 habitants . . . 56
2.9 Comparaison caisson continu et rotulé pour une ville de 60 000 habitants . . . 57
2.10 Comparaison caisson continu et rotulé pour une ville d'un million d'habitants . . . 57
2.11 Définition de la section du caisson . . . 58
2.12 Répartition des efforts de la dalle sur les poutres secondaires . . . 63
2.13 Efforts sur la poutre secondaire . . . 63
2.14 Efforts sur la poutre principale entre deux poutres secondaires . . . 65
2.15 Répartition totale des efforts sur la poutre principale . . . 65
2.16 Poutre en béton en état statique . . . 67
2.17 Poutre en béton sur vague de 4m . . . 68
2.18 Poutre en béton sur vague de 8m . . . 69
2.19 Poutre en béton avec charge ponctuelle en t=1s . . . 70
2.20 Poutre en béton allégé en état statique sur l'eau . . . 72
2.21 Poutre en béton allégé sur vague de 4m . . . 73
2.22 Poutre en béton allégé sur vague de 8m . . . 74

2.23 Poutre en béton allégé avec charge ponctuelle en t=1s 75
2.24 Forme des villes 79
2.25 Villes de 10 000 habitants 83
2.26 Villes de 60 000 habitants 84
2.27 Villes de 1 000 000 habitants 85
2.28 Villes pour les structures grillage de poutres : béton alléger et béton 86
2.29 Mobilité en bateau au sein de la ville 88
2.30 Forme des bâtiments sur les plateformes 89
2.31 Exemple d'organisation fonctionnelle possible d'une ville de 10 000 habitants (inspiré du profil d'Oceanix) 93

4.1 Structure sur vagues de 8 m d'hauteur 131
4.2 Structure avec chargement ponctuel sur l'extrémité de la plateforme 132
4.3 Ville de 10 000 habitants en caissons : comparaison connecteurs rigides et rotulés 133
4.4 Ville de 60 000 habitants en caissons : comparaison connecteurs rigides et rotulés 134
4.5 Ville de 1 000 000 habitants en caissons : comparaison connecteurs rigides et rotulés . . . 135
4.6 Poutre en béton sur vague de 4m 149
4.7 Poutre en béton sur vague de 8 m 150
4.8 Poutre en béton avec charge ponctuelle sur l'extrémité 151
4.9 Ville de 10 000 habitants 152
4.10 Ville de 60 000 habitants 153
4.11 Ville d'un million d'habitants 154
4.12 Poutre en béton alléger (polystyrène expansé) en conditions de faible houle 161
4.13 Modélisation poutre sur vague de 8 m 162
4.14 Poutre en béton allégé avec charge ponctuelle sur l'extrémité 163
4.15 Ville de 10 000 habitants 164
4.16 Ville de 60 000 habitants 165
4.17 Ville d'un million d'habitants 166

2.1 Coefficient de combinaison (CEN, 2002). 42
2.2 Répartition des coefficients dans chaque cas de charge. 42
2.3 Coefficient de combinaison (CEN, 2002) 44
2.4 Cas de charges pour l'amarrage du caisson 45
2.5 Coefficient de combinaison (CEN, 2002). 61
2.6 Cas de charges sur la plateforme. 61
2.7 Étude des vues sur l'eau 78
2.8 Étude des vues sur l'eau 89

4.1 Coefficient de combinaison (CEN, 2002). 125
4.2 Répartition des coefficients dans chaque cas de charge. 125
4.3 Coefficient de combinaison (CEN, 2002). 139
4.4 Cas de charges sur le caisson. 139
4.5 Calcul de chaque $I_{f,\mathrm{mid},i}$ 141
4.6 Coefficient de combinaison (CEN, 2002). 158
4.7 Cas de charges sur le caisson. 158
4.8 Calcul de chaque $I_{f,\mathrm{mid},i}$ 159

Notation

Symbole	Définition
A	Amplitude de la houle (m),
$A_{\text{f,sup}}$	Section de la semelle supérieure d'une poutre en I (mm^2)
$A_{\text{f,inf}}$	Section de la semelle inférieure d'une poutre en I (mm^2)
A_{w}	Section de l'âme verticale dans une poutre en I (mm^2)
A_{barre}	Section d'une barre d'armature : $\pi(\varphi/2)^2$ (mm^2)
A_{si}	Section d'armatures de la nappe i : $n_i \cdot A_{\text{barre}}$ (mm^2)
A_{n}	Section efficace totale d'une poutre en I : $A_{\text{f,sup}} + A_{\text{f,inf}} + A_{\text{w}}$ (mm^2)
b	Largeur de la plateforme ou poutre (m)
b_{f}	Largeur de semelle d'une poutre en I (mm)
$\overline{BM}$	Distance entre le centre de flottaison B et le métacentre M (m)
D_i	Bras de levier entre la force i et le bas de la section (mm)
E	Module d'Young du béton (Pa)
E_b	Module de Young effectif du béton : $E_b = 22000 \cdot (f_{cm}/10)^{0.3}$ (MPa)
F_i	Effort dans l'armature i (N)
$F_c(x)$	Effort de compression dans le béton pour une hauteur comprimée x (N)
G	Centre de gravité
$\overline{GM}$	Marge métacentrique : $GM = KM - KG$ (m)
h	Hauteur de poutre ou caisson (m)
I	Moment d'inertie de la section (m^4 ou mm^4)
I_{sup}, I_{inf}, I_{w}	Inerties respectives des semelles supérieures, inférieures et de l'âme (mm^4)
k	Raideur de la fondation de Winkler (N/m^3)
k_w	Nombre d'onde : $k_w = 2\pi/\lambda$ (m^{-1})
$\overline{KG}$	Hauteur du centre de gravité (m)
$\overline{KB}$	Hauteur du centre de poussée (m)
L	Longueur de la plateforme (m)
$M(x,t)$	Moment fléchissant en un point x à l'instant t (Nm)
$M_{\text{Ed,ELU}}$	Moment sollicité ultime à l'ELU (Nm)
M_{Rd}	Moment résistant ultime de la section (Nm)
n	Nombre de divisions (éléments finis)
N_{mod}	Nombre de modules (unités flottantes)
$N(x)$	Résultante interne pour le calcul du bras de levier : $\sum F_i - F_c(x)$ (N)
$p(x)$	Charge répartie permanente (N/m)
$p_{\text{tot}}(x,t)$	Charge totale combinant la houle et les charges permanentes (N/m)
$q_{\text{permanentes}}$	Somme des charges permanentes (kN)
$Q_{\text{bâtiment}}$	Poids total des bâtiments sur la plateforme (kN)
Q_{dalle}	Poids de la dalle de répartition (kN)
Q_{poutres}	Poids des poutres principales et secondaires (kN)
RDC	Rez-de-chaussée
S_b	Module de flexion : $S_b = I_y/Y_n$ (mm^3)
T	Période de la houle (s)
$V(x,t)$	Effort tranchant à l'instant t au point x (N)
W	Poids (N)
$w(x,t)$	Déplacement transversal de la poutre au point x à l'instant t (m)
x	Coordonnée longitudinale le long de la poutre (m)
x_i	Position du $i^{\text{ème}}$ élément fini ($x_i = i \cdot \Delta x$)
Y_n	Position de l'axe neutre (mm)

y_i	Position verticale de la rangée d'armatures i (mm)
$y_{c,\text{béton}}$	Centre de gravité du béton dans la section (mm)
Δx	Pas de discrétisation pour la méthode des éléments finis (m)
δ_{i,i_2}	Fonction de Kronecker (1 si $i = i_2$, 0 sinon)
$\epsilon(y)$	Déformation en un point y de la section (sans unité)
ϵ_c	Déformation ultime du béton en compression (valeur typique : -3.5×10^{-3})
φ	Diamètre d'une barre d'armature (mm)
ρ_{min}	Taux minimal d'armatures requis (sans unité)
$\sigma(\epsilon)$	Loi de comportement de l'acier : $\sigma = \max(\min(\epsilon E_s, 500\text{MPa}), -500\text{MPa})$
λ	Longueur d'onde (m)
ω	Pulsation angulaire de la houle : $\omega = k_w \cdot v$ (rad/s)
v	Vitesse de propagation de la houle : $v = \lambda/T$ (m/s)

Dans ce travail, le moment est considéré positif lorsque la fibre inférieur est tendue et négatif lorsque la fibre supérieure est tendue.

INTRODUCTION

L'urbanisation mondiale fait face à des contraintes sans précédent : changement climatique, élévation du niveau des mers et raréfaction des terres constructibles. Comme l'affirme l'architecte néerlandais Koen Olthuis, "D'ici à 2050, 70 % de la population mondiale vivra dans des zones urbanisées. Or, les trois quarts des plus grandes villes sont situées en bord de mer, alors que le niveau des océans s'élève. Cette situation nous oblige à repenser radicalement la façon dont nous vivons avec l'eau" (cité dans Larmagnac-Matheron, 2023, paragr. 2). Parallèlement, les zones urbaines ne fournissent aujourd'hui que 40 % de l'espace urbanisable nécessaire pour loger l'accroissement démographique prévu dans les décennies à venir (PolyU RILS Channel, 2022). Dans ce contexte, explorer de nouveaux territoires d'urbanisation devient une urgence.

Plusieurs études indiquent qu'en 2050 près de 80 % des mégalopoles se trouveront en bord de mer ou sur plaines alluviales, et que la moitié de la population mondiale vivra à moins de 100 km des côtes (Ardenne et al., 2022 ; PolyU RILS Channel, 2022 ; Quirk & Friedman, 2017). Or, la fonte accélérée des glaces polaires et la dilatation thermique des océans pourraient élever le niveau marin de 80 cm à 1 mètre d'ici 2100 (Figure 0.1)(Ardenne et al., 2022 ; Choisy et al., 2020 ; PolyU RILS Channel, 2022 ; Service Changements Climatiques, s.d. ; The Impossible Build, 2023 ; Thomas, 2004 ; Wang & Wang, 2015 ; Yang et al., 2022).

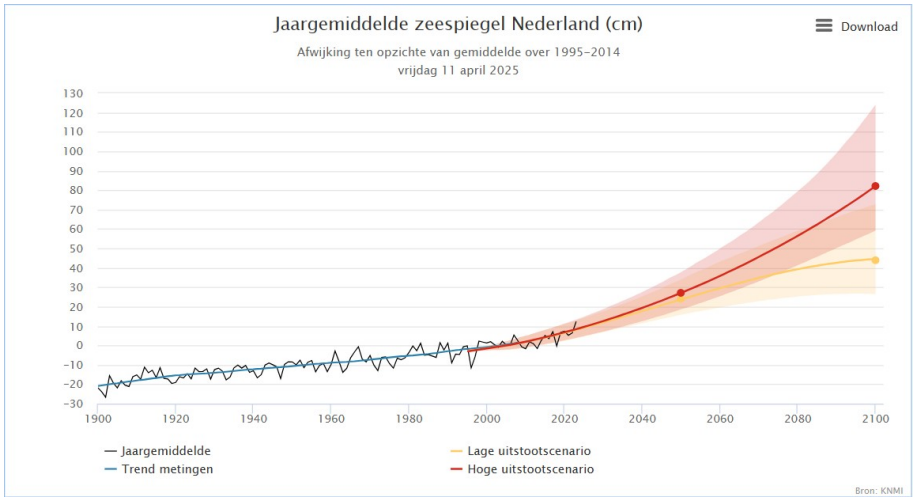


Figure 0.1 – Scénarios d'élévation du niveau de la mer aux Pays-Bas (KNMI, s.d.)

Une telle montée des eaux menacerait 90 % des mégalopoles mondiales (Faré, 2024), inonderait 6 % du territoire néerlandais, 17,5 % du Bangladesh et plus de 80 % de certaines îles (Maldives), causant ainsi la perte de vastes étendues de territoires (DamiLee, 2024 ; Proceedings of the Third World Conference on Floating Solutions, 2024 ; Wang & Wang, 2015). En Belgique, Bruges, Gand et Anvers figurent parmi les villes à risque (Figure 0.2) (Wallemacq, 2020). Selon Wang and Han (2024), la montée des eaux pourrait entraîner la disparition de 1,79 million de km² de terres et le déplacement de 187 millions de personnes – un chiffre susceptible d'atteindre 630 millions dans les zones chroniquement inondables, lui-même d'après (Bamber et al., 2019). Ce ne sont tout de même pas moins de 10 000 à 20 000 îles qui sont en sursis d'après le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) (Choisy et al., 2020).

Au-delà des enjeux humains, l'impact économique se chiffre à 9 % du PIB mondial sans mesures d'adaptation (Wang & Wang, 2015). De plus, la pression sur les terres agricoles menace la sécurité alimentaire : même en augmentant de 50 % l'efficacité des cultures, il faudrait 22 millions de km² supplémentaires – l'équivalent de l'Amérique du Nord – pour satisfaire la demande future (Loaiza Zuluaga, 2021 ; PolyU RILS Channel, 2022 ; Quirk & Friedman, 2017 ; Tomorrow's Build, 2023). D'après Atlantico (2015), une étude

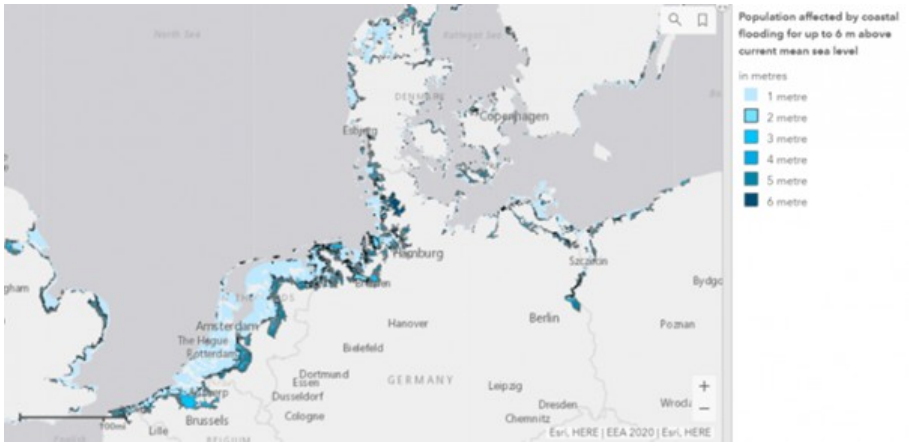


Figure 0.2 – Zones inondables en Belgique et aux Pays-Bas (Wallemacq, 2020)

basée sur les données du GIEC (Groupement d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), ce sont jusqu'à 600 millions de personnes qui pourraient souffrir de la faim en 2080 (Atlantico, 2015). Cette concurrence entre espaces constructibles et terres cultivables appelle à une réorganisation radicale de notre rapport à l'espace.

Face à ces défis, la recherche de solutions d'urbanisation alternatives s'intensifie. Parmi elles, l'occupation des surfaces aquatiques – qui représentent 70 % de la planète – apparaît comme une piste prometteuse (Joignot, 2015). C'est dans ce cadre que s'inscrit ce mémoire, dédié à l'étude des communautés flottantes, envisagées comme réponse résiliente aux contraintes environnementales et territoriales.

Ce mémoire se propose d'étudier en profondeur les communautés flottantes, un concept encore expérimental à grande échelle mais suscitant un intérêt croissant dans divers domaines. D'une part, ces plateformes pourraient constituer une réponse efficace aux problèmes de relogement liés à la montée des eaux, et d'autre part, elles offrent des perspectives innovantes pour le développement de l'énergie offshore, la mise en place de fermes flottantes favorisant l'aquaculture et la production alimentaire en mer du Nord, ainsi que pour la création de bases de secours destinées à la gestion des catastrophes climatiques. Dans des pays comme les Pays-Bas, où la pénurie de terres a conduit à une recherche constante d'alternatives, l'intégration de telles infrastructures représente une voie prometteuse pour concilier urbanisation liée aux besoins industriels et préservation de la biodiversité.

Ainsi, ce travail s'inscrit dans une réflexion globale sur l'adaptation des villes aux défis du XXI^{e} siècle. Il vise à interroger la viabilité en s'appuyant sur les principes structurels et techniques des plateformes flottantes, les enjeux urbanistiques et territoriaux de leur organisation, l'analyse économique comparée avec les solutions terrestres ainsi que les perspectives énergétiques et agroalimentaires en mer du Nord.

Cette progression permettra de dégager des recommandations pour l'intégration des villes flottantes dans les dynamiques urbaines durables de demain.

OBJECTIF

Tout comme Czapiewska et al. (2019) le mentionne dans la section "D7.2 Report : A catalogue of technical requirements and best practices for the design" de l'ouvrage Public Deliverables - SPACE@SEA, actuellement il n'existe encore aucun complexe flottant de grande ampleur destiné à l'habitation. Olaf Waals dans Brantjes (2023) et Stefan Huebner dans Huebner (2025) affirment également que, malgré l'existence de quelques maisons flottantes, il n'y a encore rien de développé à grande échelle. Ce constat justifie pleinement l'objet de ce mémoire.

Problématique : *Analyse multicritère de la pertinence de différents systèmes structurels pour la construction de villes flottantes en Mer du Nord.*

Pour répondre à cette problématique, l'étude se déploiera selon trois axes complémentaires :

1. **Analyse technique :** sollicitation des structures selon les conditions maritimes et dimensions des plateformes.
2. **Organisation spatiale :** agencement, forme, taille et lien au continent des modules flottants.
3. **Dimension économique et environnementale :** quantification des matériaux et comparaison coûts-bénéfices avec le développement terrestre.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART

1.1 Évolution des constructions flottantes

Dans cette section, nous retraçons l'histoire et les grandes étapes du développement des constructions flottantes, depuis les premiers villages lacustres jusqu'aux projets de villes marines de nouvelle génération.

Origines et contextes historiques

Depuis l'Antiquité, l'eau a été pour l'homme à la fois ressource vitale et menace potentielle. Les rives offraient eau potable, énergie hydraulique et protection défensive, mais tempêtes et tsunamis ont souvent conduit à développer des architectures visant à dominer l'eau et à s'en protéger (Loaiza Zuluaga, 2021). Aujourd'hui, confrontés au changement climatique et à la montée du niveau marin, les rapports à l'eau évoluent vers une cohabitation visant à laisser de l'espace à l'eau au lieu de lutter contre celle-ci (Loaiza Zuluaga, 2021).

Prémices lacustres et insulaires

La volonté des êtres humains de construire et s'étendre sur l'eau n'est pas récente. Le plus ancien village lacustre d'Europe, sur pilotis, remonte à 8 000 ans sur le lac d'Ohrid (Albanie) (De Schaepmeester, 2023). Il s'agissait d'un moyen d'échapper aux dangers et variations du niveau de l'eau. Le concept de villes sur l'eau est parfois bien ancré dans certaines civilisations depuis de nombreux siècles. C'est le cas notamment des îles flottantes des Uros, sur le lac Titicaca (Pérou), qui datent du XIII^{e} siècle et abritent encore 1 500 habitants sur des îles de roseau totora d'environ 1 m d'épaisseur (Figure 1.1) (Bagayoko & Parrot, 2021 ; Immorise, 2025).

Figure 1.1 – Ile flottante des Uros sur le lac Titicaca (Demers-Lemay, 2015)

Au même titre, le Cambodge abrite de nombreux villages flottants et sur pilotis (Huebner, 2025 ; Tomorrow's Build, 2023).

Seconde guerre mondiale et infrastructures ponton

C'est seulement pendant la seconde guerre mondiale, avec la nécessité d'avoir des pistes d'atterrissage flottantes, que la conception de structures flottantes s'est fortement développée et à plus grande échelle (Wang & Tay, 2011). Il s'agissait d'abord principalement des systèmes pontons [1]. Le Japon a beaucoup développé ces méthodes de construction avec la réalisation de l'aéroport offshore Megafloat, en mer japonaise, qui est de type ponton multimodules (Jiang et al., 2023 ; Wang & Tay, 2011). En parallèle, l'éolien flottant a émergé à la fin des années 1990 et début des années 2000 (Sirenergies, s.d.).

Maisons amphibies et premiers quartiers flottants

Parmi les solutions et technologies de constructions flottantes, les maisons amphibies voient le jour. Les maisons amphibies, capables de s'élever verticalement le long de poteaux d'amarrage en cas de crue, sont apparues aux Pays-Bas en 2005 dans le projet Maasbommel regroupant 32 maisons (Climate ADAPT, 2022). Une maison amphibie est construite hors eau et est imaginée pour flotter lorsqu'il y a une crue ou une inondation grâce à un système d'amarrage auquel est relié le bâtiment (Climate ADAPT, 2022). Il s'agit d'une solution apparue en réponse au sentiment de peur grandissant au sein de la population menacée par la montée des eaux. C'est pourquoi on retrouve ce type d'infrastructure principalement aux Pays-Bas et en Angleterre au bord de la Tamise. Concrètement, comment cela fonctionne-t-il ?

La fondation de la maison est constituée d'un bloc en béton creux sous lequel va venir se glisser l'eau et progressivement faire glisser verticalement la maison le long des poteaux d'amarrage (Climates ADAPT, 2022 ; Galoffre, 2015). Dans le cas de Maasbrommel, les maisons pourraient s'élever verticalement jusqu'à 5,5m (Climates,ADAPT, 2022). Néanmoins ces infrastructures posent de réelles difficultés en cas d'évacuation incendie car il est nécessaire d'avoir une solution en temps normal et une évacuation possible en période où la maison est surélevée (Climates,ADAPT, 2022). Une autre contrainte induite par ce type de réalisation est que les impétrants doivent êtres flexibles en raison du mouvement du bâtiment (Climates,ADAPT, 2022). La réalisation de l'amarrage et la fosse en béton entraînent des surcoûts qui sont contrebalancés par rapport à une maison sur pilotis car la zone immergée offre un espace supplémentaire utilisable (Le Moniteur, 2014).

C'est aux Pays-Bas que sont apparus les premiers quartiers flottants. Parmi ceux-ci, il y a notamment steigereiland, construit en 2010 à Ijburg à Amsterdam (DW Documentary, 2023). Il accueille 75 maisons flottantes (Ajibade & Shah, 2024 ; Czapiewska, et al., 2019 ; Rayman, 2014). Ce quartier suit le mouvement des marrées grâce à sa flottaison (DW Documentary, 2023). Ces maisons en béton posées sur des flotteurs en plastiques sont encastrées dans des poteaux pour leur éviter de dévier, cependant elles sont libre de monter et descendre avec l'eau le long de ces fondations (DW Documentary, 2023). Les étages inférieurs sont situés sous la ligne de flottaison (DW Documentary, 2023).

On l'aura compris, les Pays-Bas sont très présents dans ce domaine, ce qui semble évident lorsque l'on connaît la situation géographique du pays avec 26% des terres sous le niveau moyen de la mer (Meyer, 2023). Cependant, ils sont loin d'être les seuls à proposer des concepts flottants. Un autre projet ayant émergé est l'île SEVIT, faisant partie d'un ensemble de 2 îles, en Corée du Sud (Jiang et al., 2023). Cette île est un centre de loisirs et de conférences (Jiang et al., 2023 ; Wang & Tay, 2011).

Fermes et infrastructures agro-alimentaires flottantes

En 2019, Rotterdam a inauguré la première ferme flottante au monde, hébergeant des dizaines de vaches sur trois niveaux (écuries, stockage de fumier, captage des eaux pluviales) et partiellement autonome grâce à de l'énergie photovoltaïque et un traitement interne des eaux (Custos-Quatreville, s.d. ; Dillon, 2022). Cependant, elle dépend tout de même d'un champ voisin pour le pâturage des bêtes qui se nourrissent avec l'herbe des terrains de golf alentours ainsi que de restes alimentaires (Dillon, 2022). Ces fermes pourraient faire de la pisciculture et de l'aquaculture verticale, ce qui serait intéressant pour des

1. Voir dans la section 1.9.2

villes à fortes densités de population qui manquent de terres arables (Atlantico, 2015). Ces plateformes flottantes pourraient également devenir le lieu de processus de désalinisation de l'eau (Atlantico, 2015).

Ce modèle de ferme flottante anticipe les ruptures d'approvisionnement pouvant surgir en cas de catastrophe météorologique (inondations), comme observées lors de l'ouragan Sandy à New York en 2012, avec pour conséquence une pénurie de produits frais en quelques jours (Deluzarche, 2018 ; Dillon, 2022 ; Custos-Quatreville, s.d.). Cela permettrait de s'imposer comme solution alternative pour des villes dépendant de longues chaînes d'approvisionnement (Dillon, 2022).

Projets de villes flottantes

Ces dernières années, des projets de plus grande envergure encore, commencent à émerger. Ces projets répondent au nom de villes flottantes. Une ville flottante, par définition, reprend un groupement d'habitations et infrastructures en zone marine établies sur des plateformes flottantes connectées qui fonctionnent ensemble de manière à former une microsociété qui serait autonome (Office québécois de la langue française, 2019).

- **Oceanix City (Busan, Corée du Sud)** : prototype de microsociété modulaire, soutenu par l'ONU pour accueillir 12 000 et, à terme, 40 000 migrants climatiques, articulé autour de trois îlots fonctionnels (habitat, recherche marine, vie sociale) et conçu de manière à pouvoir s'étendre au fur et à mesure (Atenor, 2019 ; DamiLee, 2024 ; Faré, 2024). La première phase de construction était prévue en 2023 (Viva Arquitectura, 2022). Même si, aujourd'hui, les travaux ne semblent pas encore avoir commencé, cela témoigne de la réalité actuelle qui est de plus en plus tournée vers des solutions flottantes en réponse au changement climatique.
- **Maldives** : déjà en construction aujourd'hui face à l'urgence climatique de la région, une ville flottante se dessine au large des Maldives. Les Maldives possèdent des côtes parfois seulement 50 cm au dessus du niveau de l'eau (DW Documentary, 2023). Projet de cité flottante de 5 000 maisons pour 20 000 habitants dans un lagon constituant en lui même une première barrière protectrice contre l'environnement marin, à 15 minutes par bateau de Malé, connecté par canaux et ponts, typologie villa 4 façades, ossature bois, récupération des eaux grises et un tirant d'eau calculé de 1,2 m (DamiLee, 2024 ; DW Documentary, 2023 ; Quirk & Friedman, 2017).
- **Shimizu "Nénuphar" (Lilypad)** : cellule de 3 km de diamètre pour 10 000–50 000 habitants, tour centrale de 1 km pour l'autosuffisance alimentaire, extensible en modules et unités jusqu'à 50 km de diamètre et plus d'un million d'habitants. Première phase réduite prévue vers 2030 avant de construire la grande version vers 2050 (Mesmer, 2019 ; "Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024 ; Shimizu Corporation, s.d.).
- **Lilypad mobile (par Vincent Callebaut)** : projet de métropole écologique flottante qui semble un peu moins concret à l'heure d'aujourd'hui, mobile et autonome, concept utopique explorant la mobilité et la résilience urbaine (Jiang et al., 2023 ; Wang & Tay, 2011).

L'analyse historique révèle une évolution continue : des premiers villages lacustres aux projets urbains modulaires et agro-alimentaires, démontrant que la construction flottante passe progressivement du prototype isolé à la perspective de villes résilientes et autonomes.

1.2 Pourquoi construire flottant ?

Cette section examine les motivations et bénéfices de l'habitat flottant, en réponse aux défis climatiques, économiques et territoriaux.

Les villes flottantes suscitent un intérêt croissant en raison de leur capacité à répondre simultanément à plusieurs enjeux contemporains. D'une part, elles offrent une protection naturelle contre les inondations et l'élévation du niveau de la mer, éliminant la nécessité de construire des digues de grande hauteur dont le coût serait considérable (DW Documentary, 2023). D'autre part, elles permettent d'exploiter des

superficies marines encore inoccupées, limitant ainsi l'artificialisation des terres et préservant les espaces côtiers (Atenor, 2019 ; MARIN, 2021 ; Faré, 2024). Enfin, le soutien de l'ONU à ces projets a pour objectif d'offrir un habitat accessible à l'ensemble des populations, et non uniquement aux catégories aisées (DW Documentary, 2023 ; Huebner, 2025 ; Januszkiewicz et al., 2024).

La construction flottante présente également l'avantage d'une modularité et d'une mobilité accrues : les unités peuvent être déplacées ou réagencées à tout moment, ce qui confère aux agglomérations une grande flexibilité d'organisation, en phase avec les dynamiques démographiques et économiques (Brantjes, 2023). Cette évolution est d'ailleurs encouragée par Koen Olthuis, qui pointe la rigidité des villes traditionnelles et plaide pour des structures capables de s'adapter aux fluctuations des besoins urbains (Quirk & Friedman, 2017). On y voit la promesse d'une expansion continue et d'une réorganisation permanente des espaces de vie (Calcagni & Battisti, 2025 ; Loaiza Zuluaga, 2021).

Des promesses qui semblent faire de ces constructions flottantes la solution pour des pays très investis, pour différentes raisons, dans la recherche de solutions face à l'eau, comme les Maldives ou les Pays-Bas qui sont fortement menacés ou encore le Japon où la surface urbanisable est limitée par les montagnes (Larmagnac-Matheron, 2023 ; Wang & Wang, 2015).

1.2.1 Applications et cas d'usage

Effectivement, les Pays-Bas voient dans les communautés flottantes un fort potentiel pour divers usages, comme a pu le confirmer Joep Van Der Zanden lors de notre entretien (voir en Annexe section 4.2), avec un accent davantage mis sur des applications industrielles.

Support aux parcs éoliens offshore

Les communautés flottantes peuvent abriter les équipes de maintenance des fermes éoliennes en mer, réduisant ainsi les coûts et les délais liés aux transferts journaliers du personnel (Communication personnelle, Van Der Zanden, 2025 ; Flikkema & Waals, 2019). Pendant les phases de construction et d'exploitation, des modules d'hébergement temporaires peuvent évoluer vers un habitat permanent, voire vers de véritables cités flottantes (Communication personnelle, Van Der Zanden, 2025).

Production alimentaire

La culture d'algues en mer représente une alternative prometteuse pour la production alimentaire et la séquestration du CO_2. Ces organismes captent davantage de carbone que les forêts tropicales et pouvent être transformés en biocarburants (Communication personnelle, Van Der Zanden, 2025 ; Quirk & Friedman, 2017).

Libération et valorisation de l'espace terrestre

Dans des pays densément peuplés comme les Pays-Bas ou le Japon, la construction flottante offre une solution au manque de foncier disponible (Larmagnac-Matheron, 2023 ; Wang & Wang, 2015). En effet, dans un pays comme les Pays-Bas où la grande majorité de la population vit dans l'Ouest du pays, la région est déjà saturée en espaces, soit déjà destinés à l'habitat, l'industrie ou encore l'agriculture (Communication personnelle, Van Der Zanden, 2025). En déplaçant certaines activités (logement, culture, industrie légère) sur l'eau, on peut améliorer la qualité des espaces continentaux et créer des zones tampon pour la gestion de crues ou de sécheresses (Floating Future, 2024 ; Loaiza Zulgala, 2021).

Bâtiments culturels itinérants

Les infrastructures dédiées à la culture (musées, centres d'exposition) sont parmi les premières candidates à la migration flottante, leur caractère itinérant s'accordant naturellement avec la mobilité des collections à travers le monde et des événements internationaux (Loaiza Zuluaga, 2021).

Flexibilité fonctionnelle

Sur une durée de vie prévue de cent ans, les modules flottants peuvent être désolidarisés de leur fonction initiale : lorsqu'une activité n'est plus rentable ou devient obsolète, le bâtiment peut être redéployé vers un secteur plus porteur (El-shihy, 2024 ; Loaiza Zuluaga, 2021 ; Quirk et Friedman, 2017). Cette faculté de reconfiguration continue constitue l'un des principaux atouts des villes flottantes (Communication personnelle, Van Der Zanden, 2025).

Telles sont les promesses des villes flottantes ; reste à évaluer précisément leur valeur ajoutée réelle au regard des défis techniques, économiques et environnementaux qu'elles soulèvent.

1.2.2 Villes flottantes comme alternative au remblaiement et à l'extension des terres

Afin de répondre à l'expansion des zones côtières, de nombreuses îles artificielles ont été créées par remblaiement de sable (Jiang et al., 2023). Les villes flottantes constituent une approche différente, évitant les impacts environnementaux et sociaux du dépôt massif de matériaux (MARIN, 2021).

Impact environnemental

Les structures flottantes reposent sur des systèmes d'amarrage respectueux des fonds marins, contrairement aux remblais qui dégradent les récifs coralliens et détruisent des zones constituant un habitat pour la biodiversité (Jiang et al., 2023 ; PolyU RILS Channel, 2022 ; "Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024). Le remblai détruit souvent des sites de reproduction et d'alimentation pour oiseaux migrateurs et réduit la biodiversité côtière (Huebner, 2025). De plus, l'artificialisation des sols modifie la qualité et l'acidité de l'eau, provoque des pénuries de sable et accentue la sédimentation (Ajibade & Shah, 2024 ; "Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024). À l'inverse, les plateformes flottantes ne colmatent pas les fonds marins, ne perturbent pas les courants Océaniques et peuvent favoriser la création d'habitats sous-marins et servir de récifs artificiels, améliorant ainsi la biomasse locale (PolyU RILS Channel, 2022 ; Wang & Han, 2024 ; Wang & Tay, 2011). Elles réduisent en outre les nuisances sonores liées aux travaux en permettant une préfabrication terrestre suivie d'un remorquage vers le site final (Czapiewska et al., 2020).

Rapidité de réalisation

La préfabrication en atelier permet de raccourcir considérablement les délais de construction par rapport au remblai, qui peut nécessiter plus de cinq ans pour la stabilisation des sols avant toute construction de bâtiment (Czapiewska et al., 2020 ; PolyU RILS Channel, 2022 ; "Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024 ; Wang & Wang, 2015). Ces structures offrent la possibilité d'être réalisées à différents endroits en même temps, ce qui améliorerait la rapidité de construction, à condition d'avoir les installations nécessaires. Par exemple, le "Mega-Float" de Tokyo (1 km de long) a été achevé en seulement quatre mois grâce à cette méthode (Wang & Wang, 2015 ; "Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).

Flexibilité et modularité

Les plateformes flottantes sont conçues pour être modulaires et reconfigurables : elles peuvent être déplacées, agrandies ou retirées selon l'évolution des besoins (Czapiewska et al., 2020 ; PolyU RILS Channel, 2022 ; "Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024 ; Wang & Wang, 2015). Lorsqu'une plateforme devient obsolète, elle peut être immergée volontairement pour créer un récif artificiel ou remaniée pour accueillir de nouvelles fonctions (Wang & Wang, 2015).

Résilience aux phénomènes naturels

Contrairement aux terres pleines, sujettes aux séismes et aux tsunamis, les plateformes flottantes sont isolées de la base et ne craignent pas les tsunamis et secousses sismiques grâce à leur flottabilité, ce qui améliore la sécurité des infrastructures et des occupants (PolyU RILS Channel, 2022 ; Wang & Wang, 2015).

Analyse économique

PolyU RILS Channel (2022) présente les résultats d'une étude économique qu'ils ont réalisée. L'aménagement des terres est le plus intéressant économiquement jusqu'à avoir atteint une profondeur de 15 m environ. Passé cette profondeur, une structure flottante devient plus intéressante (Brantjes, 2023 ; PolyU RILS Channel, 2022). Un modèle hybride, combinant remblai pour les zones peu profondes et plateformes flottantes pour les zones plus profondes, pourrait optimiser les coûts et offrir une stabilité accrue pour les bâtiments de grande hauteur (PolyU RILS Channel, 2022). Dans les sols meubles ou de grande profondeur, cela peut nécessiter des travaux importants pour transférer les charges vers la roche dure, tandis que les structures flottantes contournent cette contrainte grâce à la flottabilité, qui permet de reprendre les charges gravitationnelles (Ajibade & Shah, 2024 ; Wang & Wang, 2015).

Création d'espace supplémentaire

Les plateformes à fort tirant d'eau génèrent un volume utile sous la ligne de flottaison, une ressource inexploitable par l'utilisation du remblais (Wang & Wang, 2015).

Interaction avec le niveau de la mer

Grâce à un système d'amarrage qui laisse souvent la possibilité d'un déplacement vertical, la plateforme maintient toujours une hauteur constante par rapport à la surface de l'eau, indépendamment des marées, facilitant ainsi l'accostage et l'accès flottant (Wang & Wang, 2015).

1.2.3 Maintenance et durabilité

La maintenance des structures flottantes, en particulier des éléments immergés, doit être effectuée régulièrement (tous les trois ans selon Loaiza Zuluaga (2021)) afin de contrôler l'intégrité des plateformes, des systèmes d'ancrage et du raccordement de réseaux publics (Loaiza Zuluaga, 2021 ; DW Documentary, 2023). Le coût des assurances et des réparations en mer reste cependant un défi à prendre en compte dans l'évaluation globale du projet.

En définitive, les villes flottantes offrent une alternative innovante et durable face aux limites des aménagements terrestres traditionnels. Leur respect de l'environnement, leur flexibilité, leur rapidité de mise en œuvre et leur capacité d'adaptation aux contraintes marines en font une option crédible pour répondre aux enjeux d'urbanisation côtière. Toutefois, leur développement à grande échelle nécessite de surmonter certains défis techniques, économiques et réglementaires.

1.3 Freins et caractéristiques importantes à prendre en compte

La réalisation de villes flottantes rencontre avant tout des obstacles d'ordre institutionnel, réglementaire et psychologique. Sur le plan technique, ces projets sont jugés faisables par de nombreux experts, mais leur déploiement à grande échelle se heurte à plusieurs obstacles.

1.3.1 Obstacles institutionnels et juridiques

D'après Koen Olthuis (Waterstudio), les principaux freins sont d'origine institutionnelle et psychologique : il s'agit de réapprendre à considérer l'eau non pas comme une menace, mais comme une opportunité (communication personnelle, Olthuis, 2025 ; communication personnelle, Van Der Zanden, 2025). Joep Van Der Zanden confirme que "le principal défi n'est pas technique mais juridique"(communication personnelle, Van Der Zanden, 2025), les modules flottants étant assimilés à des navires et soumis aux normes de sécurité maritime, ce qui complique l'accès au financement hypothécaire et la délivrance des autorisations d'amarrage, souvent temporaires malgré la longévité des structures (communication personnelle, Olthuis, 2025 ; communication personnelle, Van Der Zanden, 2025).

1.3.2 Contraintes techniques et environnementales

La construction en mer implique de prendre en compte :

- les conditions climatiques locales (vents, courants, houle) (communication personnelle, Olthuis, 2025 ; Van Der Zanden, 2025),
- la profondeur d'eau, qui influe directement sur la conception des systèmes d'ancrage (communication personnelle, Van Der Zanden, 2025),
- l'accessibilité, limitée par les conditions météorologiques et la sécurité des liaisons maritimes (communication personnelle, Van Der Zanden, 2025),
- la répartition des masses et le centre de gravité, essentiels pour la stabilité des plateformes (communication personnelle, Olthuis, 2025 ; Van Der Zanden, 2025).

1.3.3 Risques associés

Avant toute mise en œuvre, il est essentiel d'identifier les risques inhérents aux infrastructures flottantes. Ces risques, bien que variés, doivent être pris en compte dès la phase de conception pour garantir la sécurité, la résilience et la viabilité à long terme de ces villes maritimes. La classification suivante propose une synthèse des principaux types de risques auxquels ces structures sont susceptibles d'être confrontées.

Le risque se définit comme la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un événement et de ses conséquences (Choisy et al., 2020). Pour les villes flottantes, on distingue cinq catégories majeures de risques. À chaque catégorie, une évaluation du niveau de risque a été réalisée dans le cadre du projet Océanix à l'aide de méthodes qualitatives et semi-quantitatives, notamment via la méthode du maximum, la moyenne et les nœuds papillon. Il convient cependant de noter que ces scores ne sont pas strictement comparables d'une catégorie à l'autre, chaque méthode d'évaluation reposant sur des hypothèses et méthodes différentes.

- **Risques environnementaux et climatiques** Comprennent les événements météorologiques extrêmes, la pollution marine et atmosphérique, la modification des écosystèmes et la durabilité face aux tempêtes (Choisy et al., 2020 ; Ajibade & Shah, 2024). Les technologies de ville flottante incitent à construire dans des zones à haut risque d'inondation, alors que leur capacité de résilience n'est pas encore clairement définie (Ajibade & Shah, 2024).

  Une classification des risques a été établie selon un système de notation allant de 0 à 9 et au-delà. Les événements météorologiques récurrents sont identifiés comme particulièrement critiques, obtenant des scores supérieurs à 9 dans l'analyse hiérarchique. L'impact environnemental global, incluant la pollution et les perturbations écologiques, reçoit des scores variant entre 6 et 9. Plus précisément, la perturbation de la faune et de la flore marines atteint un score de 6 à 9, tandis que la transformation du paysage marin est jugée moins critique, avec des scores entre 0 et 3. Cette hiérarchisation souligne la forte vulnérabilité écologique inhérente à ces projets (Choisy et al., 2020).
- **Risques médicaux** Liés aux difficultés d'approvisionnement en matériel médical et à la distribution de soins dans un environnement isolé (Choisy et al., 2020). Parmi les scénarios étudiés, le problème

d'approvisionnement et de distribution ressort comme le plus risqué, tandis que les maladies physiques figurent également dans les sous-catégories importantes, bien que moins critiques que les enjeux techniques ou environnementaux.

- **Risques socio-économiques** Incluent les instabilités macroéconomiques, les inégalités d'accès au logement et la possible ségrégation sociale des communautés flottantes (Choisy et al., 2020 ; Loaiza Zuluaga, 2021).
- **Risques politiques et sécurité** Dérivent des incertitudes juridiques notamment en termes d'aménagement du territoire, de la sécurité en cas de conflit et de la vulnérabilité au sabotage, les structures pouvant être coulées ou désamarrées intentionnellement (Choisy et al., 2020).
  Pour lutter contre les risques liés à la politique, ces villes devront travailler sur l'attractivité, les liaisons maritimes mises en place avec le continent, la création d'une vie communautaire, etc. (Choisy et al., 2020).
- **Risques techniques** Concernent la corrosion et l'intégrité des parties immergées, la fiabilité des systèmes énergétiques ainsi que les accidents (chutes, collisions navales, formation de glace sur la plateforme) (Choisy et al., 2020 ; Czapiewska et al., 2019).
  - Production d'énergie insuffisante
    Ce risque est évalué à partir de scores attribués aux causes (de 0 à 5) et aux conséquences (de 0 à 25), permettant de mesurer l'intensité du risque global, de très faible à très élevé. Les principales causes identifiées sont le manque de rayonnement solaire (score de 3) et les défaillances techniques (score de 2), générant un risque modéré de production énergétique insuffisante (score global de 4). Les conséquences peuvent être critiques : coupures d'électricité (score de 20), mise en péril des activités médicales (20), pouvant entraîner la mort (20), mauvais fonctionnement des usines de traitement des déchets (12), entraînant une pollution accrue (12) et une accumulation de déchets (8).
  - Mauvais état des parties immergées
    Ce risque résulte principalement d'une mauvaise circulation de l'eau autour des structures (score de 2) et d'un entretien insuffisant (score de 2), menant à un mauvais état des parties immergées (score global de 3). Les impacts comprennent la corrosion (score de 12), pouvant provoquer des ruptures structurelles (12) et compromettre la stabilité de la plateforme par une diminution de sa flottaison (9) (Choisy et al., 2020 ; Czapiewska et al., 2019).

  Pour y remédier, on propose la mise en place de dispositifs de surveillance continue et l'utilisation de coques à double enveloppe, agissant comme une barrière sacrificielle contre la corrosion (Choisy et al., 2020).

1.4 Aspects financiers

Le développement d'infrastructures flottantes, bien qu'innovant et porteur d'avenir, est confronté à des défis économiques importants. Cette section examine en détail les différents postes de dépenses liés à la construction, l'installation et l'entretien des structures flottantes, en les comparant avec leurs équivalents terrestres. Plusieurs exemples issus du projet *Space@Sea* permettent d'illustrer concrètement ces enjeux.

L'analyse financière des villes flottantes doit intégrer l'ensemble des coûts liés à la construction, aux fondations (systèmes d'amarrage), au remorquage, à l'installation et à la maintenance des modules (Czapiewska et al., 2019). Bien que ces infrastructures soient généralement plus onéreuses à construire que leurs équivalents terrestres, l'accès au foncier en mer peut s'avérer plus économique (DW Documentary, 2023).

1.4.1 Hub de transport et logistique

Dafnomilis (2020) a étudié un projet de hub logistique constitué de 96 plateformes de 45 m × 45 m et 11 m de hauteur (Figure 1.2 et Figue 1.3).

- Le coût initial des travaux de génie civil (construction, fondations, amarrage, remorquage, installation) est supérieur pour le remblai et la solution flottante comparé à une construction continentale (Dafnomilis, 2020).
- Les équipements sont plus coûteux en version flottante, chaque module devant être individualisé faute de connexions rigides permettant la mutualisation (Dafnomilis, 2020).
- Il y a également une différence dans la maintenance annuelle qui représente environ 4 % du coût de construction flottante. Néanmoins, même si cela est très minime par rapport à tous les surcoûts, la section concernant les "autres investissements" revient moins cher dans le cas de constructions flottantes. Il s'agit de tous les coûts liés au pavage, égouttage etc. (Dafnomilis, 2020).
- De la Figure 1.2, il est possible d'établir un rapport entre le coût des systèmes d'amarrage et le coût total de la construction. Ce rapport est de 15 %.

Floating modules	CAPEX	Unit	Maintenance [% CAPEX/year]
Module construction (11m)	5.487.000	[€/module]	4
Foundation & mooring	862.070		
Towing & installation	125.000		
Electric infrastructure	5.000.000	[€/unit]	4
Lighting tower	30.000		4
Pump station	500.000		4
Power substation quay	270.000		4
Power substation yard	90.000		4
Power substation general	90.000		4
Decommissioning costs	8	[%] of CAPEX	-

Figure 1.2 – Prix d'un module pour le hub transport et logistique Space@Sean (Dafnomilis, 2020)

Cost category	A1. T&L@Sea hub	A2. Onshore	A3. Reclaimed land
Civil works	647.407.000 (modules)	66.100.000	570.100.000
Equipment	513.400.000	140.800.000	140.800.000
Other infrastructure	19.288.500	27.013.500	29.648.500
Investment costs [€]	1.180.095.500	233.913.500	740.548.500
Contingency [%]	15	15	15
Total investment costs [€]	**1.357.109.825**	**269.000.525**	**851.630.775**

Figure 1.3 – Comparaison des prix entre système flottant, construction sur le continent et récupération des terres (Dafnomilis, 2020)

1.4.2 Habitations flottantes

Czapiewska et al., (2020) comparent l'implantation offshore (profondeur > 100 m) et nearshore (plus proche des côtes).

- La sous-structure (module, remorquage, installation) pèse pour 50 % du budget total de la construction.
- Il est intéressant de comparer ce pourcentage avec celui des fondations pour la construction de ponts et viaducs sur le continent en terrains difficiles comme des sols meubles par exemple. Pour ces

ouvrages le coût des fondations représente 30 à 40 % du coût total (Federal Highway Administration Research and Technology, 1999 ; MPR News, 2012, 29 avril).

- Globalement, les bâtiments flottants coûtent 8 à 16 % de plus qu'un bâtiment traditionnel (Huebner, 2025).

FLOATING DEVELOPMENT	UNIT	Case 1 offshore	Case 2 nearshore
Module cost	Million euro	€ 5.49	€ 2.99
Mooring	Million euro	€ 0.25	€ 0.25
Towing / installation	Million euro	€ 0.64	€ 0.32
Bridges	Million euro	€ 0.13	€ 0.13
Substructure	Million euro	**€ 6.50**	**€ 3.69**
Superstructure	Million euro	**€ 6.62**	**€ 6.48**
CONSTRUCTION COSTS		€ 13.12	€ 10.17
ADDITIONAL COSTS	35%	€ 4.59	€ 3.54
CAPITAL COSTS	per platform	**€ 17.71**	**€ 13.66**
VAT	20%	€ 3.54	€ 2.75
Complete city costs (incl VAT)	Nr of platforms between brackets	**€ 128 (6)**	**€ 593 (36)**
unit price (incl VAT)	**EUR/m² UFA***	**€ 4,062**	**€ 3,037**
Price substructures (no RE&H)	**EUR/m² floor area**	**€ 5,203**	**€ 2,951**

**= Usable Floor Area

Figure 1.4 – Comparaison des coûts pour des habitations flottantes offshore et nearshore (Czapiewska et al., 2020)

1.4.3 Fermes flottantes

Pour une ferme à moules, le retour sur investissement initial est atteint au bout de 15 ans (Jak et al., 2020).

Les coûts des infrastructures flottantes dépassent ceux des constructions classiques, notamment en raison des systèmes d'amarrage et de la modularité des modules. Toutefois, la rareté et le prix du foncier terrestre peuvent compenser ce surcoût, et certaines catégories d'usages (logistique, production alimentaire) peuvent offrir des retours sur investissement à long terme.

1.5 Écologie

L'impact écologique des villes flottantes doit être évalué sur le long terme. À Ijburg (Amsterdam), en activité depuis plusieurs années, la présence de poissons près des modules confirme un potentiel positif pour la biodiversité marine (DW Documentary, 2023). Toutefois, la couverture de la surface peut réduire l'agitation de l'eau et la luminosité, formant des zones de basse oxygénation. Ceci ayant un impact sur la vie sous-marine susceptible de devenir "zones mortes" (Brantjes, 2023 ; Loaiza Zuluaga, 2021). Par exemple, dans les constructions d'éolien offshore flottant, il a été déterminé que la phase de construction avait un impact négatif important en termes de bruit, notamment à cause des fondations (sur pieux), et un impact modéré concernant la dispersion des sédiments (Bergström et al., 2014). Il serait logique de se demander si encourager à vivre sur l'eau ne polluerait pas plus nos océans. D'après Quirk et Friedman (2017), cela serait même potentiellement tout l'inverse. 80 % de la pollution des océans provient des ruissellements agricoles, de l'usage de pesticides et du rejet des eaux usées sans traitement (Quirk et Friedman, 2017). L'arrivée de communautés sur l'eau conscientisera la population et ne permettra plus de tels dénis (Quirk et Friedman, 2017).

Solutions d'atténuation

- Réduire le facteur bruit qui peut être fortement atténué avec des fondations gravitaires (évitant le battage de pieux par exemple) d'après Hamunar et al. (2008) dans (Bergström et al., 2014).
- Remplacer les transports classiques par des liaisons électriques pour réduire la pollution sonore et atmosphérique (Huebner, 2025).
- Adapter le spectre d'éclairage (éclairage rouge) afin de minimiser la pénétration lumineuse sous-marine (Huebner, 2025).

Impacts positifs

A contrario, ces constructions ont potentiellement des impacts positifs grâce à l'interdiction de la pêche dans ces zones éoliennes et à l'augmentation d'habitat pour la vie marine qu'elles offrent (Bergström et al., 2014). Le fait que les modules soient remorquables et transportables s'inscrit dans une démarche plus durable, puisqu'il y aura moins de démolitions de bâtiments encore utilisables, ce qui, à terme, entrainera une économie de ressources, etc. (Quirk et Friedman, 2017).

Les villes flottantes présentent donc à la fois des opportunités pour la création d'habitats marins et des risques pour la photosynthèse sous-marine. La mise en œuvre de stratégies d'atténuation permettra d'équilibrer ces effets et de favoriser la cohabitation entre infrastructures et écosystèmes.

1.6 Spécificités de la mer du Nord

Chaque mer impose ses conditions spécifiques. Contrairement aux zones tropicales où les eaux sont quotidiennement plus calmes pouvant ponctuellement faire face à des phénomènes extrêmement violents comme des ouragans, la mer du Nord impose d'autres conditions (communication personnelle, Van Der Zanden, 2025). La mer du Nord, caractérisée par des conditions météorologiques et marines continuellement importantes, constitue un terrain exigeant pour les villes flottantes. Vent, houle, courant et variations thermiques y imposent des contraintes particulières (communication personnelle, Van Der Zanden, 2025 ; DW Documentary, 2023). Un des grands enjeux pouvant aider la conception de villes flottantes en mer du Nord résiderait en la création de barrières protectrices tout autour. Il serait très compliqué et plus coûteux de réaliser une telle construction sans élément pouvant servir de barrière protectrice (DW Documentary, 2023).

1.6.1 Vents

Les vitesses moyennes se situent entre 20 et 40 km/h, avec des pointes pouvant atteindre entre 120 et 140 km/h lors des tempêtes (Copernicus Marine Service, 2023 ; European Commission, s.d.).

1.6.2 Vagues

Les hauteurs moyennes varient de 1,5 à 4 m, jusqu'à des hauteurs de 6 à 10 m en conditions extrêmes. La période typique est de 7 s (European Commission, s.d. ; MARC, 2024). La longueur d'onde λ se calcule par :

$$\lambda = \frac{g\,T^2}{2\pi} \quad [\text{m}],$$

avec g l'accélération gravitationnelle et T la période de la vague (Temperville, 2021).

1.6.3 Courants

Les courants sont généralement de 1 à 2 nœuds (1,85–3,7 km/h), avec des pointes à 5 nœuds (9,26 km/h) (DCSMM, 2020).

1.6.4 Températures

Les températures de l'air oscillent entre 0 et 20 °C, et celles de l'eau entre 5 et 18 °C (Copernicus Marine Service, 2024).

1.6.5 Pluviométrie

À Ostende, les précipitations annuelles atteignent 929 mm (929 L/m²·an) (Climate Data, s.d.).

La mer du Nord impose donc des forces environnementales considérables qui exigent des plateformes flottantes robustes et adaptables. Toute conception destinée à cette région doit intégrer ces données climatiques et océaniques pour assurer la sécurité et la durabilité des infrastructures. Ces conditions seront notamment prises en compte dans le travail, principalement lors de la modélisation des vagues.

1.7 Architecture flottante

L'architecture flottante se distingue de l'urbanisme terrestre par sa liberté de disposition, sa modularité et sa capacité d'évolution dynamique. Cette section examine l'organisation spatiale, les exigences de sécurité, les critères de qualité et les formes optimales des plateformes, afin d'établir un cadre de conception scientifique et rigoureux pour les villes sur l'eau.

1.7.1 Organisation

Loin des contraintes cadastrales terrestres, l'architecture flottante repose sur un nouveau référentiel réglementaire maritime et se veut vivante, adaptable avec une plus grande liberté de disposition et évolutive (communication personnelle, Olthuis, 2025).

Sa modularité permet de réagencer l'espace public en fonction des besoins de la communauté, conférant ainsi une grande flexibilité d'usage (communication personnelle, Olthuis, 2025).

Plusieurs schémas d'implantation sont envisageables, depuis l'extension continue des quartiers côtiers vers des implantations plus indépendantes en haute mer, jusqu'à l'émergence future de villes-nations entièrement flottantes (Loaiza Zuluaga, 2021 ; Quirk & Friedman, 2017).

Positionner la ville flottante en connexion directe avec une agglomération existante permettrait de réduire à la fois les coûts de transport et les risques liés à l'isolement (DamiLee, 2024).

1.7.1.1 Sécurité

La sécurité requiert la mise en place de voies d'évacuation fiables et de connexions permanentes au rivage (Czapiewska et al., 2019 ; El-Shihy & Ezquiaga, 2019). Il est recommandé de compartimenter la plateforme pour isoler les zones à risque (incendie, stockage de combustibles) et de prévoir un îlot de refuge en cas d'urgence (Czapiewska et al., 2019).

1.7.2 Critères généraux de qualité

Pour être durables, attractives et intégrées à leur environnement, les villes flottantes doivent satisfaire un ensemble de critères thématiques ("Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024). Cela comprend la production d'énergie, la maintenance de la structure, la forme structurelle, l'acceptation sociale ainsi que l'impact sur l'environnement, notamment à travers les matériaux ("Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).

Ces critères structurent la conception autour de sept dimensions clés : qualité urbaine, accessibilité, attractivité, intégration territoriale, mobilité douce, autonomie énergétique et qualité écologique.

- **Ville urbaine** Une cité flottante doit présenter une forte qualité urbaine, c'est-à-dire favoriser les interactions sociales, proposer des espaces publics dynamiques et garantir une densité urbaine propice à la diversité des usages. Concrètement, cela se traduit par des constructions à étagement vertical, des rez-de-chaussée animés (commerces, services), une mixité fonctionnelle élaborée, des espaces publics ouverts à tous et une concentration de bâti autour de ces espaces afin de cadrer et dynamiser ("Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).
- **Ville abordable et accessible** Pour assurer l'inclusion de tous les usagers, la cité flottante doit offrir une accessibilité économique et fonctionnelle à une large palette de profils socio-économiques. Ceci nécessite une diversité typologique des logements, une part significative de logements sociaux et des dispositifs de mutualisation (habitat, espaces publics, stockage d'eau, etc.) visant l'optimisation des coûts ("Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).
- **Ville attractive** La vie sur l'eau constitue un atout majeur pour l'attractivité. Les espaces publics doivent tirer pleinement parti de la proximité aquatique en offrant des points de vue, des accès directs et une expérience résidentielle unique en bord de plan d'eau ("Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).
- **Intégration à la ville terrestre** À l'instar des projets néerlandais, les quartiers flottants doivent s'inscrire comme une extension cohérente des tissus urbains préexistants. Leur implantation à proximité immédiate des centres existants permet de préserver les perspectives paysagères tout en accroissant la diversité typologique de l'habitat et en renforçant la dynamique urbaine ("Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).
- **Mobilité douce** L'urbanisme flottant offre l'opportunité de promouvoir des mobilités non motorisées : piétonne, cyclable et nautique (bateaux individuels, services partagés). Il conviendrait d'instaurer une hiérarchie des voies navigables distinguant corridors principaux et canaux de moindre gabarit, de façon à garantir l'accès de chaque unité d'habitation à l'eau. Toutefois, pour assurer une intégration harmonieuse avec l'espace terrestre, la desserte routière doit rester possible pour les véhicules particuliers et les services d'urgence, tout en maintenant la priorité aux modes doux. Les infrastructures de collecte des déchets et de livraison doivent également être planifiées pour s'adapter à ce cadre multimodal ("Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).

  "La mobilité devient multidimensionnelle. Dans les villes flottantes, on pense en termes de déplacements lents sur l'eau (bateaux, kayaks), de ferries électriques rapides, mais aussi de passerelles flottantes modulaires qui servent de places publiques et de parcs." (communication personnelle, Olthuis, 2025).
- **Autonomie énergétique** Une ville flottante est l'occasion de créer une ville autonome en énergie. Comment parvenir à subvenir à nos besoins de chauffage, d'électricité et d'eau tout en conservant de l'espace public et en n'utilisant pas la totalité des toitures pour les panneaux solaires ? Pour y parvenir, il y a les 3 grands axes habituels :

  1) Réduction de la demande énergétique par une conception bioclimatique et des équipements performants ;
  2) Valorisation des flux résiduels (récupération de chaleur, réemploi des eaux grises) ;
  3) Recours massif aux énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien, etc.).

  ("Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).
- **Ville écologique** La simple construction sur l'eau ne garantit pas de facto la qualité écologique. Face au déclin de la biodiversité, les projets doivent intégrer des habitats pour la faune et la flore à plusieurs niveaux : toitures végétalisées, espaces publics, surfaces et profondeurs aquatiques. Il est indispensable de limiter l'emprise des plateformes sur la surface d'eau afin de préserver la pénétration lumineuse et l'oxygénation, et de favoriser l'implantation de végétaux oxygénants (Brantjes Makelaars, 2023 ; "Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).

- **Qualité spatiale** L'aménagement doit exploiter la spécificité du milieu aquatique pour générer une expérience spatiale marquée, avec l'eau constamment présente et accessible. Un urbanisme compact, avec des pontons à faible tirant d'eau, représente un atout pour les zones peu profondes. Les toits peuvent être aménagés en terrasses ou en espaces collectifs. L'intégration de l'eau dans le tissu bâti contribue également à atténuer l'effet d'îlot de chaleur caractéristique des villes continentales ("Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).

L'application simultanée de ces dimensions garantit que la ville flottante ne se contente pas d'exister en mer, mais qu'elle crée un environnement urbain cohérent, inclusif et respectueux des écosystèmes.

1.7.3 Forme des plateformes

Sur terre, la topographie définit les limites urbaines ; en mer, ces limites sont déterminées par la géométrie et la taille des plateformes (Dafnomilis, 2020). Les plateformes offrent une grande variété de configurations, mais certaines formes sont plus adéquates que d'autres. La forme optimale doit concilier constructibilité, résistance aux forces marines et logistique d'après Piatek (2016) dans (El-shihy, 2024).

1.7.3.1 Performance géométrique

Parmi les configurations élémentaires, les plateformes rectangulaires ou carrées offrent le meilleur compromis (Figure 1.5) entre facilité de construction, conformité aux charges et modularité, malgré un coût plus élevé et des angles vifs générant parfois des zones inutilisées (Dafnomilis, 2020). La maximisation de la surface constructible est donc un objectif prioritaire (Piatek, 2016, cité par El-Shihy, 2024).

Shape	Buiding ease	Compliance and forces	Gaps	Aboard logistics	Score
Triangular	3.3	4.2	3.9	2.5	3.4
Right triangle	3.5	3.9	4.2	2.9	3.5
Square	5.0	2.9	4.3	4.6	4.1
Rectangle	4.7	2.9	4.4	4.7	4.0
Hexagonal	2.7	2.6	3.7	3.2	2.9
Hexagonal-triangle	2.8	3.7	3.6	2.9	3.2
Circular	1.2	2.0	1.0	1.4	1.6
Criteria weighing	*0.25*	*0.35*	*0.05*	*0.35*	

Figure 1.5 – Score de performance selon la forme des plateformes (Chiriac et al., 2019)

Organisation urbaine à l'échelle de la ville

Au-delà de la forme des plateformes en elles-mêmes, il est possible de jouer sur la forme de l'ensemble de la ville, parfois dictée par la forme des plateformes. D'après Wang et al. (2008) et Cubukcuoglu et al. (2016) il est important d'avoir des plateformes qui favorisent une circulation de plateforme à plateforme et permettent un zonage adéquat (El-shihy, 2024). La circulation à pied doit être un élément central dans la conception de villes flottantes (Cubukcuoglu et al., 2016) dans (El-shihy, 2024).

Une disposition « ouverte » accroît les accès depuis la mer et la visibilité sur l'eau (Figure 1.6), mais accroît l'exposition aux vagues ; une disposition « fermée » améliore la protection hydraulique au prix d'une vue réduite (Figure 1.7) (Chiriac et al., 2019). Cependant, il y a un juste milieu à conserver : un aménagement trop ouvert sur l'eau augmente les zones exposées aux hautes vagues (Chiriac et al., 2019).

1.7.3.2 Configurations des plateformes

Plateformes triangulaires

C'est une des formes les plus dynamiques pour une ville modulaire. Très modulaires, elles restent inefficaces pour l'exploitation maximale de l'espace et la circulation interne, en particulier si la superstructure et les voies piétonnes coexistent (Stankovic et al. 2021) dans (El-shihy, 2024).

Plateformes carrées

Performantes en termes de distribution fonctionnelle, de stabilité et de flexibilité, elles offrent la meilleure économie d'échelle et facilitent la maintenance (Stankovic et al. 2021) dans (El-shihy, 2024). Le carré est plus performant en espace utile (Drummen et Olbert 2021) dans (El-shihy, 2024). Leur croissance demeure toutefois orthogonale (El-shihy, 2024).

Dans une disposition plus fermée comme dans la Figure 1.7 pour pallier au manque de vue sur l'eau, il est nécessaire de placer les zones résidentielles en périphérie et de créer des zones de mer intérieure au sein de la ville. Les zones industrielles sont plus en cœur de ville.

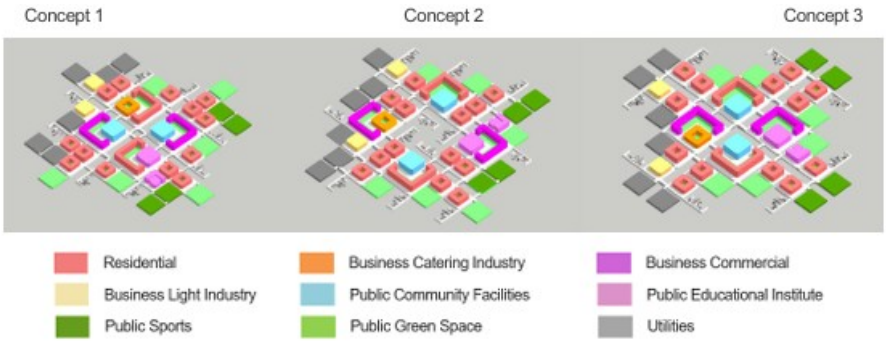


Figure 1.6 – Organisation ouverte avec plateformes carrées (Chiriac et al., 2019)

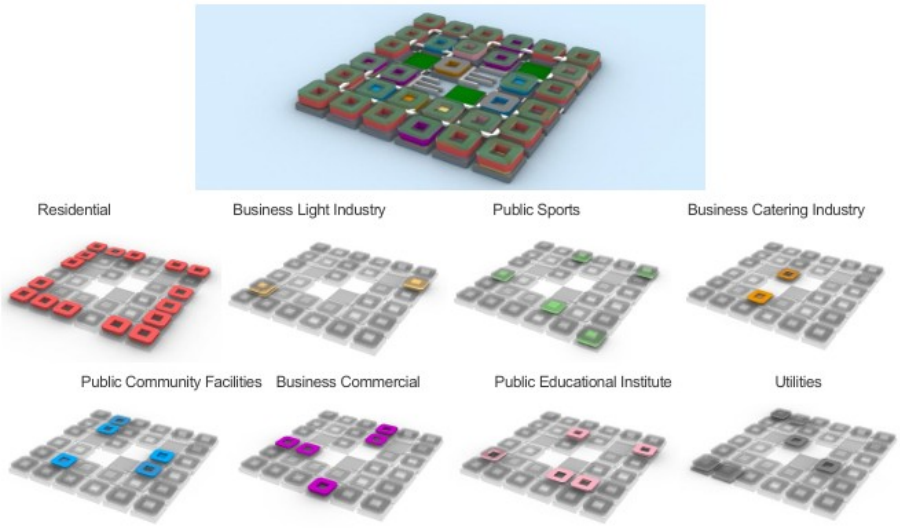


Figure 1.7 – Organisation fermée avec plateformes carrées (Chiriac et al., 2019)

Plateformes hexagonales

Grâce à leur géométrie à six côtés, elles optimisent le rapport entre le périmètre et la surface, offrent une circulation dynamique en anneau et supportent une croissance multidirectionnelle. Leur configuration se prête particulièrement à un réseau de promenades piétonnes et cyclables intégrées (Figure 1.8) (Stankovic et al. 2021) dans (El-shihy, 2024). Il s'agit de la forme offrant la meilleure caractéristique de tenue en mer (El-shihy, 2024).

La Figure 1.8 révèle l'ensemble des possibilités qu'offre la forme hexagonale concernant la mobilité. Il existe une première circulation d'abord à l'échelle de la plateforme (le quartier). Une deuxième circulation, toujours piétonne, permet de connecter une zone de 1650 habitants en une boucle de 5 minutes. Cette

promenade permet une balade agréable au bord de l'eau. Et finalement, il existe un parcours de 10 minutes à vélo pouvant connecter les 10 000 habitants. C'est-à-dire qu'en un parcours de 3 kilomètres, de nombreuses fonctions peuvent être reliées en 10 minutes pour une petite ville de 10 000 habitants, et ce tout en restant au bord de l'eau.

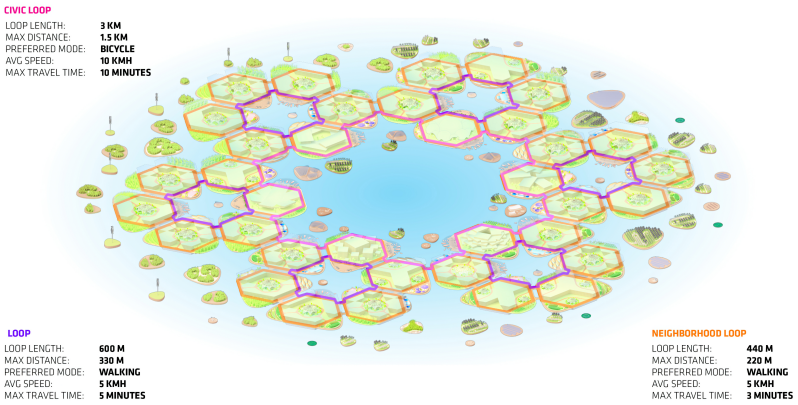


Figure 1.8 – Schéma de mobilité piétonne et cyclable sur plateformes hexagonales (BIG-Bjarke Ingels Group, via communication personnelle S. Hahn, 13 février 2025)

Le carré facilite le zonage et la maintenance, tandis que l'hexagone optimise la circulation et la croissance multidirectionnelle, qualités essentielles pour la résilience et la qualité de vie en milieu flottant.

1.7.4 Taille de la ville et fonctions associées

La taille d'une ville flottante détermine les fonctions urbaines indispensables à son bon fonctionnement. Plus la population est importante, plus les équipements collectifs doivent être diversifiés et structurés. D'après Chiriac et al. (2019), les besoins évoluent comme suit :

- **1 000 habitants**
  À cette échelle, correspondant à un quartier résidentiel, les équipements nécessaires incluent une crèche, une aire de jeux, des commerces de proximité, des espaces sociaux, ainsi que des liaisons de transport de niveau tertiaire (Chiriac et al., 2019).
- **5 000 habitants**
  La présence d'écoles primaires devient pertinente, ainsi que des espaces sociaux plus larges, des centres commerciaux de quartier et des transports secondaires adaptés à une population croissante (Chiriac et al., 2019).
- **25 000 habitants**
  À cette taille, une ville intermédiaire nécessite des établissements secondaires (collèges/lycées), des gymnases, des auditoriums, des terrains de sport, des centres sociaux, des centres commerciaux majeurs et des liaisons de transport primaires (Chiriac et al., 2019).
- **50 000 habitants**
  Une ville de cette envergure requiert l'intégration d'institutions de santé (hôpitaux), de centres culturels, d'administrations publiques, ainsi que d'infrastructures sociales renforcées (Chiriac et al., 2019).

1.7.5 Implantation des bâtiments sur plateforme

Les limites de la parcelle pour la construction de bâtiments sur la plateforme sont bornées à une distance de 2,5 m du bord (Czapiewska et al., 2019).

1.8 Social et culturel

La conception d'une ville flottante ne doit pas faire abstraction du contexte local. L'identité culturelle des habitants, les traditions architecturales ainsi que les matériaux régionaux doivent être pris en compte dans la conception des structures bâties. L'architecture mise en place devrait ainsi non seulement respecter, mais également refléter la culture locale, tant par ses formes que par les matériaux utilisés (communication personnelle, Olthuis, 2025).

1.8.1 Acceptation sociale

L'un des principaux défis liés aux villes flottantes est leur acceptabilité sociale. En effet, la transition vers ce nouveau mode de vie ne peut se faire sans l'adhésion progressive de la population. Une stratégie proposée consiste à implanter ces plateformes dans un premier temps à proximité des zones urbaines existantes. Cette approche graduelle permettrait de tester le concept tout en facilitant son intégration, avant de prévoir une expansion plus éloignée, une fois l'acceptation sociale confirmée (Brantjes Makelaars, 2023).

D'après une enquête menée aux Pays-Bas, environ 30 % de la population perçoit la vie sur l'eau comme une solution raisonnable face aux défis actuels (Huebner, 2025 ; Quirk et Friedman, 2017). Toutefois, ce chiffre ne peut être généralisé à l'échelle mondiale. En effet, les Pays-Bas subissent une forte pression liée à la montée des eaux, ce qui pourrait expliquer une meilleure acceptation de ce type de projet par rapport à d'autres contextes géographiques (Huebner, 2025).

1.8.2 Accessibilité et équité sociale

Une critique récurrente adressée aux projets de villes flottantes est le risque de les voir devenir des enclaves réservées aux populations aisées. Il est vrai que, comme pour toute innovation technologique, les premiers prototypes seront coûteux et donc accessibles à un public limité. Néanmoins, à terme, une économie d'échelle pourrait permettre une démocratisation de ces structures (Quirk et Friedman, 2017).

Pour amorcer cette transition, il est recommandé de débuter par des fonctions principalement tertiaires (commerces, services, tourisme), qui facilitent la rentabilité initiale tout en intégrant progressivement d'autres fonctions plus résidentielles. Quirk et Friedman (2017) comparent ce processus à celui observé pour les croisières ou les téléphones portables, autrefois réservés à l'élite, mais devenus accessibles à une large part de la population grâce à la réduction des coûts de production.

1.9 Structure

1.9.1 Éolien flottant

Avant d'étudier les systèmes de flottaison possibles pour les projets de constructions flottantes, il serait intéressant de voir ce qui a été mis en place à plus petite échelle pour l'éolien qui s'est mis à flotter également. Il existe 4 types de structures :

1. **Semi-submersible :** cette structure, généralement construite en acier, est stabilisée par trois flotteurs immergés et est maintenue en place par trois lignes d'amarrage en caténaires (Morato & Rigo, 2020). Ces lignes ne sont pas tendues, mais servent principalement à empêcher la dérive. Pour assurer une stabilité suffisante avec un tirant d'eau réduit (environ 10 mètres), la structure doit être lourde, atteignant environ 2 000 tonnes, sans compter le ballast additionnel.
2. **Barge :** construite en acier ou en béton, cette structure est adaptée aux zones maritimes calmes. Elle est amarrée par 6 à 9 caténaires (Morato & Rigo, 2020). Sa simplicité structurelle la limite cependant à des conditions moins exposées.

3. **Bouée (spar) :** destinée aux eaux profondes, cette structure repose sur un cylindre vertical plongeant jusqu'à 120 m de profondeur, lui assurant un tirant d'eau important. Elle est ancrée par trois caténaires (Morato & Rigo, 2020). Ce type de flotteur offre une grande stabilité avec des mouvements très lents et de faible amplitude en cas de houle, minimisant ainsi les perturbations du fonctionnement de l'éolienne (Bracq, s.d.). Le projet Hywind de Statoil illustre ce concept : initialement conçu avec un tirant d'eau de 100 mètres, il a été optimisé à 80 m après ballastage, avec un poids total d'environ 8 000 tonnes (Morato & Rigo, 2020).
4. **"Tension-leg platform" (TLP) :** Cette structure en acier est maintenue par quatre câbles prétendus qui limitent les mouvements de la plateforme (Morato & Rigo, 2020). Ces câbles doivent résister à des efforts importants, notamment à la poussée d'Archimède et aux mouvements de dérive. Comparativement à la semi-submersible, la TLP est plus légère, pesant environ 1 200 tonnes (Bracq, s.d.). Le choix du matériau des câbles est crucial : l'acier, bien que rigide et économique, présente un poids élevé, tandis que les fibres synthétiques (comme le polyester) offrent une résistance élevée à la rupture avec un poids moindre et une bonne durabilité en milieu marin, mais présentent une élasticité plus grande pouvant affecter la stabilité globale. Par exemple, un câble en fibre de 48 mm de diamètre peut supporter une charge de 80 tonnes sans atteindre la rupture (Bracq, s.d.).

Comme illustré sur la Figure 1.9, les systèmes flottants se regroupent selon la méthode dominante de stabilisation : (1) stabilisation par flottabilité, (2) par ballast ou (3) par amarrage (Darling & Schmidt, 2024).

Les plateformes stabilisées par flottabilité ont généralement un faible tirant d'eau, ce qui les rend adaptées aux eaux peu profondes. Cependant, ces structures sont plus lourdes et plus coûteuses, car elles doivent compenser une plus grande sensibilité aux mouvements de la houle (Darling & Schmidt, 2024).

Les structures stabilisées par ballast bénéficient d'une bonne inertie face aux mouvements de tangage et de roulis, mais leur tirant d'eau important les rend lourdes et coûteuses également (Darling & Schmidt, 2024).

Enfin, les systèmes stabilisés par amarrage sont considérés comme les plus stables. Ils nécessitent une surface de flottaison réduite et une structure plus légère (Darling & Schmidt, 2024). Toutefois, cette configuration impose des charges élevées sur les câbles d'amarrage, ce qui engendre un risque accru de rupture (Darling & Schmidt, 2024).

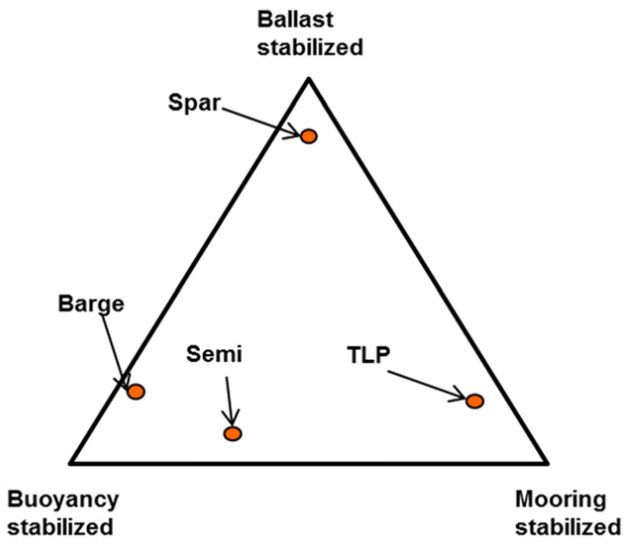


Figure 1.9 – Triangle de stabilité des systèmes éoliens flottants (Morato & Rigo, 2020)

1.9.2 Types de structures flottantes

Selon Olaf Waals, cité dans DW Documentary (2023), bien que toutes les structures flottantes soient techniquement réalisables, les choix dépendent des compromis acceptables en termes de budget et de tolérance aux oscillations structurelles.

La flottabilité [2] est l'un des principes fondamentaux de conception des structures flottantes, reposant sur le principe d'Archimède (Wang & Wang, 2015).

La conception doit intégrer de nombreux paramètres tels que le poids total de la structure, la flottabilité, les charges hydrodynamiques (vent, vagues), ainsi que l'impact des conditions environnementales, qui influencent fortement la stabilité et la durabilité des ouvrages (FasterCapital, s.d.).

Une construction flottante se compose de deux parties principales : la superstructure (par exemple, le bâtiment habité) et la sous-structure (la plateforme flottante) (Regout, 2021).

Selon Jiang et al. (2023), les très grandes structures flottantes se répartissent en deux grandes catégories :

- **Type ponton :** ces structures sont de larges plaques minces flottant à la surface de l'eau, caractérisées par une grande longueur et largeur horizontales comparées à leur faible tirant d'eau (Regout, 2021). Les dimensions peuvent atteindre jusqu'à 5 000 m par 1 000 m, avec une épaisseur de 2 à 10 m (Jiang et al., 2023). Elles sont utilisées depuis longtemps dans des eaux calmes, telles que lagons et ports, grâce à leur faible rigidité à la flexion et faible résistance hydrodynamique (Wang & Tay, 2011 ; Wang & Wang, 2015). Pour atténuer l'énergie des vagues, ces plateformes sont souvent associées à des dispositifs dissipateurs comme des brise-lames ou des plaques poreuses (Jiang et al., 2023). Ces structures sont soumises à des charges mécaniques et environnementales extrêmes, justifiant une durée de vie de l'ordre d'un siècle (Proceedings of the Third World Conference on Floating Solutions, 2024).
- **Type submersible :** adaptées aux conditions maritimes difficiles, ces structures se distinguent par une meilleure résistance hydrodynamique (Jiang et al., 2023). Elles se composent d'une plateforme surélevée au-dessus du niveau de l'eau, rendue possible grâce à des colonnes tubulaires ou caissons (Jiang et al., 2023). Cette configuration permet une bonne tenue face aux grandes vagues (Wang & Tay, 2011).

  Jiang et al. (2023) identifient quatre composants majeurs de ces structures :
  - *Corps principal :* fondation de la superstructure qui accueille les espaces habitables.
  - *Corps flottant inférieur :* assure la flottabilité, la résistance à la flexion et les performances hydrostatiques. Il comprend des compartiments internes pour le stockage (carburant, eau douce, ballast, etc.).
  - *Colonnes et supports en treillis :* relient le corps principal au corps flottant inférieur, apportant résistance, rigidité et intégrité structurelle.

  Chaque module peut atteindre des dimensions de 500 m par 170 m (Jiang et al., 2023). Ces structures sont donc plus complexes, plus coûteuses et difficiles à mettre en œuvre (Jiang et al., 2023). Dépourvues de dispositifs dissipant l'énergie des vagues, des recherches s'orientent vers des formes innovantes afin d'améliorer leur performance (Jiang et al., 2023). Par exemple, Drimer et Gafter (2018) proposent une configuration permettant la création d'un bassin protégé et accessible quelles que soient les conditions météorologiques, adapté aux hubs de transport ou plateformes industrielles (Jiang et al., 2023).

1.9.3 Systèmes de connexion

Les très grandes structures flottantes sont généralement constituées de modules interconnectés. Les connecteurs permettent de relier ces modules tout en limitant les mouvements relatifs entre eux (Jiang et

2. La flottabilité est la force exercée par un fluide sur un objet immergé, égale au poids du fluide déplacé, permettant à cet objet de flotter.

al., 2023). Le choix du degré de liberté toléré influence directement la rigidité et la durabilité de l'ensemble : plus un connecteur restreint les degrés de liberté, plus il réduit les déplacements relatifs, mais au prix de contraintes internes élevées (Jiang et al., 2023). On distingue deux grandes familles :

- **Connecteurs rigides**
  - Restreignent les six degrés de liberté (translations et rotations selon les trois axes) (Jiang et al., 2023).
  - En mer agitée, ils induisent d'importants moments de flexion dans la liaison, accélérant la fatigue et réduisant la durée de vie du connecteur (Jiang et al., 2023).
  - Ils transmettent l'essentiel des efforts entre modules, limitant fortement les mouvements relatifs mais augmentant les contraintes internes (DW Documentary, 2023).
  - En eaux calmes, ils restent pertinents et sont souvent emboîtés (Jiang et al., 2023).
  - Pour les grandes longueurs d'onde, une connexion rigide est préférable ; pour les longueurs d'onde courtes, on privilégie des charnières afin de réduire la réponse hydroélastique (Regout, 2021).
- **Connecteurs flexibles**
  - Libèrent un ou plusieurs degrés de liberté, autorisant des mouvements relatifs entre modules, notamment lors de tempêtes, ce qui diminue les contraintes internes (DW Documentary, 2023 ; Jiang et al., 2023).
  - Leur rigidité peut être graduée, allant de connexions relativement rigides à totalement flexibles (Jiang et al., 2023).
  - Exemples de technologies : charnières articulées, ressorts, câbles élastiques et systèmes sans contrainte verticale (Jiang et al., 2023).

Regout (2021) montre que l'augmentation de la rigidité rotationnelle d'un connecteur réduit le déplacement vertical global de la structure. De plus, si la longueur d'onde des vagues est inférieure à celle d'une poutre modulaire, la structure oscille de manière fluide avec des mouvements relatifs ; si elle est supérieure, l'ensemble se comporte comme un corps rigide en translation unique (Regout, 2021).

1.9.4 Systèmes d'amarrage

L'amarrage vise à restreindre les mouvements d'une structure flottante par des ancrages adaptés au fond marin et à l'environnement. Jiang et al. (2023) classent ces systèmes en deux catégories : "simples" et "hybrides". Wang & Tay (2011) proposent quant à eux une distinction entre lignes d'amarrage et pieux dauphins avec ressorts en caoutchouc. Le choix dépend de la profondeur, de la topographie du fond et de la configuration de la plateforme. Les systèmes de lignes d'amarrage sont plus adaptés en eaux profondes (Jiang et al., 2023).

- **Amarrage simple** Regroupe quatre techniques principales (Jiang et al., 2023) :
  - *Caténaire* : l'ancre, reliée par une chaîne en acier, génère une force de rappel par son poids et sa géométrie. Dans le système caténaire, c'est le poids de la chaîne qui permet la résistance, ce qui explique que les longueurs soient souvent très conséquentes. Adapté aux profondeurs jusqu'à 1 000 m, rentable jusqu'à 500 m (Jiang et al., 2023 ; Kwan et al., 2019). La chaîne a la particularité d'être de masse et de résistance plus faible en section médiane (Jiang et al., 2023). Au contraire, les extrémités sont pensées différemment afin d'éviter une tension trop importante au niveau des trous de guidage (Jiang et al., 2023). Les maillons d'extrémité présentent une plus grande résistance à l'usure et à l'élongation, et l'ajout d'une bouée permet de réduire la tension dans la chaîne (Jiang et al., 2023). Il s'agit d'un système ayant la souplesse nécessaire pour s'adapter aux décalages et mouvements du flotteur (Kwan, Luo, Ma & Wu, 2019).

  - *Tension-leg (tendu)* : câble toujours sous tension, fixé au fond avec un angle d'environ 30 à 45° (Ma et al., 2019). Les extrémités sont en chaîne d'acier, la partie médiane en fibres synthétiques (polyester ou nylon) pour réduire le poids tout en maintenant une haute résistance (Jiang et al., 2023). Ce système est plus adapté aux eaux profondes (Kwan, Luo, Ma & Wu, 2019).
  - *Tension sous-marine* : câble perpendiculaire au fond marin, souvent en polyester. La tension axiale induit automatiquement une composante horizontale lors du déplacement de la plateforme. Efficace en eaux profondes, mais limite la capacité de charge en raison des hautes tensions (Jiang et al., 2023).
  - *Pieux-pare-battage* : pieux verticaux ou inclinés associés à des pare-battages en caoutchouc, permettant une grande déformation horizontale tout en assurant un mouvement vertical libre (Jiang et al. 2023 ; Wang & Tay, 2011). Adapté aux eaux peu profondes (jetées, terminaux flottants, bases d'urgence).
  - *SALM (Single Anchor Leg Mooring)* : dispositif combinant un corps flottant, une jambe d'ancrage unique et des équipements de verrouillage et d'immersion. Initialement conçu pour les convertisseurs houlomoteurs, il est aussi adapté aux plateformes industrielles (Thomsen et al., 2016) (Jiang et al., 2023).
- **Amarrage hybride** Ces systèmes sont souvent préférés pour des modules uniques (Jiang et al., 2023). Combinaison de plusieurs techniques simples, adaptée aux fonds complexes. Par exemple, un montage caténaire–tension-leg–tendon peut être disposé selon la profondeur : caténaire côté profond, tension-leg côté moins profond, et tendon pour limiter le mouvement vertical, imaginé par Wang et al. (2019) dans (Jiang et al., 2023). Yuan et al. (2016) décrivent également un modèle combinant blocs flottants intermédiaires, câbles d'ancres et tendons verticaux pour une réponse optimisée aux charges (Jiang et al., 2023).

Sankalp and De Leeneer (2020) comparent chaînes d'amarrage et pieux pour un module de $500m \times 100m \times 5m$ pour une profondeur d'eau de 20 m. Ils montrent qu'il faut 8 chaînes contre 28 pieux pour la même tenue, que les chaînes sont moins sensibles à la nature du fond, mais que les pieux deviennent compétitifs en eaux < 10 m, car ils peuvent être installés à l'intérieur des limites de la plateforme. Contrairement aux chaînes qui demanderaient encore une longueur de 350 m à partir des limites de la structure.

Contraintes opérationnelles

L'amarrage doit permettre une adaptation verticale aux marées et aux vagues, ainsi qu'une flexibilité horizontale pour absorber les forces de vent et de houle (communication personnelle, Olthuis, 2025). Les déplacements horizontaux lents de la structure influent sur le confort et l'accessibilité par bateau (communication personnelle, Van Der Zanden, 2025). Des limites de déplacement et d'accélération sont définies pour éviter le mal de mer, sans qu'il existe de valeurs universelles (communication personnelle, Van Der Zanden, 2025). De plus, l'amarrage doit être modulaire et évolutif pour garantir la résilience à long terme (communication personnelle, Olthuis, 2025).

Configurations courantes

Les systèmes à chaînes caténaires restent prédominants, leur nombre étant proportionnel aux charges dues au vent et aux vagues, donc à la taille de la structure (communication personnelle, Van Der Zanden, 2025). Toutefois, leur coût élevé constitue un frein important (communication personnelle, Van Der Zanden, 2025).

- 4×1 : adapté aux structures à faible conséquence de défaillance (stations météorologiques automatisées).
- 4×2 : assure la sécurité de l'état endommagé.
- 4×3 et 4×4 et plus : offrent redondance pour la sécurité en service normal.

Figure 1.10 – Comparaison des systèmes d'amarrage selon poids, profondeur et type de fond (Kwan et al., 2019)

1.9.5 Flottabilité

La flottabilité et la stabilité des structures flottantes reposent sur le principe d'Archimède et sur la géométrie du volume immergé. Cette section présente les conditions d'équilibre, les concepts de centre de carène, de métacentre et de hauteur métacentrique, ainsi que les moyens d'ajuster la stabilité statique et dynamique.

Principe d'Archimède

L'alignement vertical résultant des forces hydrostatiques ($\rho \cdot g \cdot \nabla$) et des forces de gravité (W) de la structure est la condition nécessaire et suffisante pour obtenir un état d'équilibre. La position du centre de gravité au-dessus ou en dessous du centre de carène [3] n'a pas d'importance pour obtenir la stabilité (Rigot, 2011 ; Morato & Rigo, 2020).

$$\rho\, g\, \nabla = W \quad \text{Poussée d'Archimède} \tag{1.1}$$

où

- ρ est la densité du fluide,
- g l'accélération gravitationnelle,
- ∇ le volume immergé,
- W le poids total de la structure.

Stabilité statique et hauteur métacentrique

La stabilité dépend du positionnement du centre de gravité [4] G par rapport au métacentre [5] M, défini comme l'intersection des droites d'action de la poussée hydrostatique lorsque la structure est inclinée d'un faible angle. Une hauteur métacentrique faible pourrait accroître le risque de voir la structure chavirer, car le déplacement du centre de gravité ne sera pas suffisamment grand pour que la force de flottabilité qui contre l'effet puisse induire un moment suffisant pour contrer le mouvement (Czapiewska et al., 2019 ; "Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024 ; Wang & Wang, 2015).

La *hauteur métacentrique* GM est la distance $\overline{GM}$. Elle se décompose en

$$\overline{GM} \;=\; \overline{BM} - \overline{BG}, \quad \text{Hauteur métacentrique} \tag{1.2}$$

où $\overline{BM}$ est le *rayon métacentrique* et $\overline{BG}$ la distance verticale entre le centre de carène B et le centre de gravité G.

$$\overline{BM} = \frac{I}{W}, \quad \text{Rayon métacentrique} \tag{1.3}$$

I désignant le moment d'inertie du plan de flottaison autour de son axe horizontal.

3. Le centre de carène est le centre de gravité du volume d'eau déplacé.

4. Le centre de gravité G est le point d'application de la résultante des forces de pesanteur.

5. Le métacentre M est le point autour duquel la ligne d'action de la poussée hydrostatique croise la verticale initiale lorsque la structure est inclinée.

Un *déplacement isocarène* est un basculement du volume immergé provoquant une rotation autour de M. Si G se trouve en dessous de M ($\overline{GM} > 0$), la structure revient en position d'équilibre (Figure 1.11) (Czapiewska, et al., 2019 ; "Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024 ; Wang & Wang, 2015).

Si G coïncide avec M ($\overline{GM} = 0$), l'équilibre est neutre (Figure 1.12). Il est important de préciser qu'un équilibre neutre est une des situations les plus dangereuses pour les corps flottants conduisant à une situation sans moment de redressement (Czapiewska et al., 2019).

Si G est au-dessus de M ($\overline{GM} < 0$), l'équilibre est instable (Figure 1.13) (Wang & Wang, 2015).

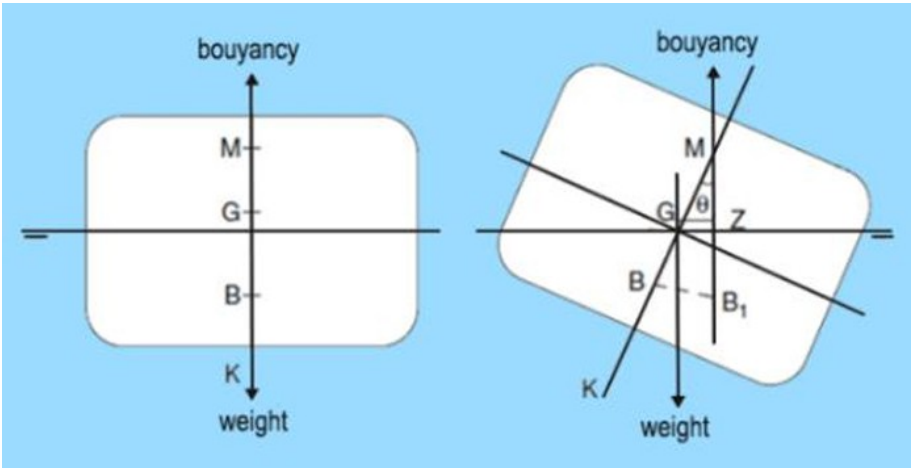


Figure 1.11 – Équilibre stable : G sous M (Czapiewska et al., 2019)

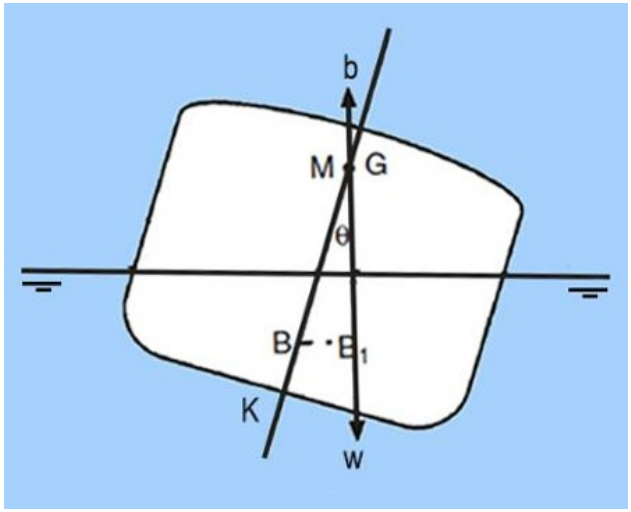


Figure 1.12 – Équilibre neutre : G coïncide avec M (Czapiewska et al., 2019)

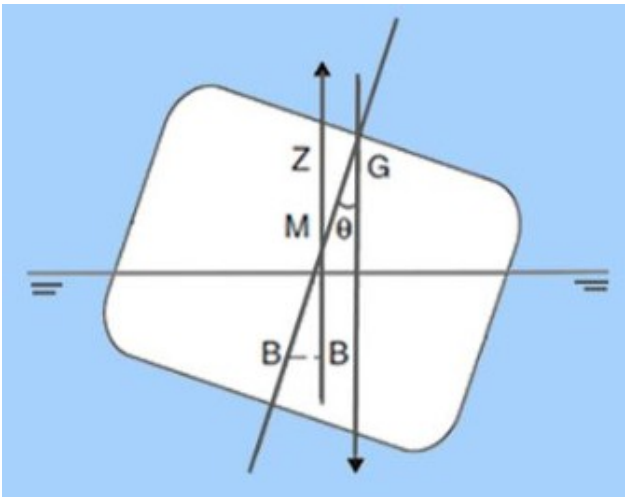


Figure 1.13 – Équilibre instable : G au-dessus de M (Czapiewska et al., 2019)

Couple de redressement

Lorsqu'une plateforme est inclinée d'un angle ϕ, le couple de redressement C_r qui tend à la ramener s'exprime par :

$$C_r = \Delta \overline{GM} \sin\phi, \quad \text{Couple de redressement} \tag{1.4}$$

Déplacement isocline

Outre la rotation, un déplacement purement vertical δ du volume immergé induit une poussée restauratrice si, pour toute variation δ, la force hydrostatique $\rho g \nabla(\delta)$ compense la variation de poids W (Rigot, 2011).

Ajustements de stabilité

Pour augmenter la stabilité :

- Abaisser le centre de gravité G par ajout de ballast sous la ligne de flottaison (Czapiewska et al., 2019 ; "Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024 ; Wang & Wang, 2015).
- Élargir la plateforme (augmentation de I) pour accroître $\overline{BM}$.
- Utiliser des superstructures légères (ossature bois) et symétriques pour minimiser la variation de G.

1.9.5.1 Cas du quartier flottant d'Amsterdam

Dans le quartier flottant d'Ijburg (Amsterdam), les maisons en bois reposent sur des plateformes en béton. Cette combinaison réduit le centre de gravité et garantit une hauteur métacentrique positive, assurant ainsi une stabilité accrue de l'ensemble (Loaiza Zuluaga, 2021). Cependant, comme l'affirme une habitante, par vent fort la maison tangue fortement, pouvant parfois entraîner une perte d'équilibre (Ipso Facto, 2023). Une situation ne dérangeant pourtant pas l'habitante qui trouve cela "excitant" de se sentir dans la tempête (Ipso Facto, 2023).

1.9.6 Forces appliquées et charges environnementales

Les structures flottantes subissent des forces de gravité et des poussées hydrodynamiques qui induisent des moments de flexion comparables à ceux d'une poutre soumise à une charge répartie (Rigot, 2011). On distingue deux phénomènes de flexion générés par la forme des vagues :

- **Hogging (arc) :** lorsque le centre de la plateforme se trouve au sommet de la vague, la partie supérieure est en tension et la partie inférieure en compression.
- **Sagging (contre-arc) :** lorsque le centre de la plateforme se situe au creux de la vague, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en tension.

1.9.6.1 Tirant d'eau

Le tirant d'eau T découle de l'équilibre hydrostatique :

$$T = \frac{W}{\rho\, b\, L}, \quad \text{Tirant d'eau} \tag{1.5}$$

où W est le poids de la structure, b sa largeur, L sa longueur et ρ la densité de l'eau (Morato & Rigo, 2020).

1.9.6.2 Forces de vent, vagues et courant

Force du vent

$$F_{\text{vent}} = \tfrac{1}{2}\, \rho_{\text{air}}\, C_d\, v^2\, A, \quad \text{Force du vent} \tag{1.6}$$

avec $\rho_{\text{air}} = 1{,}225\ \text{kg/m}^3$, C_d le coefficient de traînée, v la vitesse du vent, et A la surface projetée (Graff, 1981).

Force des vagues

$$F_{\text{vagues}} = \tfrac{1}{2}\,\rho_{\text{eau}}\,C_d\,u^2\,A_{\text{sub}}, \quad \text{Force des vagues} \tag{1.7}$$

avec $\rho_{\text{eau}} = 1025$ kg/m^3, $u = \sqrt{2gH}$ la vitesse induite par une vague de hauteur H, et A_{sub} la surface immergée (DNV GL, 2016).

Force du courant

$$F_{\text{courant}} = \tfrac{1}{2}\,\rho_{\text{eau}}\,C_d\,v_{\text{courant}}^2\,A_{\text{sub}}, \quad \text{Force du courant} \tag{1.8}$$

avec v_{courant} la vitesse du courant et les autres paramètres définis comme ci-dessus (Egis & Ramoge, 1976).

Charges inhabituelles due à la collision d'un navire avec la structure, impact des vagues, charge de neige, ...

1.9.6.3 Protection des charges climatiques

Ces projets sont souvent accompagnés de récifs artificiels au double rôle : un rôle écologique qui est de favoriser la biodiversité, d'améliorer la qualité écologique, et un rôle de protection qui est en même temps d'amortir l'impact des vagues (Wang & Wang, 2015). Le support de ces récifs est souvent en béton géopolymère ou en matériau géosynthétique (Wang & Wang, 2015).

Cependant, au-delà de la création de récifs ou de digues, il existe des recherches qui tentent de trouver des systèmes intégrés à la conception. Le Maritime Research Institute Netherlands réalise de nombreux tests dans un bassin de 40 m par 40 m, et évalue l'impact du vent et des vagues sur la structure. En absence de vent, les chaînes d'amarrage reposent librement sur le fond marin sans contraintes, mais lorsqu'il y a du vent ou des vagues, l'île a tendance à vouloir se déplacer et ce sont les chaînes qui retiennent l'île en place (Maritime Research Institute Netherlands - MARIN, 2021). Lors de leurs tests, ils placent des modules sur tout le pourtour de la ville pour absorber le mouvement des vagues et ainsi limiter l'oscillation de la plateforme. Lorsqu'il y a une vague, elles ont un degré de liberté qui leur permet de se soulever, et lorsqu'elles retombent, leur mouvement repousse les autres vagues. Ces modules sont reliés à des dynamos pour ainsi profiter des mouvements et produire de l'électricité (Maritime Research Institute Netherlands - MARIN, 2021).

1.9.7 Modèle de fondation élastique (Winkler)

L'interaction fluide-structure peut être assimilée à une poutre reposant sur une fondation élastique de Winkler, modélisé par :

$$p(x,t) = E\,I\,\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + k\,w(x,t), \quad \text{Poutre sur fondation de Winkler} \tag{1.9}$$

où $w(x,t)$ est le déplacement vertical, $E\,I$ la rigidité flexionnelle, et k le coefficient de raideur du fluide (Collin, s.d. ; Darwich, 2019 ; Qiu, 2008).

En l'absence de chargement indépendant :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{k}{E\,I}\,w = 0, \quad \text{Équation homogène} \tag{1.10}$$

Ce qui implique :

– $w_0(x,t) = e^{zx}$: forme générale de la solution proposée,

– $z^4 e^{zx} = \dfrac{-k \cdot e^{zx}}{EI}$: équation différentielle satisfaite par la solution,

– $z^4 = \dfrac{k}{EI} \cdot i^2$: relation obtenue après simplification.

La longueur caractéristique l_e se définit par

$$l_e = \frac{1}{\lambda} \quad \text{avec} \quad \lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4\,E\,I}}, \quad \text{Longueur caractéristique} \tag{1.11}$$

avec $k = b \cdot \gamma_{\text{eau}}$, où b est la largeur et γ_{eau} le poids volumique de l'eau.

1.9.8 Géométrie, taille et confort

Forme optimale

Une étude de l'Université nationale de Singapour conclut que la forme carrée est la plus économique à réaliser, tandis que le triangle offre une modularité directionnelle ("Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).

Dimensionnement modulaire

Les modules sont fabriqués en atelier puis remorqués. À Amsterdam, la contrainte des écluses limitait leur largeur à 8 m (Loaiza Zuluaga, 2021). Czapiewska et al. dans "Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions" (2024) ont établi que la taille idéale serait une plateforme aux dimensions comprises entre 40 et 60 m, ce qui permettrait d'assurer une bonne capacité de déplacement par remorqueurs.

Adam et al. quant à eux ont convenu que l'idéal serait une structure de 45 m par 45 m grâce à sa capacité modulaire, sa stabilité et sa facilité de réalisation (Dafnomilis, 2020 ; "Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024). Cela semble être confirmé par Chiriac et al. 2019 (Figure 1.14), offrant ainsi le plus grand score avec les plateformes de 100 m. Cependant, il est possible de faire un assemblage rigide pour obtenir une plateforme de 90 m par 90 m qui a également un bon score (Chiriac et al., 2019). Les plateformes de petite taille offrent plus de possibilités de bâtiments, notamment grâce à la proximité avec l'eau à chaque façade et à la plus grande flexibilité de réorganisation. A contrario, les plateformes de plus grande taille sont plus fonctionnelles.

Cependant, pour la mer du Nord, il s'avère que, pour des vagues courantes, les modules 45 m par 45 m commençaient à entrer en résonance, et donc des modules plus grands seraient plus adaptés, comme par exemple un assemblage rigide de 2 modules de 45 m (Chiriac et al., 2019).

Principle dimensions [m]	Building possibilities	Transport and installation	Functionality	Flexibility	Costs	Score
12.5	4.5	2.5	1.1	3.9	2.7	2.4
25	4.6	3.1	1.6	3.9	3.2	2.8
50	4.2	3.9	3.1	4.0	4.3	3.8
100	2.6	3.5	4.0	2.8	3.7	3.6
200	1.6	3.2	4.5	2.1	2.9	3.3
Criteria weighing	*0.05*	*0.25*	*0.3*	*0.1*	*0.3*	

Figure 1.14 – Score de performance selon les dimensions des plateformes (Chiriac et al., 2019)

Il est important de garder à l'esprit que plus la plateforme sera imposante, plus il sera nécessaire d'avoir recours à de gros remorqueurs, ce qui entraînera des coûts d'installation plus élevés (Dafnomilis, 2020). Cependant, pré-assembler avant le transport est intéressant pour réduire le travail à effectuer en mer (Dafnomilis, 2020).

Confort

Wang and Han (2024) insistent sur le fait que si même la sécurité d'un point de vue structurel est garantie, cela ne signifie pas nécessairement que la ville flottante serait habitable et confortable à vivre. Il y a un risque d'abandon de ces structures si leur confort n'est pas vérifié.

La fréquence des oscillations influence le confort. Les mouvements à basse fréquence (0,1–1 Hz) induisent des nausées, typiques des structures très rigides, alors que les plateformes plus flexibles vibrent à haute fréquence (Figure 1.15) (Czapiewska et al., 2019).

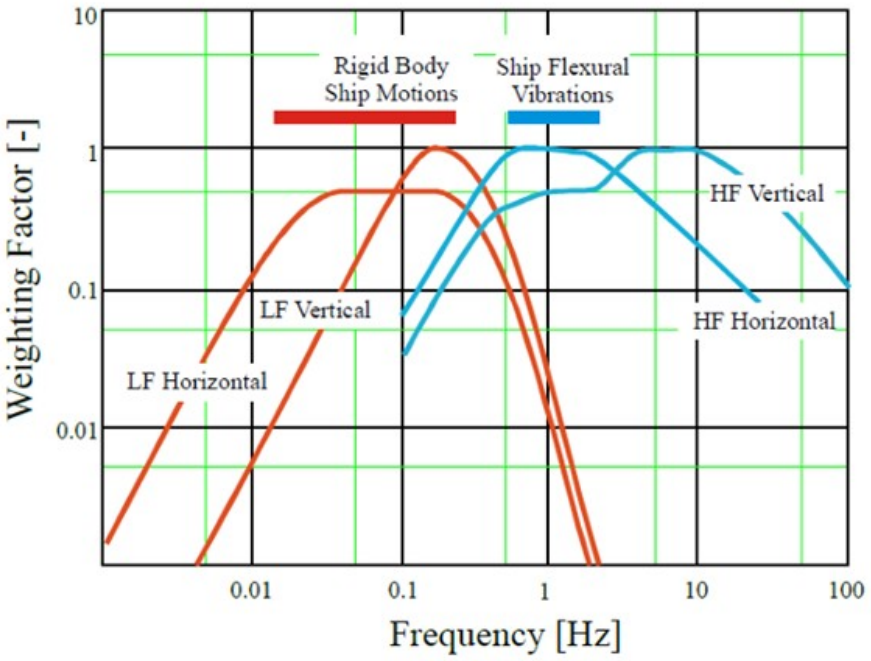


Figure 1.15 – Sensibilité aux accélérations et fréquence de mouvement (Czapiewska et al., 2019)

1.9.9 Matériaux

La conception de villes flottantes repose sur l'utilisation de matériaux aux propriétés spécifiques, à savoir : une haute résistance mécanique, une excellente étanchéité, une durabilité accrue en milieu marin (résistance à la corrosion), ainsi qu'une faible densité pour garantir une bonne flottabilité ("Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).

Bétons composites et allégés

Un exemple de matériau particulièrement adapté est le béton à base de polystyrène expansé (EPS-concrete), qui combine les propriétés mécaniques du béton avec la légèreté du polystyrène. Ce matériau a été utilisé dans le pavillon flottant Blue21 à Rotterdam. Dans le cas du pavillon de Blue 21, la structure se compose d'un réseau de poutres en béton coffrées à l'aide de blocs de polystyrène expansé, formant un ensemble rigide recouvert d'une couche supérieure de béton (Maritime Research Institute Netherlands - MARIN, 2021). Cependant, le polystyrène expansé peut également directement être utilisé comme agrégat dans le béton (Boulay & Parrant, 2005 ; Dor, 2023).

Pour améliorer la résistance à la corrosion en milieu salin, le recours au béton haute performance (HPC), intégrant des cendres volantes et de la fumée de silice, est recommandé. Ce type de béton présente une durabilité accrue face à la pénétration des ions chlorure, réduisant ainsi le risque de corrosion des armatures métalliques (Wang & Wang, 2015).

Actuellement, la solution structurelle la plus couramment utilisée pour les fondations flottantes est le caisson en béton, qui offre une flottabilité stable et une grande inertie (Maritime Research Institute Netherlands - MARIN, 2021).

Métaux et alliages

L'acier, utilisé notamment dans le projet Mega-Float, est apprécié pour sa flexibilité et sa robustesse mécanique (Maritime Research Institute Netherlands - MARIN, 2021). Toutefois, sa sensibilité à la corrosion représente un inconvénient majeur. Des mesures de protection, comme le bétonnage étanche des armatures ou l'application de revêtements anticorrosion, sont donc nécessaires ("Proceedings Of The Third World Conference On Floating Solutions", 2024).

Une alternative à l'acier est l'usage de tôles en aluminium, matériau reconnu pour sa bonne résistance à la corrosion, notamment grâce à la formation naturelle d'une couche d'oxyde protectrice (Loaiza Zuluaga, 2021 ; Kunica, 1993).

Polymères

Le polyéthylène haute densité (PEHD) est un autre matériau fréquemment utilisé. Il se distingue par sa légèreté, sa grande résistance mécanique et sa durabilité chimique (Wang & Wang, 2015).

Dans certains contextes plus modestes, le plastique recyclé est utilisé en raison de sa disponibilité, de son faible coût et de sa légèreté. Cependant, ce matériau présente une durabilité limitée : il est sensible à la température, aux rayons UV, à l'humidité, aux agents oxydants et aux contraintes mécaniques, ce qui réduit la stabilité et la longévité des plateformes (Loaiza Zuluaga, 2021).

Matériaux pour les superstructures

Les constructions érigées sur les plateformes flottantes doivent privilégier des matériaux légers afin de minimiser les charges. Les structures porteuses utilisent généralement des ossatures métalliques légères (acier ou aluminium) ou des composites renforcés de fibres (Maritime Research Institute Netherlands - MARIN, 2021). Les habitations flottantes intègrent fréquemment des ossatures combinant bois et aluminium (Immorise, 2025).

1.10 Insularité des villes flottantes

L'étude de l'insularité appliquée aux villes flottantes soulève des enjeux déterminants pour leur intégration, leur autonomie et leur viabilité. Il s'agit de comprendre les mécanismes d'interaction entre une ville flottante et son environnement continental afin d'éviter toute forme d'isolement, qu'il soit physique, social, économique ou culturel.

1.10.1 Prévenir l'isolement des villes flottantes

Les villes flottantes ne doivent en aucun cas devenir des îlots fermés, ni physiquement ni socialement (communication personnelle, Olthuis, 2025). Elles doivent être conçues comme des extensions du continent, et non comme des alternatives indépendantes. La création d'espaces publics, d'infrastructures culturelles et une planification participative sont autant de leviers à activer pour éviter leur isolement total.

Un facteur déterminant dans l'intégration des villes flottantes est la question de l'emploi. La création de postes liés aux activités en mer (maintenance d'éoliennes offshore, par exemple) encouragera l'installation pérenne d'habitants, à l'image de ce qui s'observe déjà dans certaines zones côtières (Flikkema & Waals, 2019).

1.10.2 Typologie des relations avec le continent

La relation entre une ville insulaire et le continent peut être classée selon trois types de liens : humains, matériels et immatériels (Soulard et al., 2017).

- **Relations humaines :** échanges de personnes pour le travail, la santé, la scolarité, le tourisme et les liens familiaux (Soulard et al., 2017).
- **Relations matérielles :** transferts de matières premières, importations (eau, nourriture, énergie) et exportations (produits agricoles, pêche) (Soulard et al., 2017).
- **Relations immatérielles :** interactions institutionnelles, culturelles, sportives et scientifiques (Soulard et al., 2017).

L'insularité implique souvent des surcoûts, notamment en matière de transport. Ce sont davantage les ruptures de modes de transport que la distance elle-même qui génèrent ces coûts élevés (Guingot, 2022 ; Soulard et al., 2017). Il est donc essentiel de concevoir une desserte maritime et aérienne performante, intégrant également les déplacements ponctuels comme la plaisance.

1.10.3 Conséquences économiques de l'insularité

Le caractère insulaire a des répercussions importantes sur l'activité industrielle et commerciale. L'équipement industriel adapté à une petite échelle est souvent difficile à trouver, car les machines sont conçues pour la production de masse. À Belle-Île-en-Mer, par exemple, l'abattoir ne fonctionne qu'à 10 % de sa capacité, bien qu'il corresponde au plus petit modèle disponible (Guingot, 2022).

Les prix de vente augmentent régulièrement du fait d'une faible concurrence qui risque d'entraîner des marges plus grandes de la part des commerçants (Guingot, 2022). À l'inverse, le prix peut également augmenter même s'il existe une réelle concurrence car il sera alors impossible pour les commerçants de réaliser une économie d'échelle à cause d'une part de marché réduite (Guingot, 2022). Certaines régions comme la Guadeloupe présentent un système de transport tellement efficace qu'il revient moins cher d'importer sur l'île que de consommer local (Guingot, 2022).

L'insularité limite également les possibilités de formation de la main-d'œuvre, ce qui freine le développement économique local (Guingot, 2022).

1.10.4 Activités dominantes et qualité de vie

Grâce à leur caractère insulaire et leur accès privilégié à la mer, les activités dominantes en zones insulaires sont la pêche, les activités nautiques et la production d'énergie (Guingot, 2022). L'isolement géographique favorise une bonne qualité de l'eau, propice à l'aquaculture (Guingot, 2022).

Le principal facteur d'attractivité des zones insulaires réside dans leur cadre de vie (Tesson, 2019 dans Guingot, 2022). Le calme et la convivialité de ces îles, l'autonomie alimentaire partielle (pêche, potager), la qualité paysagère et la solidarité intergénérationnelle (s'inscrivant dans un certain cadre "villageois") constituent autant d'éléments contribuant à cette qualité de vie perçue.

Les habitants soulignent également l'avantage d'une proximité spatiale entre le lieu de vie et le lieu de travail, ce qui transforme la perception du temps et renforce le sentiment de vivre dans un "monde à part" (Guingot, 2022).

1.10.5 Un ancrage logistique : le rôle des ports

La présence d'un port constitue un atout décisif pour toute communauté insulaire. Il permet l'intégration dans les réseaux commerciaux et de transport, condition essentielle pour la résilience d'une communauté flottante (Quirk et Friedman, 2017).

Ainsi, le défi majeur pour les villes flottantes n'est pas tant leur conception technique que leur capacité à rester connectées et fonctionnelles. Il convient d'éviter leur isolement par la mise en place de politiques de

transport robustes, de liens économiques dynamiques et d'infrastructures sociales ancrées dans le territoire. Ces éléments seront fondamentaux pour garantir leur durabilité à long terme.

1.10.6 Comparaison avec des îles existantes

Pour mieux appréhender le fonctionnement et les interactions d'une communauté flottante avec le continent, il est pertinent d'étudier des îles déjà isolées présentant des caractéristiques démographiques et géographiques comparables. L'Île d'Yeu, dans l'archipel des Ponants, a été retenue pour cette analyse.

1.10.6.1 Présentation de l'Île d'Yeu

Située à environ 17 km des côtes vendéennes, l'Île d'Yeu compte près de 4 800 habitants pour 23,32 km^2 et offre un paysage riche mêlant plages de sable fin, dunes, landes et côtes rocheuses (Guingot, 2017). Sa proximité relative du continent et sa population en font un idéal pour l'étude de la relation existante entre zone insulaire et continent.

Accès

- **Fréquence et capacité** : la navette maritime assure environ 500 traversées annuelles, ayant transporté 484 176 passagers en 2024. La durée moyenne de la traversée est de 60 minutes depuis le continent et de 30 minutes depuis Fromentine (Compagnie Yeu Continent, 2025). Ces transports ne sont pas réguliers à cause des marées.
- **Fret** : capacité de 150 t de marchandises et de véhicules jusqu'à 19 t (Groizeleau, 2023).
- **Financement** : la subvention moyenne est de 7,20 € par habitant pour les îles du Ponant, contre 124 € à Rennes et 168 € en moyenne dans les métropoles régionales (Guingot, 2022 ; Chambre régionale des comptes, 2020). Certaines compagnies sont pratiquement entièrement financées par les usagers grâce à leur attrait touristique important (Figure 1.16) (Guingot, 2022).
- **Modalités** : 97 % du trafic passager et 98 % du fret s'effectuent par voie maritime, le reste par voie aérienne. Les habitants de l'île représentent 32 % du trafic maritime et 57 % du trafic aérien, ce dernier est privilégié en cas d'urgence sanitaire (Guingot, 2022).

Marchandises

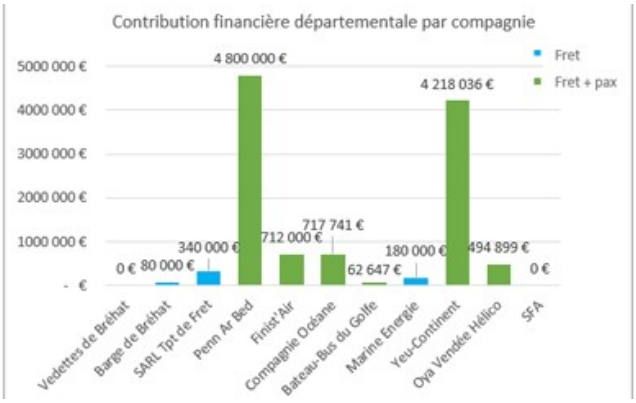
Chaque année, on dénombre :

- 30 t de sable et matériaux de construction importés ;
- 13 t de denrées alimentaires importées pour la grande distribution locale ;
- 5 t de déchets exportés ;
- un volume significatif de produits de la mer issus de la criée exportés (Guingot, 2022).

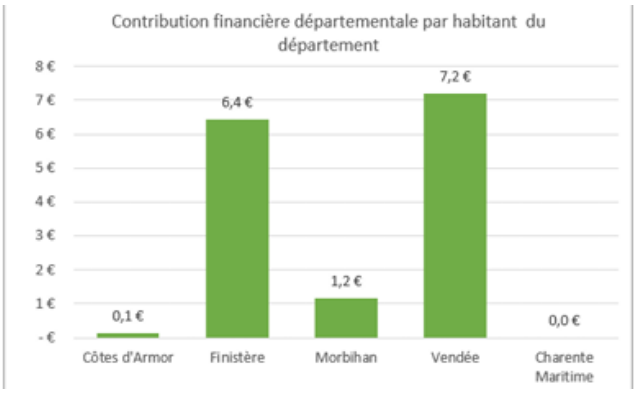
Les bateaux effectuant les transports peuvent atteindre 50 m de long pour 12,5 m de large (Guingot, 2022).

Écologie des transports

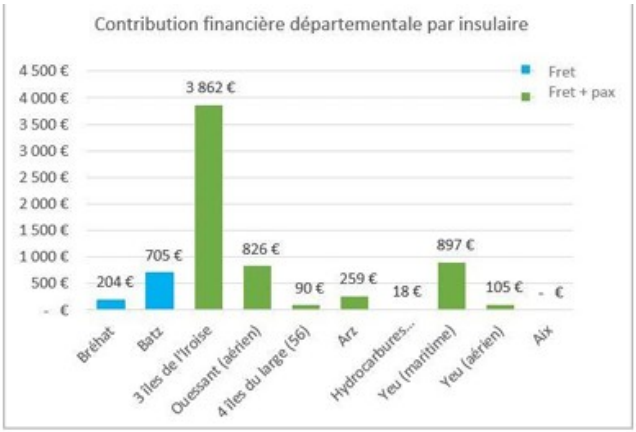
- Le bateau officiel pour relier le continent, Insula Oya III, est depuis 2023 équipé d'une alimentation électrique à quai, durant les activités commerciales, ce qui rendra possible une diminution du bruit à quai, des émissions de CO_2 ainsi que la disparition des fumées d'échappement à quai et la pollution de l'air que cela entraîne (Mobiwisy, 2023).
- Émissions moyennes : 60 g CO_2/passager·km pour un gros ferry ; 10,1 à 32,5 g CO_2/t·km pour un porte-conteneurs. À titre de comparaison, un camion de 40 t émet 91,6 g CO_2/t·km (Anaïs, 2024 ; Damgé, 2018 ; Quirk & Friedman, 2017).



(a)



(b)



(c)

Figure 1.16 – Contributions financières annuelles départementales pour les liaisons (Guingot, 2022).

Activité économique

Le tourisme constitue la première ressource des îles du Ponant, tandis que la pêche pèse pour 70 % de l'économie locale de l'île d'Yeu (Chaussade, 1990).

Fonctions et services

- **Santé** : l'hôpital Dumonté compte 7 lits de médecine et 8 lits de convalescence, pour 40 employés (FHF, s.d. ; Bernard, 2020).
- **Commerce** : 104 commerces et services, dont 19 restaurants, répartis entre épiceries, poissonneries, boulangeries et deux supermarchés (Guingot, 2017 ; Office de Tourisme de l'Île d'Yeu, 2025 ; Villepratique, s.d.).
- **Éducation** : deux établissements (public et privé) à chaque niveau (maternelle, primaire, collège) (Journal des Femmes, s.d.).

Emploi

Sur 1 779 emplois recensés, 1 573 sont occupés par des résidents (89 %) et 206 par des navetteurs continentaux (11 %) (Insee, 2024). Les cinq principaux secteurs sont, par ordre décroissant : commerce et transport, administration publique (santé, enseignement), construction, industrie, agriculture et pêche (Insee, 2024). Le marché local souffre d'une pénurie de main-d'œuvre, notamment dans la construction, stimulée par la demande de résidences secondaires, mais il ne s'agit pas du seul secteur (TF1 Info, 2021).

L'analyse de l'Île d'Yeu illustre les défis logistiques, économiques et sociaux propres à toute communauté insulaire. Les enseignements tirés (fréquence des liaisons, modes de financement, adaptation écologique des transports, spectre des services et dynamique de l'emploi) offrent un cadre précieux pour la conception de futures villes flottantes, devant concilier autonomie et interaction continuelle avec le continent.

1.10.7 Alimentation

À l'instar de nombreuses îles habitées (Malte, Bermudes, îles Caïmans, etc.), les villes flottantes ne devront pas être totalement autosuffisantes (Quirk & Friedman, 2017). Pour assurer leur pérennité, elles devront développer quelque chose d'unique favorisant des échanges import–export avec le reste du monde. Traditionnellement, les communautés insulaires tirent leurs ressources de la pêche ; une ville flottante pourrait, en complément, valoriser la production d'énergie ou la culture d'algues, destinées à l'alimentation ou au biocarburant (Quirk & Friedman, 2017).

Approvisionnement en eau potable

Le dessalement de l'eau de mer constitue une solution, déjà largement utilisée dans de nombreux pays. Par exemple, 50 % de l'eau potable consommée en Arabie saoudite (30 millions d'habitants) provient de stations de dessalement (Quirk & Friedman, 2017).

Agriculture urbaine

Si la totale autosuffisance alimentaire des villes reste aujourd'hui utopique, l'agriculture urbaine connaît un essor rapide (Arnaud, 2020). Contrainte par le manque d'espaces cultivables et la pollution des sols, elle s'appuie sur des techniques hors-sol telles que :

- l'hydroponie ;
- l'aéroponie ;
- l'aquaculture.

Par exemple, la "cité maraîchère" de Romainville (1 600 m² de production sur un total de 2 000m²) ambitionne de nourrir 200 personnes par an, soit 12 t de fruits et légumes (Arnaud, 2020 ; Etamine, 2025). En agriculture traditionnelle, on compte environ 50 m² par adulte pour la seule production de fruits et légumes ; ces systèmes hors-sol permettent une densification considérable de la production.

Les facteurs favorisant le développement de l'agriculture urbaine incluent la crise sanitaire (COVID-19), le changement climatique, la rareté des terrains, la recherche de durabilité et la valorisation des circuits courts (Arnaud, 2020). En revanche, cette filière doit surmonter plusieurs obstacles : le coût foncier en zones denses, le prix des infrastructures et des produits finis, ainsi que la viabilité économique à petite échelle (Arnaud, 2020).

Culture d'algues

Les plateformes flottantes offrent un cadre idéal à la culture d'algues, qui présentent un taux de croissance exceptionnel (doublement de la biomasse en 24–48 h) et une composition riche en protéines, souvent comparables au soja (Quirk & Friedman, 2017).

1.10.8 Énergies

Les villes flottantes peuvent exploiter leur position maritime pour produire d'importants volumes d'énergie renouvelable :

- **Énergie houlomotrice** : conversion des vagues en électricité à l'aide de systèmes oscillants ou à piston.
- **Énergie éolienne** : intégration de parcs offshore (turbines fixes ou flottantes).
- **Énergie solaire** : panneaux photovoltaïques montés sur toitures ou surfaces flottantes.

La complémentarité de ces filières permettrait de fournir une part significative des besoins électriques d'une ville flottante, d'assurer une certaine autonomie énergétique et de contribuer à son modèle économique par la vente de surplus.

1.11 Océanix City

1.11.1 Dimensions et modularité

Océanix City s'appuie sur un module standardisé de plateformes flottantes permettant une croissance modulaire et maîtrisée. Chaque plateforme peut accueillir environ 300 habitants et offre une emprise au sol bâtie de l'ordre de 10 000 m^2, complétée par 10 000 m^2 d'espaces publics (BIG | Bjarke Ingels Group, 2022).

Un groupement de cinq plateformes forme un quartier de près de 1 650 habitants. En assemblant six quartiers identiques, on obtient une agglomération d'environ 10 000 habitants s'étalant sur 75 ha (BIG | Bjarke Ingels Group, 2022).

La ville est conçue selon 3 types de bâtiments, chacun destiné à un usage précis (Figure 1.17).

1.11.2 Échelle et perspectives

Comme la Figure 1.18 le montre, cette ville est la base du futur développement d'Oceanix. Oceanix va s'étendre de plus en plus en utilisant ce module typique de 10 000 habitants. Ce qui fait qu'une ville de 60 000 habitants aura une emprise de 450 ha, et ainsi de suite pour arriver à une ville de 2,5 millions d'habitants répartis sur 50 900 ha.

Cette stratégie de développement progressif garantit la flexibilité opérationnelle et l'adaptation aux besoins démographiques et environnementaux, tout en conservant une trame urbaine cohérente et des services mutualisés.

(a) Commerces de premières nécessité et logements (Otaku, 2023)

(b) Plateforme de recherche basée sur les recherches maritimes (Otaku, 2023)

(c) Living plateforme avec activité loisirs, commerce, etc. (Otaku, 2023)

Figure 1.17 – Trois types de plateformes Oceanix selon leur fonction

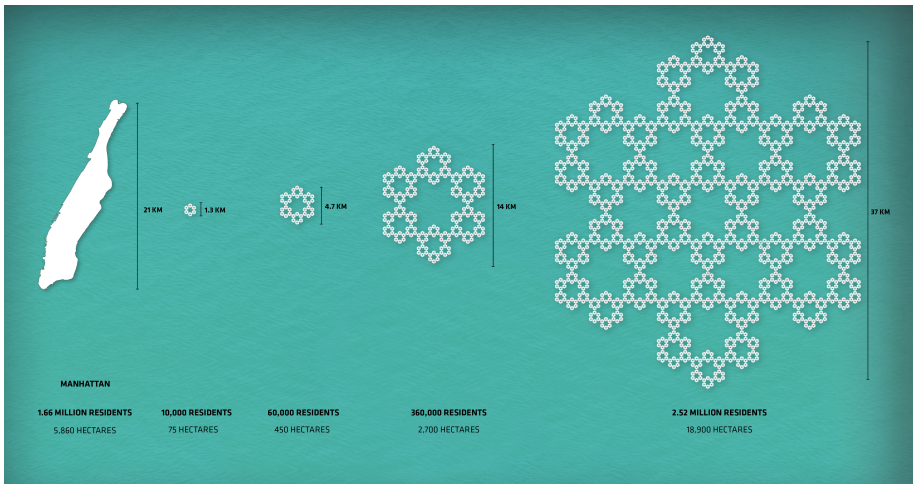


Figure 1.18 – Croissance modulaire d'Océanix City — projection de l'extension par modules de 10 000 habitants (communication personnelle, S. Hahn, 13 février 2025).

1.11.3 Coût financier

Actuellement, chaque module représente 150 à 200 millions d'euros (DamiLee, 2024).

1.12 Conclusion de l'état de l'art

L'état de l'art met en évidence une évolution significative des constructions flottantes, passant de simples habitations sur pilotis à des projets ambitieux de villes flottantes modulaires. Cette progression traduit une volonté croissante de cohabiter avec l'eau plutôt que de lutter contre elle, dans un contexte de pressions environnementales, démographiques et foncières. Les promesses des structures flottantes sont nombreuses : adaptabilité, modularité, respect de l'environnement, rapidité d'exécution et potentiel de résilience face aux catastrophes naturelles.

Cependant, malgré cet engouement, force est de constater que la plupart des projets restent au stade de prototype ou de démonstration. Les contraintes juridiques, institutionnelles et économiques freinent leur concrétisation à grande échelle. En outre, si les avantages sont souvent mis en avant, les risques techniques, les défis de maintenance, les impacts sociaux, leur relation au continent et la viabilité économique à long terme sont encore à explorer.

Sur le plan architectural, les recherches insistent sur la nécessité de repenser ces villes autrement que selon les modèles urbains traditionnels. La conception de ces villes flottantes implique une révision des systèmes de mobilité, une valorisation de la relation directe avec l'eau, ainsi qu'une intégration paysagère et fonctionnelle leur permettant d'exister et d'être attractives vis-à-vis du continent.

Enfin, du point de vue technique, plusieurs paramètres doivent être pris en compte, notamment la géométrie et la taille des plateformes, le type de connecteurs utilisés, ainsi que les caractéristiques de l'environnement marin. Ces facteurs influencent directement le comportement dynamique et les sollicitations mécaniques subies par les structures.

C'est sur la base de ces constats que se construit la suite de ce travail de recherche.

CHAPITRE 2

APPROCHE EXPÉRIMENTALE ET RÉSULTATS OBTENUS

2.1 Étude structurelle

Cette section présente une analyse comparative de deux systèmes structurels flottants soumis à l'action des vagues, dont l'un est décliné en deux variantes, soit trois configurations au total. L'objectif principal est d'évaluer la flottabilité des dispositifs en vue de dimensionner les structures, puis d'étudier leur comportement dynamique (déplacements, efforts) pour des liaisons entre modules flexibles ou rigides.

2.1.1 Choix de la géométrie de référence

1. Méthode

Afin de pouvoir étudier 2 systèmes structurels différents (caisson et grillage de poutres), il est indispensable de définir une géométrie de référence. Cette géométrie doit pouvoir être comparable d'un système à l'autre. Pour garantir la pertinence des dimensions employées, une recherche sur les différents projets existants a été réalisée. Le sujet étant extrêmement récent, très peu d'informations sur les dimensions et systèmes structurels sont disponibles, laissant des possibilités limitées. Suite à cette recherche, le projet Oceanix City a été retenu comme base, dont les modules hexagonaux sont parmi les mieux documentés.

Il en va de même pour le choix des systèmes structurels : c'est l'analyse de la littérature qui a permis de définir 2 systèmes structurels flottants intéressants à étudier. Le premier étant un caisson en béton et le second, un grillage de poutres (décliné en 2 versions).

Les dimensions du premier système structurel à étudier sont donc posées. Chaque caisson hexagonal possède un côté de longueur

$$a = 75 \text{ m}$$

ce qui permet de calculer la surface de la plateforme par la formule suivante :

$$A_{\text{caisson}} = \frac{3\sqrt{3}}{2} a^2 = 14\,614{,}18 \text{ m}^2, \quad \text{Aire de la plateforme hexagonale} \tag{2.1}$$

Adaptation à un réseau de poutres

Afin de comparer ces deux systèmes constructifs, il convient de conserver une surface équivalente. Un domaine carré de

$$A = 14\,400 \text{ m}^2$$

est donc défini. Soit une aire très proche de celle du caisson hexagonal de référence. Pour obtenir cette superficie, la plateforme en grillage de poutres est dimensionnée en 120 m $\times$ 120 m.

2. Résultats des définitions des systèmes structurels

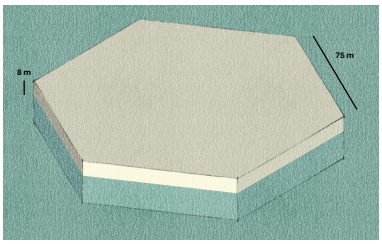
Les deux configurations retenues pour l'étude sont donc :

1. **Caisson hexagonal** : module Oceanix City, surface de 14 614,18 m^2 (Équation 2.1).
2. **Plateforme carrée à grillage de poutres** : module de dimensions 120 m $\times$ 120 m, surface de 14 400 m^2.

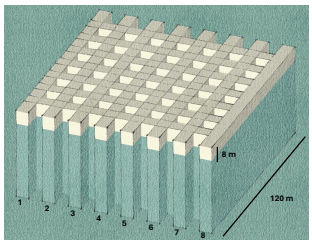
Ces dimensions serviront de base pour les calculs de flottabilité et pour les simulations numériques du comportement en mer (conditions de houle et liaison entre modules).

Systèmes structurels abordés

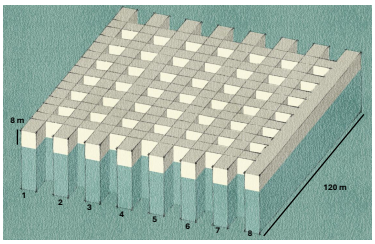
Les 3 configurations étudiées sont les suivantes :



(a) Caisson en béton



(b) Grillage de poutres creuses en béton



(c) Grillage de poutres creuses en béton allégé avec polystyrène expansé

Figure 2.1 – Types de structures en béton utilisées dans l'étude.

Les trois configurations seront comparées à l'aide d'une méthodologie commune, structurée selon une démarche rigoureuse et systématique. Bien que les paramètres spécifiques varient selon chaque système, l'arborescence générale de l'approche reste identique pour tous. Chaque étape sera détaillée en profondeur pour chacun des cas étudiés.

La méthodologie se décline comme suit :

- Définition des charges : les mêmes conditions d'usage sont considérées pour l'ensemble des configurations ; seules les hypothèses propres à la structure varient.
- Vérification de l'équilibre de flottaison : cette étape permet de valider la stabilité initiale des structures.
- Analyse structurelle : elle est conduite à l'aide de modélisations numériques, selon quatre scénarios distincts :
  - un cas hydrostatique (conditions calmes),
  - un cas de houle légère,
  - un cas de forte houle,
  - un cas avec charge ponctuelle sur l'extrémité,
  - une modélisation de l'assemblage de modules à trois échelles urbaines différentes.
- Vérification du moment de résistance de la section de béton étudiée.

2.2 Étude structurelle du caisson

2.2.1 Définition des dimensions du caisson en béton

La taille de la plateforme étant fixée et afin de modéliser un caisson aux dimensions réalistes et d'évaluer ses performances, plusieurs hypothèses ont été posées. Les calculs qui suivent s'appuient sur ces hypothèses pour déterminer les charges permanentes et d'exploitation, ainsi que le volume de béton nécessaire.

1. Méthode

a Hypothèses

Avant de procéder aux calculs de flottabilité, il est essentiel de définir les hypothèses relatives à la structure.

Les hypothèses retenues pour la définition du caisson sont les suivantes :

- La plateforme est hexagonale, de côté $a = 75\,\text{m}$, conformément au concept d'Oceanix City.
- L'épaisseur des parois en béton est fixée à $e = 0{,}5\,\text{m}$, valeur moyenne issue de diverses références (épaisseur maximale observée : 0,8 m dans le projet de l'île Princesse Élisabeth) (Guillermin & Allan, 2024).
- La hauteur hors eau du caisson est de $H_{\text{hors eau}} = 8\,\text{m}$, correspondant aux vagues extrêmes (voir section 1.6).
- La superstructure est en ossature légère (CLT) ; la charge linéique des planchers est évaluée à $100\,\text{kg/m}^2$ (Chiriac et al., 2019). Il s'agit d'une hypothèse réalisée afin de baisser le centre de gravité, comme indiqué à la section 1.9.9.
- L'emprise au sol des bâtiments sur plateforme est prise égale à 10 000 m^2 étant la plus grande superficie sur les modèles Oceanix (Figure 1.17).
- Le nombre maximal d'étages est fixé à $n = 7$, comme observé dans le projet Oceanix, chaque niveau mesurant 3 m. Cela afin d'estimer les hauteurs exposées au vent.
- Dans ce type de structure, il y a un volume important de béton remplissant une fonction diaphragme [1]. Même si, officiellement dessinés sur les plans d'Oceanix City, ces éléments sont pratiquement inexistants. Dans la réalité ils seront un élément très contraignant, car ils ajoutent du poids, et sont indispensables pour permettre à la structure de résister aux pressions environnantes.

  En se basant sur la présentation de l'île princesse Elisabeth de Guillermin & Allan (2024), il est possible d'établir le pourcentage approximatif du volume diaphragme par rapport au volume total de la géométrie. Celui-ci est estimé égal à environ 10 à 15%. Un pourcentage de 10% du volume total du caisson sera donc appliqué dans les calculs.
- L'avantage de travailler avec des caissons est que l'espace interne pourrait éventuellement être utilisé pour du stockage. Étant donné que ce volume va fortement être séquencé, la surface disponible pour du stockage sera réduite. Une hypothèse de 25% de la surface de la plateforme laissée libre au stockage sera d'application.

b Charges appliquées

Tous les calculs se rapportant à cette section sont détaillés en Annexe, section 4.4.1. Pour déterminer le tirant d'eau sur le caisson, une boucle itérative va être utilisée sur Excel. Cette boucle est la suivante :

1. Détermination des charges appliquées au caisson, incluant notamment son propre poids, lequel dépend directement de ses dimensions. Le poids est exprimé en fonction de la hauteur immergée du caisson, qui constitue l'unique inconnue. Par exemple, la hauteur totale utilisée pour le calcul du volume est :

   $$h_{\text{tot, caisson}} = h_{\text{immergée}} + 8\ \text{m}$$

   où 8 m correspond à la hauteur hors d'eau, fixée conformément aux hypothèses. Une valeur initiale de $h_{\text{immergée}}$ est donc supposée.
2. Ensuite, un cas de charge est réalisé et le plus défavorable est choisi pour la suite des calculs.
3. Le volume immergé nécessaire, permettant à la poussée d'Archimède de compenser l'ensemble des charges appliquées au caisson, est ensuite déterminé.
4. À partir de ce volume, est calculée la hauteur immergée correspondante. Une fois le volume immergé connu, la hauteur immergée peut être déterminée.
5. $H_{\text{immergé}}$ est ajusté et le cycle recommence jusqu'à convergence.

Dans cette section, sont présentées successivement les différentes catégories de charges (permanentes et variables) qui s'appliquent à la structure, ainsi que leur modélisation numérique. La démarche suivie est la suivante :

1. Il s'agit d'un élément contribuant à la rigidité de la structure.

- Calcul des charges permanentes. Celles-ci comprennent le poids des bâtiments basé sur l'hypothèse du CLT en multipliant par les m^2 de planchers et de façade.

  Parmi les charges permanentes, est également calculé le poids du caisson. Afin d'y arriver, le volume de béton total : interne (diaphragme) et l'enveloppe, est déterminé et multiplié par la masse volumique.

- Calcul des charges variables. Les valeurs des charges d'exploitation sont issues de l'eurocode 1 CEN (2002). Parmi les charges variables sont prises en compte :
  - Les usages publics (commerces de détail, plateforme RDC destinée à un usage public ne présentant pas d'obstacle à la circulation de personnes) : prises sur l'entièreté du RDC de la plateforme.
  - Les charges d'exploitation résidentielle : prises sur les superficies des bâtiments multipliées par 6 étages. Aucun logement n'est destiné à être au RDC, le but étant de créer des espaces de vie les plus dynamiques possibles et de protéger les habitants en cas de vague exceptionnellement plus haute que 8m.
  - Le stockage : pris comme indiqué dans les hypothèses. Le stockage qui est destiné à la réserve d'eau potable, de combustible, etc.
  - La Neige : prise, logiquement, sur la totalité de la plateforme.

- Une fois les charges déterminées, un cas de charge va être réalisé afin de déterminer le cas le plus défavorable.

  Ces actions sont combinées à l'aide des coefficients Ψ_i de l'Eurocode 1 CEN (2002) :

Tableau 2.1 – Coefficient de combinaison (CEN, 2002).

Action	$\Psi 0$	Ψ_1	Ψ_2
Exploitation résidentielle	0,7	0,5	0,3
Public	0,7	0,7	0,6
Neige	0,5	0,2	0
Espace de stockage	1	0,9	0,8

Le cas le plus défavorable (cas 1) correspondant aux charges résidentielles considérées comme action principale. La charge totale s'élève à :

$$P_{\text{totale, cas 1}} \approx 2,211 \cdot 10^6 \text{ kN}.$$

Tableau 2.2 – Répartition des coefficients dans chaque cas de charge.

Cas	Q_{perm}	Résidentiel	Public	Neige	Stockage	P_{totale} (kN)
1	1,35	1,5	$1,5\,\Psi_0$	$1,5\,\Psi_0$	$1,5\,\Psi_0$	$2,211 \cdot 10^6$
2	1,35	$1,5\,\Psi_0$	1,5	$1,5\,\Psi_0$	$1,5\,\Psi_0$	$2,190 \cdot 10^6$
3	1,35	$1,5\,\Psi_0$	$1,5\,\Psi_0$	1,5	$1,5\,\Psi_0$	$2,163 \cdot 10^6$
4	1,35	$1,5\,\Psi_0$	$1,5\,\Psi_0$	$1,5\,\Psi_0$	1,5	$2,157 \cdot 10^6$

c Volume immergé nécessaire

Pour pouvoir connaître la hauteur du tirant d'eau, il faut connaître le volume immergé suffisant. Pour garantir la flottabilité de la structure, la poussée d'Archimède doit équilibrer la charge totale la plus défavorable, notée $P_{\text{totale}} = 2,211 \cdot 10^6$ kN. Étant donné que la surface de la plateforme $A_{\text{plateforme}}$ est fixée (Équation 2.1), c'est la hauteur immergée $H_{\text{immergé}}$ qui s'ajuste pour obtenir cet équilibre.

Le volume immergé nécessaire est directement obtenu en équilibrant la poussée et la charge :

$$V_{\text{immergé,caisson}} = \frac{P_{\text{totale}}}{\rho_{\text{eau}}}, \quad \text{Volume immergé du caisson} \tag{2.2}$$

avec $\rho_{\text{eau}} = 10{,}25$ kN/m^3.

En divisant ce volume par la surface de la plateforme, la hauteur immergée est obtenue :

$$H_{\text{immergé}} = \frac{V_{\text{immergé,caisson}}}{A_{\text{plateforme}}} = 15\text{m}, \quad \text{Tirant d'eau du caisson} \tag{2.3}$$

2. Résultats et dimensions du caisson

À terme, les dimensions du caisson sont un hexagone de 75 m de côté avec une hauteur totale de 23 m et ayant un tirant d'eau de 15 m.

2.2.2 Vérification de la flottabilité

1. Méthode

Tous les calculs relatifs à cette section se retrouvent en Annexe section 4.4.2.

Comme vu lors de la section 1.9.5, la stabilité de la plateforme se contrôle par la position relative du centre de gravité G et du métacentre M.

- Il est d'abord choisit comme origine pour les calculs (le point K = (0 ;0)), la position la plus basse de la structure.
- Ensuite, à partir de ce point, sont calculées les hauteurs du centre de gravité $\overline{KG} = 11,34\ \ m$ et du centre de flottaison B ($\overline{KB}$) qui permettront à terme de déterminer la distance métacentrique $\overline{KM} = 11,65\ \ m$.

2. Résultats

Une fois toutes ces distances définies, la position d'équilibre est vérifiable :

$$\overline{GM} = \overline{KM} - \overline{KG} = 0,303\ \text{ m}, \quad \text{Distance métacentre–centre de gravité} \tag{2.4}$$

La valeur positive de la distance métacentrique $\overline{GM} > 0$ confirme que la structure se trouve dans une position d'équilibre stable, ce qui garantit sa stabilité hydrostatique.

Par ailleurs, la position relative du centre de gravité par rapport au centre de carène a été vérifiée : le centre de gravité se situe bien au-dessus du centre de flottaison, conformément aux exigences de stabilité.

2.2.3 Amarrage

1. Méthode

Avant de pouvoir dimensionner les lignes d'amarrage, il est d'abord utile d'évaluer les efforts horizontaux dus au vent, aux vagues et au courant. Dans cette section, vont être utilisées les formules de la section 1.9.6.

a Charges dues au vent

Le vent exerce des efforts sur les façades des bâtiments de la plateforme, mais également sur la partie non immergée du caisson, à savoir sur une hauteur de 8 m. La force de vent utilisée pour les calculs est de 35 m/s, définie section 1.6.

$$F_{\text{vent,caisson}} = F_{\text{vent,plateforme}} + F_{\text{vent,bâtiment}} = 2,829 \cdot 10^3 kN, \quad \text{Effort total du vent} \tag{2.5}$$

Avec,

$$F_{\text{vent,plateforme}} = \tfrac{1}{2}\,\rho_{\text{air}}\,C_d\,v_{\text{vent}}^2\,A_{\text{plateforme, hors eau}} = 780,3\text{kN}, \quad \text{Vent sur la partie non immergée de la plateforme} \tag{2.6}$$

où $\rho_{air} = 1,225 kg/m^3$, $C_d = 1$, $v_{vent} = 35 m/s$ et $A_{\text{plateforme, hors eau}} = 1040 m^2$

$$F_{\text{vent,bâtiment}} = \tfrac{1}{2}\,\rho_{\text{air}}\,C_d\,v_{\text{vent}}^2\,A_{\text{façade, bâtiment}} = 2,048 \cdot 10^3\text{kN}, \quad \text{Vent sur les façades des bâtiments} \tag{2.7}$$

où $\rho_{air} = 1,225 kg/m^3$, $C_d = 1$, $v_{vent} = 35 m/s$ et $A_{\text{façade, bâtiment}} = 2730 m^2$

b Charges dues aux vagues

Le calcule est basé sur une hauteur de vague de 4 m comme spécifiée dans la section 1.6 sur les conditions de la mer du Nord,

$$F_{\text{vague}} = \tfrac{1}{2}\,\rho_{\text{eau}}\,C_d\,U^2\,A_{\text{submergée}} = 4,612 \cdot 10^4\text{kN}, \quad \text{Effort des vagues sur le caisson} \tag{2.8}$$

où $U = \sqrt{2gH_{\text{vague}}} = 12,65 m/s$ est la vitesse caractéristique, $A_{\text{submergée}} = 1954\text{m}^2$, et $\rho_{eau} = 1,025 kg/m^3$

c Charges dues au courant

Les calculs sont basés sur une vitesse de courant de 9,36 km/h ou 2,6 m/s comme discuté dans la section 1.6,

$$F_{\text{courant}} = \tfrac{1}{2}\,\rho_{\text{eau}}\,C_d\,v_{\text{courant}}^2\,A_{\text{submergée}} = 6,756 \cdot 10^3\text{kN}, \quad \text{Effort du courant} \tag{2.9}$$

d Cas de charge

Ces efforts sont ensuite combinés selon les coefficients Ψ_i pour identifier le cas le plus contraignant (*vent principal*, *vagues*, etc.) (CEN, 2002). Le cas défavorable fournit l'effort $T_{0,\text{caisson}}$ qui sera utilisé dans la suite des calculs d'amarrage.

Tableau 2.3 – Coefficient de combinaison (CEN, 2002)

Force	$\Psi 0$	Ψ_1	Ψ_2
Vent $F_{vent,caisson}$	0,6	0,2	0
Vagues $F_{vagues,caison}$	0,6	0,2	0
Courant $F_{courant,caisson}$	0,6	0,2	0

Tableau 2.4 – Cas de charges pour l'amarrage du caisson

Cas de charge	$F_{vent,caisson}$ [kN]	$F_{vagues,caisson}$ [kN]	$F_{courant}[kN]$	Valeur (kN)
Cas 1	1,5	$1.5 \cdot \Psi_0$	$1.5 \cdot \Psi_0$	$5,183 \cdot 10^4$
Cas 2	$1.5 \cdot \Psi_0$	1,5	$1.5 \cdot \Psi_0$	$7,781 \cdot 10^4$
Cas 3	$1.5 \cdot \Psi_0$	$1.5 \cdot \Psi_0$	1,5	$5,419 \cdot 10^4$

Le cas 2 est donc le cas le plus défavorable avec un effort de $T_{0,caisson} = 7,781 \cdot 10^4$ kN.

e Calcul des chaînes d'amarrage

Une fois les efforts connus, il est donc possible de déterminer les longueurs d'amarrage nécessaires. Une série de paramètres et d'hypothèses est posée :

- La hauteur immergée étant de 15 m, une profondeur d'eau de 20 m est considérée.
- Le poids linéique de la chaîne est pris égal à 4 kN/m. La plateforme étant retenue par 4 câbles à chaque coin, le poids linéique devient $8 \cdot 4 = 32kN$
- La chaîne utilisée possède une résistance minimale à la rupture (MBL) de 10 710 kN pour une chaîne de 127 mm de diamètre (International Association of Classification Societies (IACS), 2013).

Avec ces informations il est possible de déterminer la tension maximale existante dans la chaîne :

$$T_{\max} = T_{0,\text{caisson}} + P_{\text{chaine}}\, h + 0,2 \cdot 8 \cdot \text{MBL} = 8,507 \cdot 10^4 \text{kN}, \quad \text{Tension le long de la ligne} \tag{2.10}$$

2. Résultats

Finalement la longueur minimale horizontale est :

$$L_{s,\text{caisson}} = \sqrt{h\left(h + \frac{2\,T_{0,\text{caisson}}}{P_{\text{chaine}}}\right)} = 312,5 \text{ m}, \quad \text{Longueur d'amarrage horizontale minimale} \tag{2.11}$$

Et la longueur minimale de la chaîne d'amarrage est :

$$L_{min,caisson} = h_{eau,caisson} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{T_{caisson}}{P_{chaine} \cdot h_{eau,caisson}}} = 325,5 \ m, \quad \text{Longueur totale minimale de la ligne} \tag{2.12}$$

À titre de comparaison Egis & Ramoge, (1976) donnent des indications de longueur d'amarrage pour des yachts dans des conditions de vents légèrement plus douces, calculées selon les mêmes équations d'amarrage et pour une profondeur de 20 m. Dans ces conditions, un yacht de 250 m de long possède une longueur d'amarrage de 279,29 m.

Dans ce calcul, la force prédominante est celle générée par l'action des vagues, ce qui apparaît cohérent compte tenu de la profondeur importante à laquelle le caisson est immergé, exposant ainsi fortement la plateforme aux sollicitations hydrodynamiques. Cette analyse confirme donc les propos de Joep Van Der Zanden disant que les systèmes d'amarrage caténaires représentent un énorme investissement dans la réalisation de ces plateformes. Un résultat dû au fait que ce système est basé sur le poids submergé de la chaîne.

2.2.4 Modélisation numérique du caisson

2.2.4.1 État hydrostatique

Dans cette section, le caisson va être modélisé sur Python comme étant sur fondation élastique de Winkler. En premier lieu, le caisson est évalué en mer statique afin de pouvoir vérifier la déformée notamment.

1. Méthode

a Paramètres géométriques et matériaux

En premier lieu, certaines hypothèses sont posées. Avec notamment la représentation du caisson comme étant une poutre de 129 m et pas 75 m, car la distance d'un côté à l'autre passant par le centre de l'hexagone correspond environ à cette valeur.

Les paramètres principaux de la poutre sont définis comme tels,

$b = \sqrt{3} \cdot 75 \approx 129.9$ m	Largeur du caisson
$L = b$	Longueur considérée
$n = 200$	Nombre d'éléments de discrétisation
$\gamma_{\text{eau}} = 10200$ N/m^3	Poids volumique de l'eau
$k = \gamma_{\text{eau}}\, b$	Raideur de la fondation élastique [N/m^3]
$h = 23$ m	Hauteur du caisson
$t = 0.5$ m	Épaisseur des parois
$I = \dfrac{b\,h^3 - (b-2t)\,(h-2t)^3}{12}$	Moment d'inertie
$E = 3 \cdot 10^{10}$ Pa	Module de Young
$EI = E\,I$	Rigidité en flexionnelle [N·m^2]

b Chargement

Ensuite, une fois le caisson défini, les charges lui sont appliquées. Repartant du cas de charge le plus défavorable de la section 2.2.1, il est possible d'obtenir la force linéique à introduire dans le code. La charge linéique correspond à la charge totale appliquée au caisson divisée par la surface de la plateforme (une charge surfacique est ainsi obtenue) et multipliée par la largeur de la plateforme (pour obtenir une charge linéique). Le caisson est donc soumis à une charge répartie uniforme p_0 définie par :

$$p_0 = -1,54 \cdot 10^5 \cdot L \quad [\text{N/m}]$$

Pour modéliser de manière précise le comportement du caisson, une méthode des éléments finis va être appliquée. La charge est discrétisée en $n+1$ nœuds uniformément espacés, soit :

$$p_i = p_0\,\frac{L}{n}, \quad \text{pour } i = 0, \ldots, n, \quad \text{Charge appliquée aux nœuds} \tag{2.13}$$

c Assemblage de la matrice de raideur

La poutre est divisée en n éléments finis de longueur $\Delta x = \frac{L}{n}$. Pour chaque élément, la matrice de raideur locale est donnée par :

$$K_e = \frac{EI}{\Delta x^3}\begin{pmatrix} 12 & 6\Delta x & -12 & 6\Delta x \\ 6\Delta x & 4\Delta x^2 & -6\Delta x & 2\Delta x^2 \\ -12 & -6\Delta x & 12 & -6\Delta x \\ 6\Delta x & 2\Delta x^2 & -6\Delta x & 4\Delta x^2 \end{pmatrix} + k\,\Delta x \cdot \operatorname{diag}\left(\tfrac{1}{2}, \tfrac{\Delta x}{12}, \tfrac{1}{2}, -\tfrac{\Delta x}{12}\right), \tag{2.14}$$

Cette matrice est ensuite insérée dans la matrice globale $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$, selon la correspondance entre les degrés de liberté locaux de l'élément et les degrés de liberté globaux de la structure.

d Résolution du système

Le vecteur de charges global est construit en plaçant les charges réparties sur les degrés de liberté de déplacement vertical uniquement :

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_0 & 0 & p_1 & 0 & \cdots & p_n & 0 \end{pmatrix}^T$$

Le système linéaire (de Winkler) suivant est résolu :

$$\mathbf{K}\,\mathbf{V} = \mathbf{P}, \tag{2.15}$$

et sont extraits les déplacements verticaux aux nœuds :

$$v_i = V_{2i}, \quad i = 0, \ldots, n$$

e Calcul des moments de flexion

Les moments de flexion aux extrémités de chaque élément fini sont étudiés en utilisant les vecteurs suivants :

$$k_{\text{left}} = \frac{EI}{\Delta x^3}\begin{pmatrix} 6\Delta x & 4\Delta x^2 & -6\Delta x & 2\Delta x^2 \end{pmatrix}, \quad k_{\text{right}} = \frac{EI}{\Delta x^3}\begin{pmatrix} 6\Delta x & 2\Delta x^2 & -6\Delta x & 4\Delta x^2 \end{pmatrix}, \tag{2.16}$$

Les moments à gauche et à droite de chaque élément sont donnés par :

$$M_{\text{left},e} = -k_{\text{left}} \cdot V_e, \quad M_{\text{right},e} = k_{\text{right}} \cdot V_e,$$

où V_e est le vecteur des 4 degrés de liberté de l'élément e. $V_e = \begin{bmatrix} v_i \\ \theta_i \\ v_j \\ \theta_j \end{bmatrix}$

Ensuite, les moments au centre des nœuds sont interpolés :

$$M_0 = M_{\text{left},0}, \quad M_i = \tfrac{1}{2}(M_{\text{left},i} + M_{\text{right},i-1}), \quad M_n = M_{\text{right},n-1}.$$

La méthodologie présentée dans cette section sera systématiquement reprise pour les autres études de modélisation, moyennant des ajustements liés aux hypothèses spécifiques et aux différentes géométries des configurations considérées.

Afin de structurer cette analyse, les configurations sont regroupées en trois grandes familles :

- **Configurations de type caisson** : *[section 2.2.4.2 à section 2.2.4.5]* ;
- **Configurations de type grillage de poutres en béton** : *[section 2.3.4]* ;
- **Configurations de type grillage de poutres en béton allégé** : *[section 2.4.4]*.

Pour chacune de ces configurations, la méthodologie est appliquée de manière cohérente, en tenant compte des spécificités propres à chaque cas.

2. Résultats

Dans un environnement idéal, caractérisé par une mer parfaitement calme, le caisson présente un déplacement vertical de -15 m, correspondant à sa profondeur d'immersion (Figure 2.2). Ce résultat est conforme aux prévisions théoriques issues du calcul de la poussée d'Archimède (Équation 2.3). Par ailleurs, le déplacement relatif de la structure est quasi nul, de l'ordre de 0,7 mm pour une longueur d'environ 130 m, ce qui témoigne de la rigidité élevée de la poutre considérée.

Il convient également de noter que le moment fléchissant observé est négatif ($\approx -2 \cdot 10^8 MPa$), traduisant une domination locale de la poussée hydrostatique. Toutefois, cela ne signifie pas nécessairement

que la résultante des forces de flottabilité dépasse les charges propres du caisson. Ce résultat suggère plutôt une répartition légèrement déséquilibrée des efforts sur la structure.

En théorie, en l'absence de toute perturbation numérique, la déformée ainsi que le moment fléchissant devraient être nuls, du fait de la symétrie des charges et de la structure. Cependant, le très faible déplacement observé peut être attribué à l'implémentation numérique. En effet, bien que la matrice de raideur K_e soit supposée symétrique ($K_e = K_e^T$) et les charges parfaitement réparties, de légères asymétries peuvent apparaître lors de l'implémentation informatique. Ces erreurs, même de l'ordre du cent-millième, peuvent être amplifiées lors de la résolution du système $KV = P$, induisant un déplacement résiduel non nul répercuté sur v et, par conséquent, un moment associé.

Ce phénomène est également observé dans les sections 2.3.4.1 et 2.4.4.1, où les mêmes causes produisent des effets similaires.

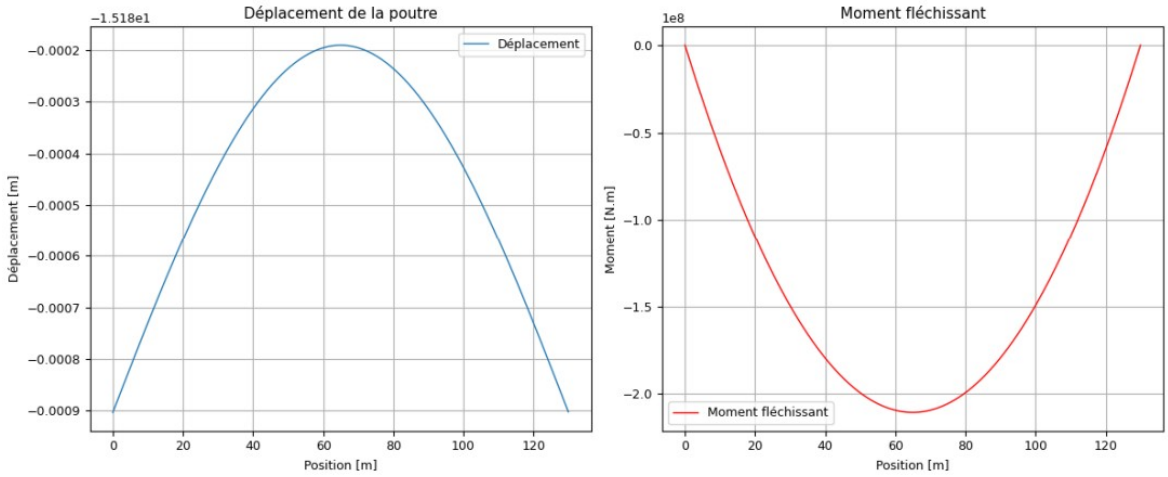


Figure 2.2 – État hydrostatique du caisson

2.2.4.2 En conditions de faible houle

1. Méthode

Le caisson est modélisé de la même façon qu'en statique avec cette fois-ci l'ajout des vagues. Les paramètres du caisson restent inchangés et il en va de même pour la charge linéique appliquée.

a Paramètres des vagues

Les vagues sont intégrées dans le code avec les paramètres suivants. Parmi ceux-ci, l'amplitude de la vague, fixée à 2 m (correspondant à une vague de 4 m), et la période d'onde fixée à 7 secondes. Deux paramètres issus de la section 1.6. En partant de ces 2 données, il a été possible de déterminer la longueur d'onde, le nombre d'ondes, la vitesse, etc.

$A = 2$ m	Amplitude
$\lambda = 78$ m	Longueur d'onde
$k_w = \dfrac{2\pi}{\lambda}$	Nombre d'onde
$T = 7$ s	Période
$v = \dfrac{\lambda}{T}$	Vitesse de propagation
$\omega = k_w\, v$	Pulsation

$z_{\text{top}} = 8$ m, $\quad z_{\text{base}} = z_{\text{top}} - h$

b Interaction vague–caisson

Une fois ces paramètres définis, il est possible d'étudier l'immersion de la poutre dans les vagues. Il s'agit d'un point crucial, car une immersion importante entraînera une force de l'eau plus importante, en raison de l'apparition de $\Delta F(x,t)$ qui est la force additionnelle induite par la vague et proportionnelle à la hauteur d'eau supplémentaire par rapport à l'état de repos.

À l'inverse, aux endroits où le caisson sera dans un creux de vagues, la réaction de l'eau sera plus faible.

Dans la partie suivante, la vague est représentée comme étant une sinusoïde qui évolue dans le temps. $z_w(x,t)$ représente donc la hauteur de la surface de l'eau et va constituer le nuage de points servant de référence au calcul. Il est ensuite possible d'évaluer le niveau d'immersion de l'eau en évaluant la différence de hauteur entre la hauteur d'eau et le point bas du caisson. Finalement, $\Delta F(x,t)$ est calculé et rajouté à la poussée calculée de base.

$$z_w(x,t) = A\,\sin\big(k_w\,x - \omega\,t\big), \quad \text{Ligne de flottaison} \tag{2.17}$$

$$\Delta z(x,t) = \max\big(z_w(x,t) - z_{\text{base}},\,0\big), \quad \text{Immersion dans la vague} \tag{2.18}$$

$$\Delta F(x,t) = \gamma_{\text{eau}}\,\Delta z(x,t)\,b, \quad \text{Force verticale additionnelle [N/m]} \tag{2.19}$$

$$p^{\text{tot}}(x,t) = p(x) + \Delta F(x,t)\,\Delta x, \quad \text{Charge totale} \tag{2.20}$$

c Équation du caisson sur fondation élastique

$$E I\,\frac{\mathrm{d}^4 w}{\mathrm{d}x^4}(x,t) \;+\; k\,w(x,t) = p^{\text{tot}}(x,t), \quad \text{Équilibre du caisson sur fondation élastique} \tag{2.21}$$

$$M(x,t) = -\,E I\,\frac{\mathrm{d}^2 w}{\mathrm{d}x^2}(x,t), \quad \text{Moment fléchissant} \tag{2.22}$$

2. Résultats

Les vagues induisent un mouvement de tangage de la structure, oscillant entre $-1\,\text{m}$ et $0{,}75\,\text{m}$ par rapport à la position d'équilibre initiale, accompagné d'un moment fléchissant variant entre des valeurs positives ($1{,}1 \cdot 10^9\,\text{MPa}$) et négatives ($-1{,}1 \cdot 10^9\,\text{MPa}$) (Figure 2.3 et Figure 2.4). Ces amplitudes de moment sont approximativement dix fois supérieures à celles observées dans des conditions de mer parfaitement calme. Le moment fléchissant atteint sa valeur maximale négative dans les zones impactées par le sommet de la vague, tandis qu'il devient positif dans les zones correspondant au creux de la vague.

Ces moments de grande amplitude, associés à un mouvement de tangage du caisson sans déformée apparente, illustrent la rigidité remarquable de la structure. Ce comportement oscillatoire est clairement visible sur la Figure 2.5, qui représente l'évolution de la position de la structure à intervalles réguliers d'une seconde sur une durée totale de cinq secondes.

Ce type de réponse dynamique, caractéristique des structures à forte rigidité soumises à l'action ondulatoire, sera systématiquement observé lors des simulations pour chaque configuration structurelle analysée.

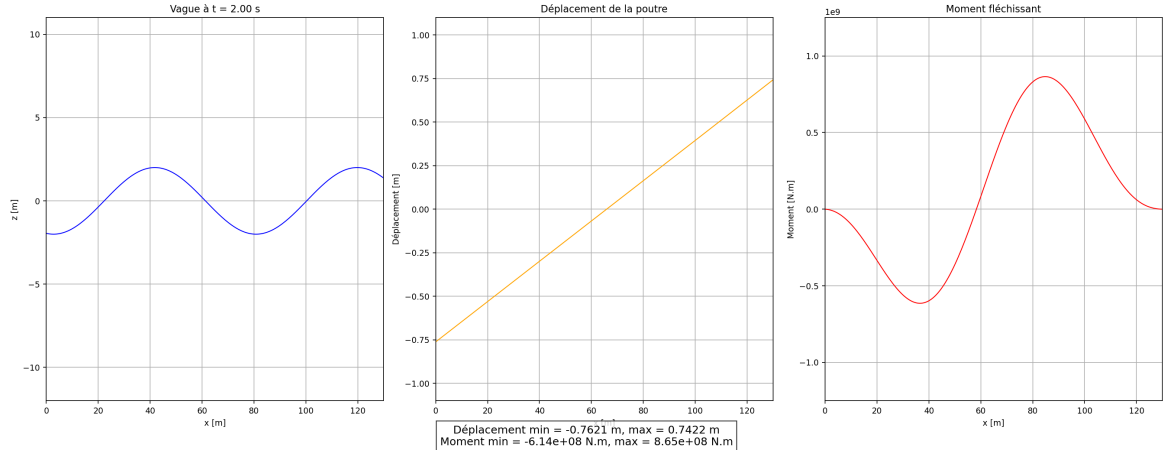


Figure 2.3 – Comportement du caisson à t=2s (déplacement max)

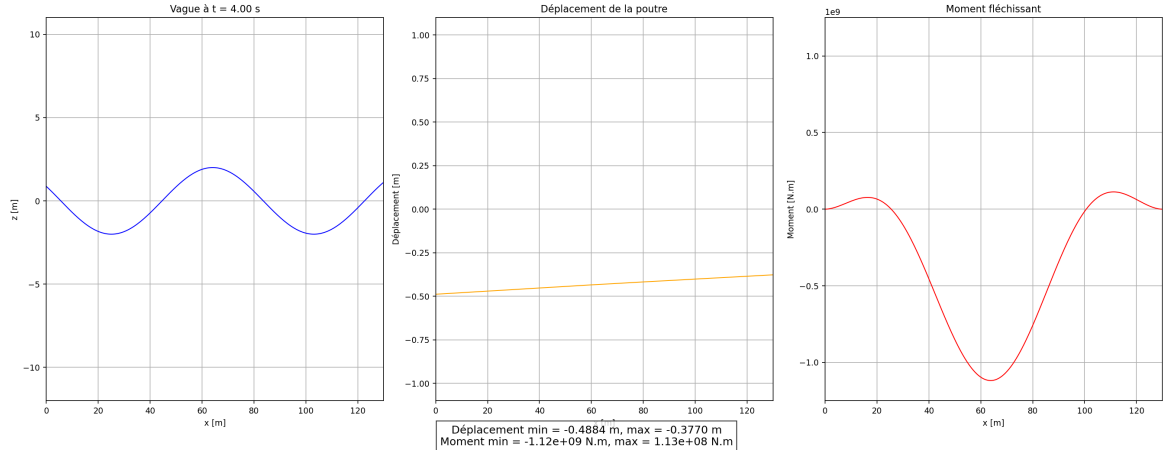


Figure 2.4 – Comportement du caisson à t=5s (moment max)

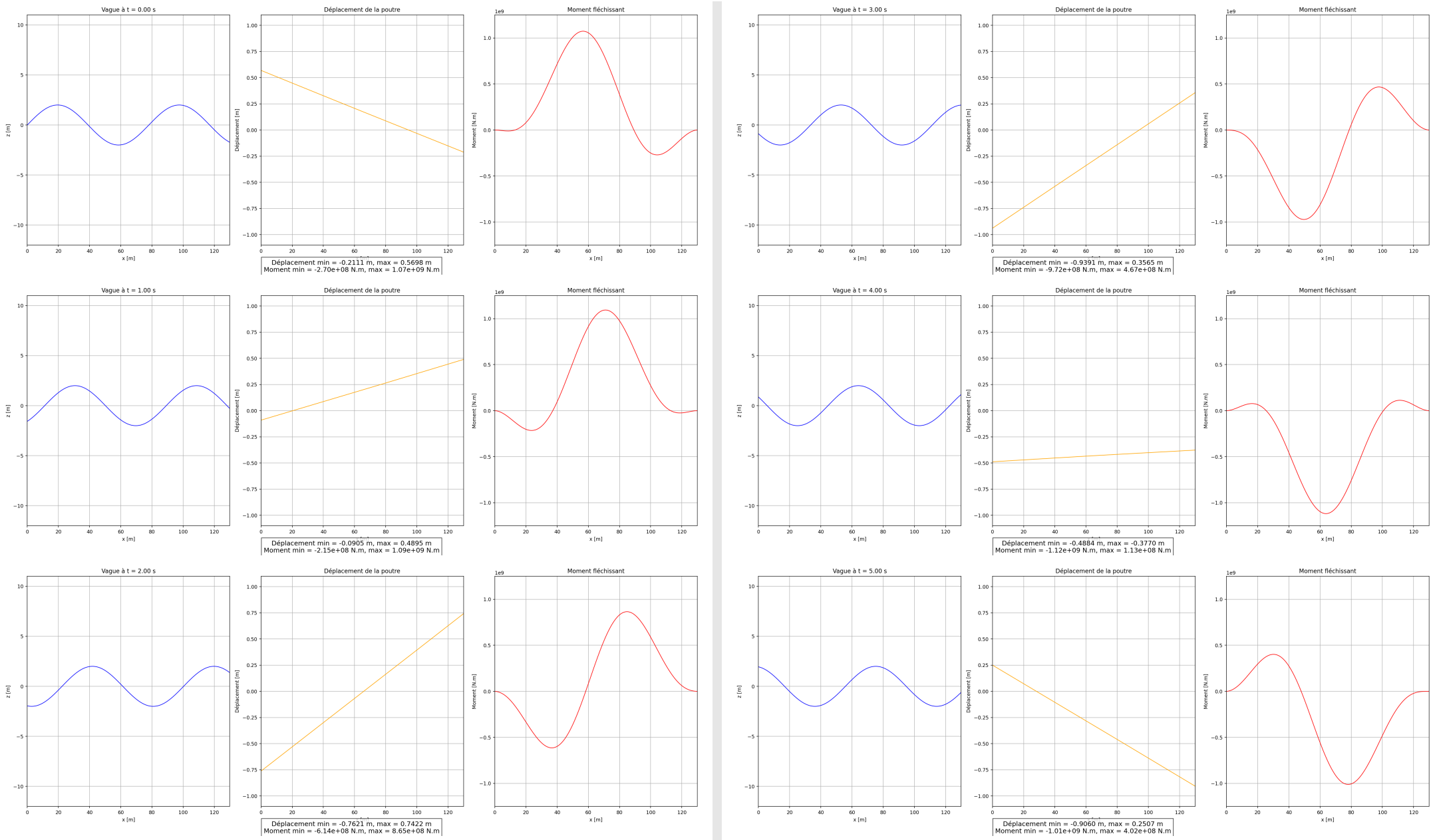


Figure 2.5 – Structure sur vagues de 4m de hauteur

2.2.4.3 En conditions de forte houle

1. Méthode

Dans cette section, la démarche suivie est exactement la même que celle suivie à la section 2.2.4.2 avec des paramètres de vagues différents. Pour des vagues extrêmes de 8 m, la période de la vague est prise égale à 10 secondes.

$$H = 8 \quad \text{Hauteur de la vague en mètres}$$
$$\mathrm{A} = \frac{H}{2} = 4 \quad \text{Amplitude en mètres}$$
$$g = 9{,}81 \quad \text{Accélération gravitationnelle en m/s}^2$$
$$T = 10 \quad \text{Période supposée en secondes}$$
$$\lambda = \frac{g\,T^2}{2\pi} \approx 156 \quad \text{Longueur d'onde en m}$$
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{Nombre d'onde}$$
$$c = \frac{\lambda}{T} \quad \text{Vitesse de propagation}$$
$$\omega = k\,c \quad \text{Pulsation}$$

2. Résultats

L'entièreté des résultats se trouve en Annexe, section 4.4.4, Figure 4.1.

En conditions forte houle, avec des vagues de 8 m, l'effet des vagues est bien plus important, provoquant un mouvement de basculement allant de -4,9 m à 4,9 m et un moment fléchissant 4 fois plus important que pour les vagues de 4 m ($-4 \cdot 10^9$ Nm). Ces résultats démontrent l'impact important qu'ont les vagues sur la structure (Figure 2.6, Figure 2.7 et entièreté des résultats en Annexe Figure 4.1 section4.4.4).

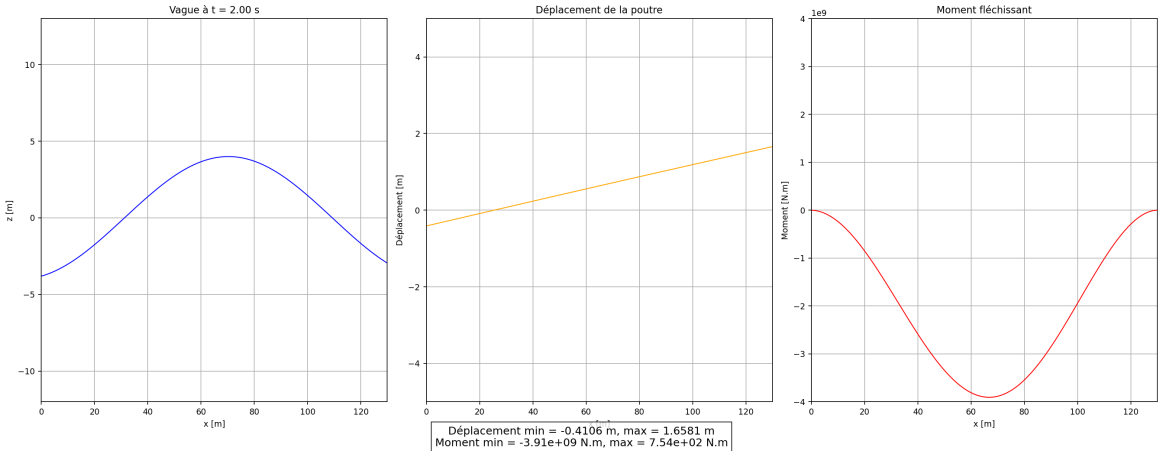


Figure 2.6 – Comportement du caisson à t=2s (moment max)

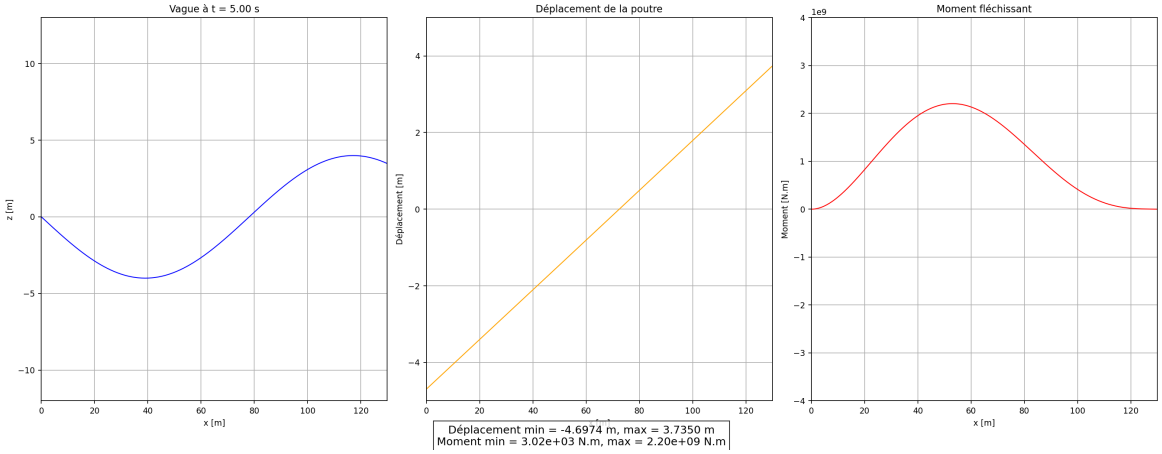


Figure 2.7 – Comportement du caisson à t=5s (déplacement max)

2.2.4.4 Avec charge ponctuelle à l'extrémité

1. Méthode

L'objectif de cette section est d'analyser la stabilité du caisson soumis à une charge ponctuelle importante appliquée sur l'un des quais. Ce cas de charge peut notamment représenter, à titre d'exemple, l'ajout de dix conteneurs de 20 tonnes chacun positionnés en bord de plateforme, simulant ainsi l'implantation d'un petit port.

L'analyse repose sur l'adaptation du code présenté en section 2.2.4.2. Les charges ponctuelles sont introduites à une certaine distance du bord, correspondant à 5 % de la longueur totale de la plateforme, soit environ 6 m. Cette configuration permet de représenter un scénario de chargement asymétrique localisé en périphérie de la structure.

Charges

$$p_0 = -1,54 \cdot 10^5 \cdot b \qquad \text{charge répartie uniforme [N/m]}$$

$$P_2 = -10 \cdot 2 \cdot 10^5, \quad x_2 = 0.95\,L \qquad \text{Charge ponctuelle [N] à 95\% de L}$$

$$x_i = i\,\Delta x, \quad \Delta x = \frac{L}{n} \quad (i = 0, \ldots, n)$$

$$p_i = p_0\,\Delta x + \frac{P_2}{\Delta x}\,\delta_{i,i_2}, \quad \text{Charge appliquée à chaque nœud} \tag{2.23}$$

2. Résultats

Résultats complets voir en Annexe, section 4.4.4, Figure 4.2.

L'ajout d'une charge correspondant à 10 conteneurs de 20 tonnes sur l'extrémité de la plateforme n'a pas d'impact significatif sur le comportement structurel du caisson et sur les sollicitations internes.

2.2.4.5 Échelle de la ville avec les modules reliés à l'aide de rotules

1. Méthode

L'objectif de cette section est d'évaluer l'influence du type de connecteurs entre modules sur le comportement mécanique global, en particulier en termes de sollicitations et de déplacements. Deux configurations

de liaisons sont comparées : une connexion rigide entre les modules et une connexion articulée (à l'aide de rotules).

Dans le cas d'une connexion rigide, les modules sont modélisés comme une seule plateforme continue, de longueur équivalente à la somme des longueurs des modules individuels.

a Géométrie et propriétés

Les paramètres géométriques et mécaniques du caisson restent identiques à ceux précédemment définis. Un nouveau paramètre est introduit : $N_{\text{mod}} = 10$, représentant le nombre de modules assemblés. Cette valeur est déterminée en s'inspirant de l'organisation urbaine proposée pour la ville flottante Oceanix.

Il convient de souligner que la configuration réelle de la ville n'est pas linéaire, mais concentrique. Par conséquent, il est difficile d'estimer avec précision le nombre de modules connectés sur toute la largeur de la ville. Afin d'obtenir une approximation raisonnable, le diamètre de la ville est divisé par la longueur d'un module, ce qui fournit une estimation du nombre de modules alignés dans une direction unique.

- Pour une population de 10 000 habitants, la ville est représentée par 10 modules alignés.
- Pour une population de 60 000 habitants, ce nombre passe à 28 modules.
- Pour une population d'un million d'habitants, on considère 45 modules alignés.

Le cas présenté ci-après correspond à une configuration de 10 000 habitants, soit 10 modules, mais la méthodologie reste identique pour les configurations à 28 et 45 modules.

$b = \sqrt{3} \cdot 75 \approx 129.9$ m	Largeur du caisson
$L = b$	Longueur d'un module
$N_{\text{mod}} = 10$	Nombre de modules
$L_{\text{tot}} = L\, N_{\text{mod}}$	Longueur totale du caisson
$n_{\text{tot}} = 3000$	Nombre de points de discrétisation
$\gamma_{\text{eau}} = 10200$ N/m^3	Poids volumique de l'eau
$k = \gamma_{\text{eau}}\, b$	Raideur de la fondation élastique
$h = 23$ m	Hauteur de la poutre
$t = 0.5$ m	Épaisseur des parois
$I = \dfrac{b\,h^3 - (b-2t)\,(h-2t)^3}{12}$	Moment d'inertie [m^4]
$E = 3 \cdot 10^{10}$ Pa	Module de Young
$EI = E\, I$	Rigidité flexionnelle

b Discrétisation et charges initiales

Pour la discrétisation, la seule nouveauté est la longueur des éléments finis, le nombre de discrétisations ne se faisant plus à la dimension d'un module, mais sur la longueur totale de la suite de modules.

$$x_i = i\,\Delta x, \quad \Delta x = \frac{L_{\text{tot}}}{n_{\text{tot}}}, \quad i = 0, \ldots, n_{\text{tot}}$$

$p_0 = -1,54 \cdot 10^5 \cdot b$	Charge répartie uniforme [N/m]
$p_i = p_0\, \Delta x$	Charge sur chaque segment

Concernant la prise en compte de la houle rien ne change par rapport au code section 2.2.4.2.

c Connecteurs

Le nombre d'éléments par module ainsi qu'une liste d'indices correspondants à la position des rotules sont déterminés par la relation suivante,

$$n_{\text{modul}} = \frac{n_{\text{tot}}}{N_{\text{mod}}}, \quad \text{indices des charnières : } i_{\text{hinge},j} = n_{\text{modul}} \cdot (j+1), \quad j = 0, \ldots, N_{\text{mod}} - 2$$

d Modélisation des rotules dans la poutre sur fondation élastique

Lorsque des rotules (*hinges*) sont présentes le long de la poutre, la fonction `BeamElasticFoundation` modifie localement la matrice de raideur élémentaire pour annuler la transmission de moments fléchissants à l'emplacement des rotules. Cela correspond physiquement à une articulation idéale permettant une rotation libre sans résistance (moment nul).

e Matrice de raideur modifiée au niveau d'une rotule

Pour un élément adjacent à une rotule, la matrice de raideur devient :

$$K_e^{\text{rotule}} = \frac{EI}{\Delta x^3} \begin{pmatrix} 3 & 3\Delta x & -3 & 0 \\ 3\Delta x & 3\Delta x^2 & -3\Delta x & 0 \\ -3 & -3\Delta x & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + k\,\Delta x \cdot \text{diag}(0.5, 0, 0.5, 0) \tag{2.24}$$

où :

- EI est la rigidité en flexion de la poutre,
- k est la raideur du sol élastique (type Winkler),
- $\Delta x = L/(n-1)$ est la longueur d'un élément fini.

La dernière ligne et colonne nulles indiquent que la rotation en fin d'élément est libre : modélisant ainsi une rotule parfaite.

f Calcul des moments fléchissants aux extrémités des éléments

Les moments internes sont extraits à partir des vecteurs suivants :

$$K_{\text{left}} = \frac{EI}{\Delta x^3} \begin{bmatrix} 3 & 3\Delta x & -3 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

$$K_{\text{right}} = \frac{EI}{\Delta x^3} \begin{bmatrix} 3\Delta x & 3\Delta x^2 & -3\Delta x & 0 \end{bmatrix} \tag{2.26}$$

Puis, les moments aux extrémités de l'élément i sont donnés par (Winkler) :

$$M_{\text{left}}^{(i)} = -K_{\text{left}} \cdot \mathbf{v}_e^{(i)} \tag{2.27}$$

$$M_{\text{right}}^{(i)} = K_{\text{right}} \cdot \mathbf{v}_e^{(i)} \tag{2.28}$$

où $\mathbf{v}_e^{(i)}$ est le vecteur de déplacements nodaux de l'élément i. Grâce à la structure modifiée de K_e^{rotule}, les moments transmis entre deux éléments séparés par une rotule sont effectivement nuls.

g Interprétation physique

Les rotules permettent une discontinuité de rotation tout en maintenant la continuité de déplacement transversal. Cela signifie qu'il n'y a pas de moment transmis d'un module à l'autre, ce qui correspond à une articulation mécanique parfaite. Ce comportement est reproduit dans la simulation en annulant les termes liés à la rotation dans la matrice de raideur de l'élément contenant la rotule.

h Équation du caisson sur fondation élastique

$$EI\,\frac{\mathrm{d}^4 w}{\mathrm{d}x^4}(x,t) \;+\; k\,w(x,t) = p^{\mathrm{tot}}(x,t), \quad \text{Équation d'équilibre} \tag{2.29}$$

$$M(x,t) = -\,EI\,\frac{\mathrm{d}^2 w}{\mathrm{d}x^2}(x,t), \quad \text{Moment fléchissant} \tag{2.30}$$

2. Résultats

L'ensemble des résultats se retrouve en Annexe, section 4.4.4

Il y a une nette différence entre les modules assemblés par connecteurs rigides et modules assemblés par rotules (Figure 2.8, Figure 2.9 et Figure 2.10).

Les connexions rotulées induisent des mouvements relatifs entre modules, avec des amplitudes oscillant entre $-0{,}4\,\mathrm{m}$ et $0{,}4\,\mathrm{m}$ dans le cas de la ville de 10 000 habitants, et autour de $\pm 0{,}2\,\mathrm{m}$ pour les configurations correspondant à des populations de 60 000 et 1 000 000 d'habitants. Ces déplacements sont dus à la liberté de rotation offerte par les rotules entre des modules structurellement rigides. De tels mouvements peuvent engendrer une sensation d'inconfort pour les usagers. Par ailleurs, les liaisons rotulées imposent un moment fléchissant nul aux interfaces, ce qui a pour effet de réduire les sollicitations internes globales.

Il est également notable que les modules situés aux extrémités de la structure présentent des déplacements significativement plus élevés que ceux observés dans les zones centrales.

À l'inverse, dans le cas de modules assemblés de manière rigide, l'ensemble se comporte comme un caisson unique de grande longueur ; la longueur caractéristique de l'élément est donc dépassée de loin, ce qui réduit la rigidité globale et accroît sa flexibilité. Cette flexibilité accrue se manifeste notamment par des déformées importantes aux extrémités, particulièrement lorsque ces zones coïncident avec le passage d'un sommet ou d'un creux de vague. Néanmoins, les déformées au centre de la structure restent nettement inférieures à celles observées dans le cas des assemblages rotulés.

En ce qui concerne les moments fléchissants, ils sont significativement plus élevés dans le cas des connexions rigides, atteignant des valeurs pouvant dépasser $2 \cdot 10^9\,\mathrm{Nm}$, soit plus du double des valeurs observées dans le cas des liaisons rotulées.

Il convient de noter que les configurations correspondant à des villes de 60 000 et 1 000 000 d'habitants n'induisent pas de modifications majeures du comportement structurel par rapport à celle de 10 000 habitants. En résumé, comme le suggère la littérature, plus une structure est étendue, plus sa rigidité et sa stabilité augmentent, mais elle devient également sujette à des efforts internes plus importants.

Les observations formulées ici concernant les différences entre assemblages rotulés et rigides seront généralisables aux différentes configurations qui suivent.

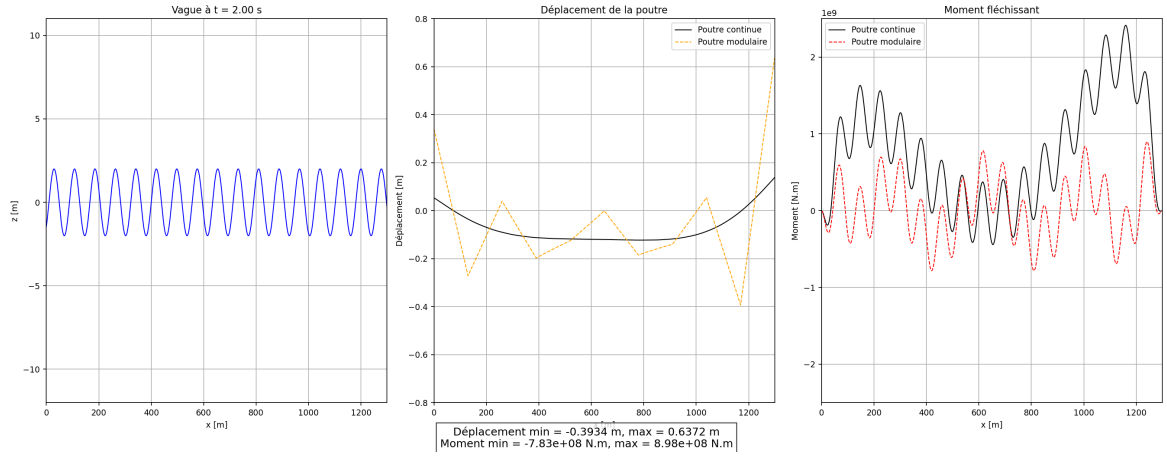


Figure 2.8 – Comparaison caisson continu et rotulé pour une ville de 10 000 habitants

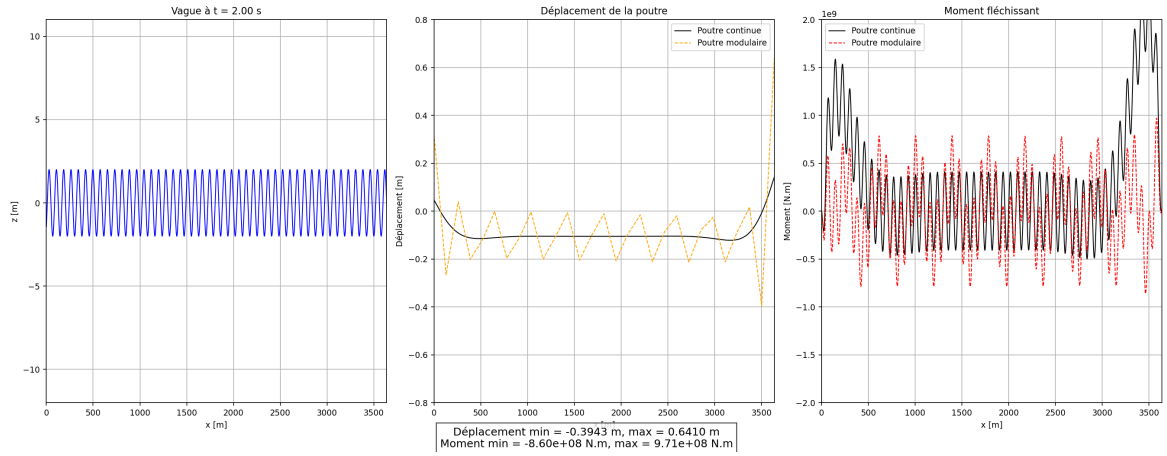


Figure 2.9 – Comparaison caisson continu et rotulé pour une ville de 60 000 habitants

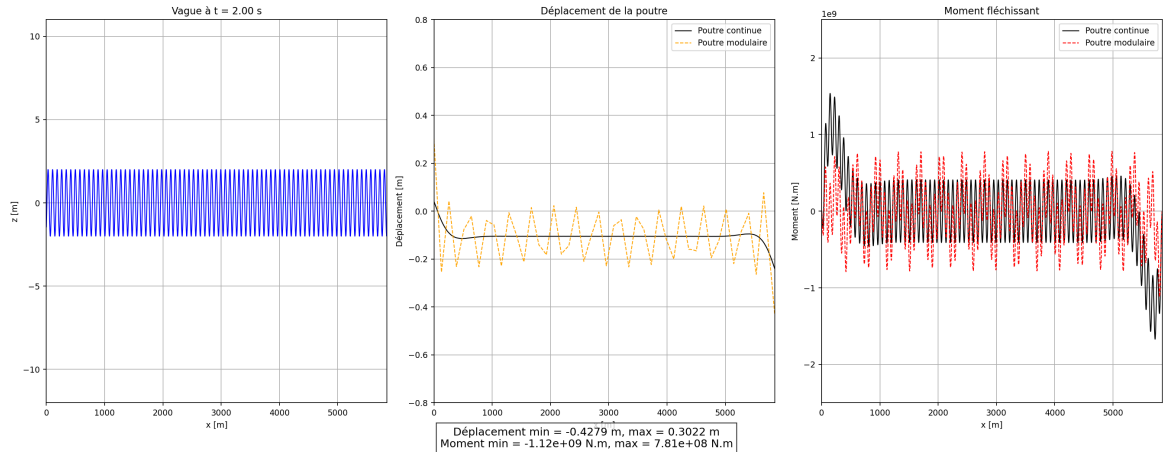


Figure 2.10 – Comparaison caisson continu et rotulé pour une ville d'un million d'habitants

2.2.5 Vérification et calcul du moment de résistance (M_{Rd}) dans le caisson en béton

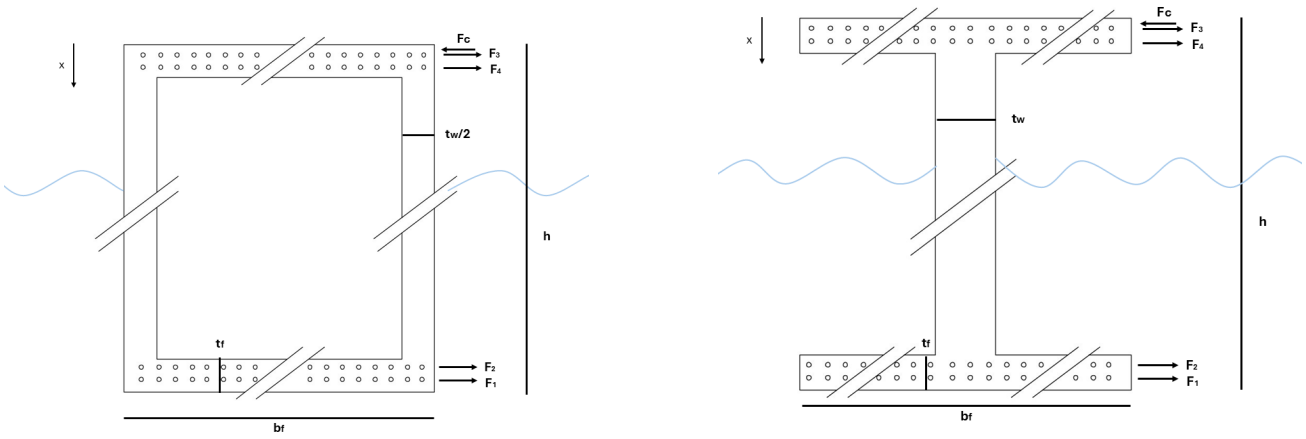
1. Méthode

Dans cette section, il s'agit de vérifier si le caisson peut bien reprendre les efforts de flexion induits lors des différentes simulations. Les vérifications vont se faire à l'aide d'un code Python également. L'entièreté du code se trouve en Annexe, section 4.4.5.

a Hypothèses de représentation

Le caisson va être représenté comme s'il s'agissait d'une poutre en I ou double T (Figure 2.11). Pour ce faire, l'épaisseur des semelles supérieures et inférieures est la même que celle du caisson. L'âme centrale de la poutre en double T sera équivalente à la somme des 2 âmes latérales du caisson.

Une autre particularité fixée dans la section est la position de barres de renforcement dans la semelle supérieure et la semelle inférieure. En effet, la structure étant soumise à des moments positifs et négatifs de même importance, il est primordial de mettre le même renforcement en partie haute et en partie basse de la section.



(a) Section du Caisson (b) Hypothèses de section en double T pour calculs

Figure 2.11 – Définition de la section du caisson

b Propriétés des matériaux

Les grandes propriétés sont fixée avec notamment le module de Young de l'acier (E_s) et la résistance caractéristique du béton. Dans le cas du caisson, l'hypothèse de l'utilisation d'un béton C 45/55 est posée.

$$f_{ck} = 45 \text{ MPa}, \qquad f_{cm} = f_{ck} + 8,$$
$$E_b = 22\,000 \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \text{ MPa}, \quad f_{ctm} = 0{,}33\sqrt{f_{cm}} \text{ MPa},$$
$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}, \qquad E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa},$$

c Géométrie de la poutre en I

Ensuite sont également fixées les propriété de la géométrie de la poutre avec les épaisseurs des âmes et semelles :

$$h = 2,3 \cdot 10^4 \text{ mm}, \qquad b_f = 1,299 \cdot 10^5 \text{ mm},$$
$$t_f = 500 \text{ mm}, \qquad t_w = 1\,000 \text{ mm},$$
$$L = 1,299 \cdot 10^5 \text{ mm}.$$

d Section efficace et inertie

Dans cette partie sont calculées la section efficace de béton et l'inertie.
Les calculs sont détaillés en Annexe, section 4.4.5.

e Ferraillage

Dans cette partie sont fixés la couche d'enrobage et le diamètre des barres, le nombre de barres et l'air d'acier de renforcement.

$$e = 50 \text{ mm} \quad \text{enrobage},$$
$$\phi = 28 \text{ mm} \quad \text{barres principales},$$

Section des barres :

$$A_{\text{barre}} = \pi\left(\tfrac{\phi}{2}\right)^2, \quad A_{s_i} = n_i\, A_{\text{barre}}, \quad n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 250.$$

f Moments appliqué

Le moment appliqué est le moment de flexion le plus élevé sorti des différentes simulations réalisées.

$$M_{Ed,\mathrm{ELU}} = 3{,}91 \cdot 10^{9}\ \mathrm{N\,m} = 3{,}91 \cdot 10^{12}\ \mathrm{N\,mm}.$$

g Définition de la fonction $N(x)$

Un processus itératif est mis en place afin de chercher x tel que la résultante des efforts d'armatures et de compression du béton soit nulle :

$$N(x) \;=\; \sum_{i=1}^{4} F_i \;-\; F_c(x) \;=\; 0, \quad \text{Résultante} \tag{2.31}$$

h Recherche de la racine

Recherche de la racine sur l'intervalle $[\,10,\ h-10\,]$ pour résoudre $N(x)=0$ et obtenir x_{sol}.
$x_{sol} = 64,97mm$

i Calculs finaux

Avec $x = x_{\mathrm{sol}}$:

$D_i =$ bras de levier de la force i

$$M_{Rd} = \sum_{i=1}^{4} F_i\, D_i \;-\; F_c\big(h - y_{c,\mathrm{bton}}\big), \quad \text{Moment de résistance} \tag{2.32}$$

$$\text{Ratio} = \frac{M_{Rd}}{M_{Ed,\mathrm{ELU}}} = |1,17|, \quad \text{Ratio des moments} \tag{2.33}$$

$$N_{\mathrm{final}} = \sum_{i=1}^{4} F_i \;-\; F_c = -1{,}19 \cdot 10^{-6} N, \quad \text{Résultante finale} \tag{2.34}$$

$$\rho_{min} = \frac{4 \cdot A_{s_i}}{A_n} = 0,5\% > 0,2\%, \quad \text{Ratio aire de renforcement sur aire de béton} \tag{2.35}$$

2. Résultats

Le caisson résiste aux efforts qu'il subit avec un ratio du moment résistant sur le moment interne assez faible ce qui traduit une bonne optimisation.

Cependant, il est évident que pour que la structure reste en place il faut éviter les fissurations dans le béton mais elles n'ont pas été calculées dans ce travail.

2.3 Étude structurelle du grillage de poutres en béton

2.3.1 Définition et vérification structurelle du grillage de poutres

1. Méthode

Dans le cas du grillage de poutres, la flottaison de la plateforme va être étudiée à l'aide des efforts généraux, comme fait pour le caisson. Cependant, il s'agira également de faire l'étude approfondie de la descente des charges, qui est un peu différente dans ce cas-ci.

a Hypothèses

Pour pouvoir déterminer un grillage de poutres aux dimensions réalistes, toute une série d'hypothèses ont été réalisées :

- Les dimensions de la plateforme sont donc fixées à 120 m de façon à avoir une surface de plateforme similaire à celle du caisson hexagonal $a_{grillage,poutres} = 120\ \ m$.
- L'épaisseur de béton des poutres est prise égale à $e = 0,35$ m, n'ayant pas d'autres informations à disposition.
- L'épaisseur de béton de la dalle est prise égale à $e_{dalle} = 0,4\ \ m$.
- La hauteur hors eau du caisson est de $H_{\text{hors eau}} = 8$ m, correspondant aux vagues extrêmes.
- La superstructure est en ossature légère (CLT) ; la charge linéique des planchers est évaluée à $100\,\text{kg/m}^2$ (Chiriac et al., 2019).
- L'emprise au sol des bâtiments sur la plateforme est prise égale à $10\ 000 m^2$.
- Le nombre maximal d'étages est fixé à $n = 7$, comme observé dans le projet Oceanix, chaque niveau mesurant 3 m, afin d'estimer les hauteurs exposées au vent.
- Dans ce type de structure, il y a un volume important de béton remplissant une fonction diaphragme. Même si officiellement dessinés sur les plans d'Oceanix City, ces éléments sont pratiquement inexistants. Dans la réalité, ils seront un élément très contraignant, car rajoutant du poids. En se basant sur la présentation de l'île princesse Elisabeth de Guillermin & Allan (2024), il est possible d'établir le pourcentage approximatif du volume diaphragme par rapport au volume total. Celui-ci est estimé à environ 10 à 15 %. Un pourcentage de 10 % du volume total du la poutre sera donc appliqué dans les calculs.
- L'avantage de travailler avec des caissons est que l'espace interne pourrait éventuellement être utilisé pour du stockage. Étant donné que ce volume va fortement être séquencé, la surface disponible pour du stockage sera réduite. Une hypothèse de 25 % de la surface de la plateforme laissée libre au stockage sera d'application.
- Les calcul sont basés sur un grillage choisi de 8 poutres par 8 permettant ainsi un entraxe d'une distance de 15 m entre les poutres.

b Charges appliquées

Tous les calculs se rapportant à cette section sont détaillés en Annexe, section 4.5.1.

Pour déterminer le tirant d'eau sur les poutres, une boucle itérative va être utilisée sur excel (comme pour le caisson section 2.2.1 b).

Dans cette section, il est présenté successivement les différentes catégories de charges (permanentes et variables) qui s'appliquent à la structure, ainsi que leur modélisation numérique. La démarche suivie est la suivante :

- Calcul des charges permanentes. Celles-ci comprennent le poids des bâtiments basé sur l'hypothèse du CLT en multipliant par les m^2 de planchers et de façade.

  Parmi les charges permanentes, est également calculé le poids des poutres principales et secondaires. Afin d'y arriver, le volume de béton total : interne (diaphragme) et l'enveloppe, est déterminé et multiplié par la masse volumique.
- Calcul des charges variables. Les valeurs des charges d'exploitation sont issues de l'eurocode 1 CEN (2002). Parmi les charges variables sont prises en compte :
  - Les usages publics (commerces de détail, plateforme RDC destinée à un usage public ne présentant pas d'obstacle à la circulation de personnes) : prises sur l'entièreté du RDC de la plateforme.

- Les charges d'exploitation résidentielle : prises sur les superficies des bâtiments multipliées par 6 étages. Aucun logement n'est destiné à être au RDC, le but étant de créer des espaces de vie les plus dynamiques possibles et de protéger les habitants en cas de vague exceptionnellement plus haute que 8 m.
- Le stockage : pris comme indiqué dans les hypothèses. Le stockage qui est destiné à la réserve d'eau potable, de combustible, etc.
- La neige : prise, logiquement, sur la totalité de la plateforme.

- Une fois les charges déterminées, un cas de charge va être réalisé afin de déterminer le cas le plus défavorable.

  Ces actions sont combinées à l'aide des coefficients Ψ_i de l'eurocode 1 (CEN, (2002) :

Tableau 2.5 – Coefficient de combinaison (CEN, 2002).

Action	$\Psi 0$	Ψ_1	Ψ_2
Exploitation résidentielle	0,7	0,5	0,3
Aire de shopping	0,7	0,7	0,6
Espace de stockage	1	0,9	0,8
Neige	0,5	0,2	0

  Le cas le plus défavorable est le cas 1 avec une force totale $P_{totale,poutre} = 4,031 \cdot 10^6 kN$ (Tableau 4.7)

Tableau 2.6 – Cas de charges sur la plateforme.

Cas de charge	Charges permanentes ($q_{\text{permanentes}}$)	Exploitation résidentielle ($q_{\text{résidentielle}}$)	Aire de shopping (q_{public})	Espace de stockage (q_{stockage})	Neige (q_{snow})	Valeur (kN)
Cas 1	1,35	1,5	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	$4,031 \cdot 10^6$
Cas 2	1,35	$1,5 \cdot \Psi_0$	1,5	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	$4,009 \cdot 10^6$
Cas 3	1,35	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	1,5	$1,5 \cdot \Psi_0$	$3,982 \cdot 10^6$
Cas 4	1,35	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	1,5	$3,977 \cdot 10^6$

c Volume immergé nécessaire

Pour pouvoir connaître la hauteur du tirant d'eau, il faut connaître le volume immergé suffisant. Pour garantir la flottabilité de la structure, la poussée d'Archimède doit équilibrer la charge totale la plus défavorable, notée $P_{\text{totale}} = 4,031 \cdot 10^6$ kN. Étant donné que la surface de la plateforme $A_{\text{plateforme}}$ est fixée ($1,44 \cdot 10^4 m^2$), c'est la hauteur immergée $H_{\text{immergé}}$ qui s'ajuste pour obtenir cet équilibre.

Le volume immergé est calculé comme suit :

$$V_{\text{immergé, poutre}} = \frac{P_{\text{totale, poutre}}}{\rho_{\text{eau}}} = 4,059 \cdot 10^5 \text{ m}^3, \quad \text{Volume immergé de la poutre} \tag{2.36}$$

Avec $\rho_{\text{eau}} = 10{,}25$ kN/m^3.

$$H_{\text{immergé, poutre}} = \frac{V_{\text{immergé, poutre}}}{A_{\text{plateforme, grillage, poutres}}} = 44{,}29 \text{ m}, \quad \text{Hauteur immergée} \tag{2.37}$$

où $A_{\text{plateforme, grillage, poutres}}$ est la surface projetée horizontale de la plateforme.

2. Résultats

À terme, les dimensions de la plateforme sur grillage de poutre en béton sont un carré de 120 m de côté avec une hauteur totale de 52,29 m et ayant un tirant d'eau de 44,29 m.

2.3.2 Vérification de la flottabilité

1. Méthode

Comme vu lors de la Section 1.9.5, la stabilité de la plateforme se contrôle par la position relative du centre de gravité G et du métacentre M. Tous les calculs relatifs à cette section se retrouvent en Annexe, section 4.5.2

- Il est d'abord choisi comme origine pour les calculs (le point $K = (0\,;0)$), la position la plus basse de la structure.
- Ensuite, à partir de ce point, sont calculées les hauteurs du centre de gravité $\overline{KG} = 23,13m$ et du centre de flottaison B ($\overline{KB}$). Qui permettront à terme de déterminer la distance métacentrique $\overline{KM} = 61,66m$.

2. Résultats

Une fois toutes ces distances définies, la position d'équilibre est vérifiable :

$$\overline{GM} = \overline{KM} - \overline{KG} = 38,54 \text{ m}, \quad \text{Distance métacentre–centre de gravité} \tag{2.38}$$

La condition $\overline{GM} > 0$ confirme que la structure est en position d'équilibre stable, garantissant ainsi sa stabilité hydrostatique. Par ailleurs, la position du centre de gravité a été comparée à celle du centre de carène : le centre de gravité se situe au-dessus du centre de flottaison.

Il en résulte que la structure satisfait les critères de stabilité statique, et peut donc être considérée comme stable dans sa configuration actuelle.

2.3.3 Descente de charges

1. Méthode

Pour dimensionner la poutre principale, il faut d'abord déterminer la répartition des charges appliquées sur la dalle.

a Charge surfacique équivalente

Tout d'abord, il faut déterminer la charge surfacique équivalente s'appliquant sur la dalle, qui s'obtient en divisant la charge totale par la surface de la plateforme :

$$q_{\text{surf}} = \frac{47\,225 \text{ kN}}{1\,000 \text{ m}^2} = 47{,}225 \text{ kN/m}^2, \quad \text{Charge surfacique de la dalle} \tag{2.39}$$

b Résultante sur une dalle

Il est possible de déterminer la résultante s'appliquant sur une dalle carrée d'entre-axes $d = 15$ m (dalle entre les poutres)(Figure 2.12). La résultante est :

$$R = q_{\text{surf}}\, d^2 = 47{,}23 \cdot 15^2 = 10,63 \cdot 10^4 \text{ kN}, \quad \text{Résultante par dalle} \tag{2.40}$$

Chaque poutre secondaire reçoit alors un quart de cette charge :

$$R_{\text{sec / dalle}} = \frac{R}{4} = 2,656 \cdot 10^3 \text{ kN}, \quad \text{Effort par poutre secondaire} \tag{2.41}$$

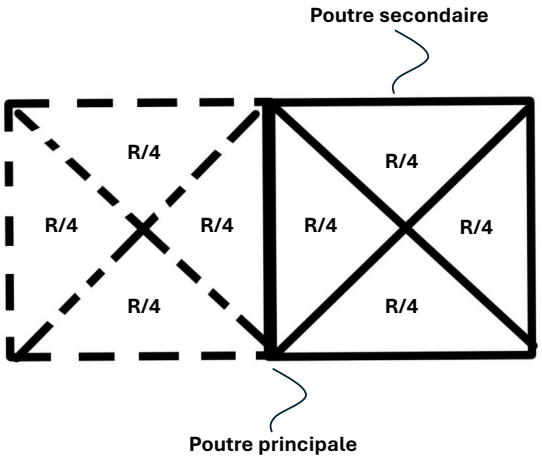


Figure 2.12 – Répartition des efforts de la dalle sur les poutres secondaires

c Poutre secondaire

Une fois la répartition des charges de la dalle connue, les charges reprises par une poutre secondaire peuvent être déterminées. Chaque poutre secondaire supporte deux dalles adjacentes, d'où :

$$R_{\text{sec}} = 2 \cdot \frac{R}{4} = 2 \cdot 2,656 \cdot 10^3 = 5,313 \cdot 10^3 \text{ kN}, \quad \text{Résultante totale poutre secondaire} \tag{2.42}$$

Le schéma de chargement est donné en Figure 2.13.

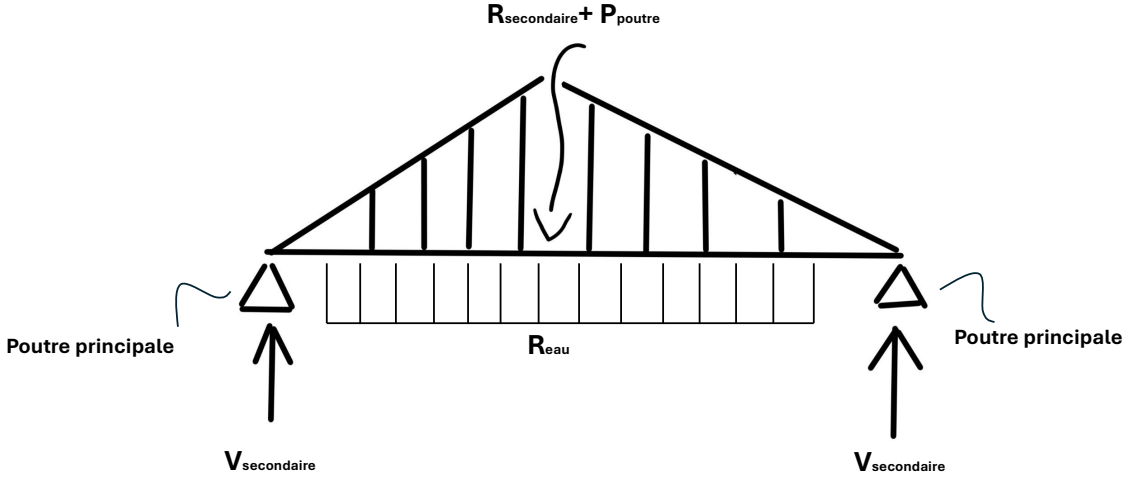


Figure 2.13 – Efforts sur la poutre secondaire

d Modélisation de la poutre secondaire

La poutre secondaire est numériquement étudiée sur l'eau, afin de déterminer les efforts tranchants s'appliquant ponctuellement transmis à la poutre principale. Les poutres secondaires reposant également sur l'eau, qui reprend une partie des charges, suivant les formules de fondations élastiques (Winkler). La poutre est donc étudiée avec un code similaire à celui du caisson.

Il ressort que l'effort tranchant absolu

$$V_{poutre,secondaire} = 2,3 \cdot 10^5 kN$$

Cependant, cet effort étant transmis des deux côtés vers la poutre principale via les poutres secondaires, il convient de le multiplier par un facteur 2. Ainsi, l'effort total transmis à la poutre principale par les poutres secondaires est donné par :

$$V_{\text{poutre, secondaire}} = 2 \cdot 2{,}3 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

e Poutre principale

La poutre principale reçoit à la fois :

- la contribution des dalles sous forme d'effort linéique q_{prin} ;
- son propre poids linéique p_{prin} ;
- la réaction d'eau R_{eau}
- l'effort tranchant de la poutre secondaire $V_{poutre,secondaire}$

La contribution des dalles se traduit par :

$$q_{\text{prin}} = 2 \cdot \frac{R}{2\,d} = 2 \cdot \frac{1,063 \cdot 10^4}{2 \cdot 15} = 354{,}2 \text{ kN/m}, \quad \text{Efforts linéiques dû aux dalles} \tag{2.43}$$

Le poids propre linéique est supposé constant et vaut :

$$p_{\text{prin}} = 1,94 \cdot 10^3 \text{ kN/m}, \quad \text{Poids propre linéique} \tag{2.44}$$

La résultante totale sur un élément de longueur d est donc :

$$R_{\text{prin}} = p_{\text{prin}}\, d + 2 \cdot \frac{R}{4} = 1,94 \cdot 10^3 \cdot 15 + 2 \times 2,65 \cdot 10^3, \quad \text{Résultante sur segment de poutre principale} \tag{2.45}$$

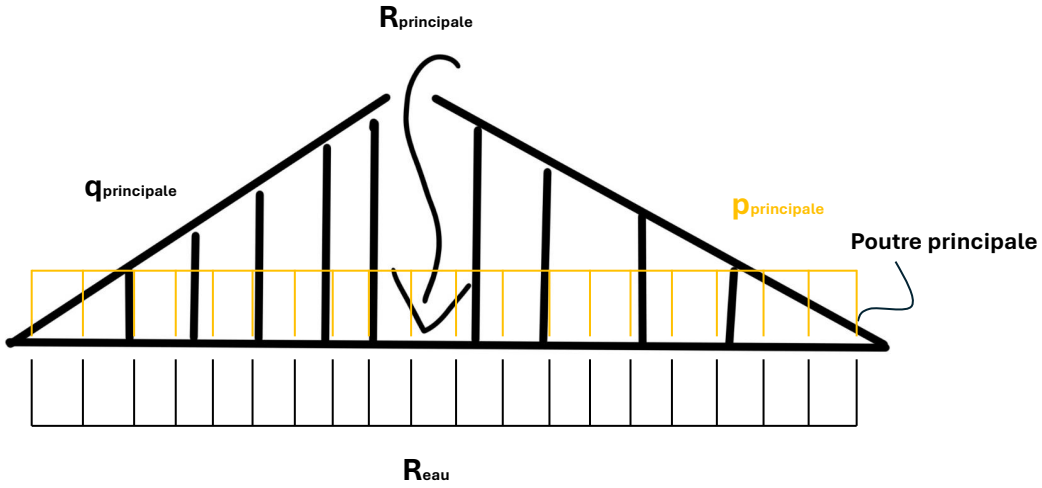


Figure 2.14 – Efforts sur la poutre principale entre deux poutres secondaires

2. Résultats

La descente des charges sur la poutre principale peut donc être représentée comme suit :

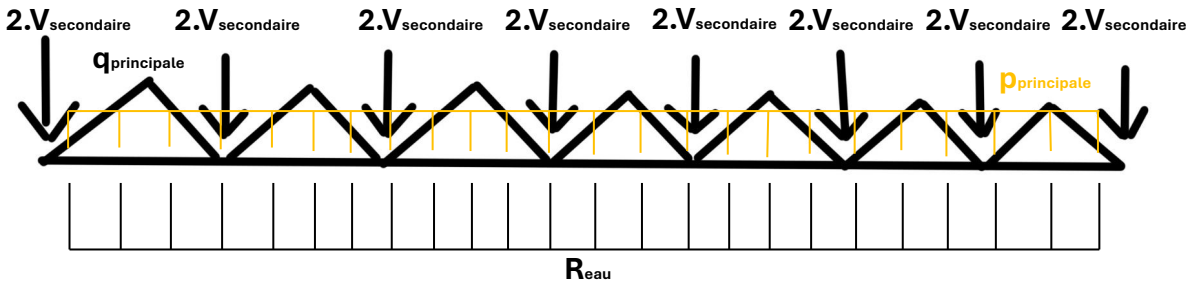


Figure 2.15 – Répartition totale des efforts sur la poutre principale

2.3.4 Modélisation numérique de la poutre principale sur fondation élastique de Winkler

2.3.4.1 État hydrostatique

1. Méthode

L'entièreté des calculs de cette section sont détaillés en Annexe, section 4.5.4. La poutre est étudiée selon le même principe que le caisson section 2.2.4.1 avec les paramètres suivants :

a Géométrie et propriétés mécaniques

$L = 120$ m	Longueur de la poutre
$n = 50$	Nombre d'éléments finis
$\Delta x = \dfrac{L}{n}$	Longueur de discrétisation
$\gamma_{\text{eau}} = 1,020 \cdot 10^4$ N/m^3	Poids volumique de l'eau
$b = 7$ m	Largeur de la poutre
$k = \gamma_{\text{eau}}\, b$	Raideur de la fondation élastique
$EI = 3.39 \times 10^{14}$ Pa	Rigidité flexionnelle

b Charges appliquées

Charge répartie initiale On introduit une charge répartie initiale uniforme, notée p_0, de valeur

$$p_0 \;=\; -2,648 \cdot 10^3 \times 10^3 \quad \text{N/m}, \quad \text{Charge linéique sur la poutre} \tag{2.46}$$

Sur chaque cellule i de largeur Δx, ceci correspond à une contribution de

$$p_i = p_0\, \Delta x \quad N, \qquad i = 0, \ldots, n, \quad \text{Charge au nœud} \tag{2.47}$$

$$p_i = p_0, \qquad i = 0, \ldots, n, \quad \text{Charge répartie éléments} \tag{2.48}$$

Charges ponctuelles périodiques En plus, on place tous les 15 m une charge ponctuelle de même valeur

$$P_{\text{point}} \;=\; -2 \times 2,3 \times 10^5 = -4,6 \times 10^5 \quad \text{(N)}.$$

Les positions des charges ponctuelles sont donc

$$x_{\text{ponc},\,m} = 15\,m, \quad m = 0, 1, 2, \ldots, \left\lfloor \frac{L}{15} \right\rfloor,$$

soit $x = 0$, 15, 30, 45, $\ldots$, 120 (inclus). Pour chaque position

$$x_{\text{ponc},\,m},$$

on calcule l'indice de nœud

$$j_m = \left\lfloor \frac{x_{\text{ponc},\,m}}{L}\, n \right\rfloor,$$

et l'on ajoute à la répartition p_i la valeur ponctuelle équivalente :

$$p_{j_m} \mathrel{+}= \frac{P_{\text{point}}}{\Delta x}.$$

Résumé de la répartition de charges initiale Au final, si l'on note p_i la valeur de la charge répartie à l'itération initiale (avant vague) au nœud i, on a :

$$p_i = p_0 + \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{L}{15} \rfloor} \frac{P_{\text{point}}}{\Delta x} \delta_{i,j_m}, \quad \text{Charge répartie initialement} \tag{2.49}$$

où $\delta_{i,j}$ est le symbole de Kronecker.

2. Résultats

En régime statique, la poutre principale présente un déplacement vertical de $-38\,\text{m}$ (Figure 2.16), soit une valeur légèrement inférieure à la hauteur immergée précédemment estimée à 44,29 m. Cette différence peut s'expliquer par le fait que le calcul initial ayant permis de dimensionner les hauteurs des poutres ne tenait pas compte de la descente de charges exacte. En effet, celle-ci intègre notamment la poussée hydrostatique appliquée sur la poutre secondaire, ce qui diminue les efforts tranchants ponctuellement transmis à la poutre principale.

Par ailleurs, le déplacement relatif observé le long de la poutre est quasi nul, de l'ordre de 0,5 mm pour une structure d'environ 120 m de long, ce qui témoigne d'une rigidité élevée de la poutre.

Il est également intéressant de noter que le moment fléchissant maximal est négatif, de l'ordre de $-2 \cdot 10^8\,\text{MPa}$, traduisant une domination locale de la poussée hydrostatique. Ce résultat est similaire à celui obtenu pour la modélisation du caisson, et pourrait être attribué à une légère perte de symétrie dans la matrice de raideur K_e, potentiellement introduite par l'implémentation numérique du modèle.

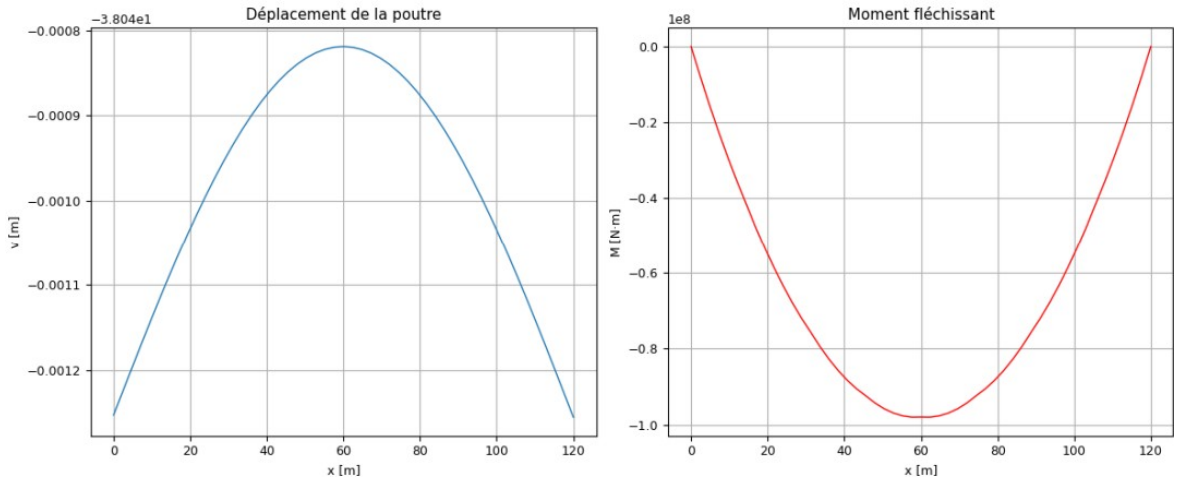


Figure 2.16 – Poutre en béton en état statique

2.3.4.2 En conditions de faible houle

1. Méthode

Au même titre que dans la section 2.2.4.2, seule la représentation de la vague est ajoutée et selon les mêmes critères.

2. Résultats

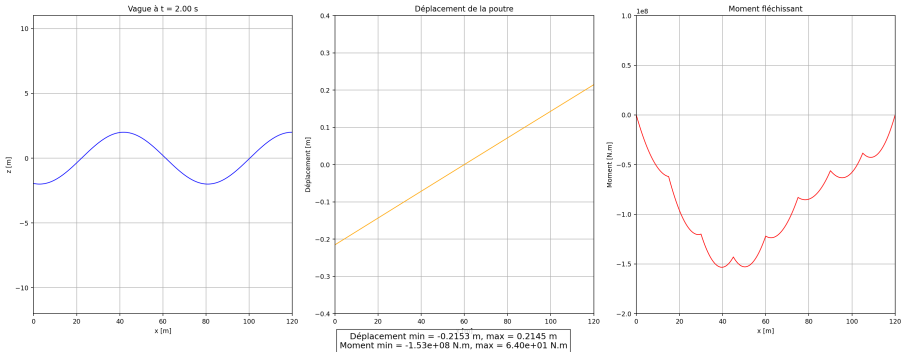
L'entièreté des résultats se trouve en Annexe section 4.5.5.

Les vagues ont pour effet de faire tanguer la structure entre -0,2 m et 0,2 m par rapport à l'état d'origine pour un moment fléchissant au sein de la structure qui est constamment soumise à des moments négatifs ($-2 \cdot 10^8 MPa$) (Figure 2.17). Le moment est constamment négatif sur la totalité de la poutre et

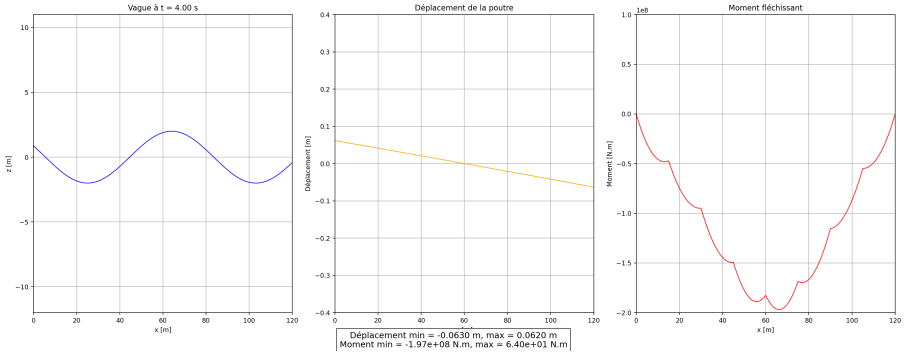
possède des pics de moment tous les 15 m dans le sens des moments positifs. Ces pics correspondent aux efforts tranchants des poutres secondaires aux niveaux de leurs points d'accroche aux poutres principales. Entre ces pics, les moments sont assez importants dans les négatifs. Cela s'explique par le fait qu'entre 2 forces ponctuelles, la poussée de l'eau est toujours d'application et est localement plus importante que les charges appliquées sur la poutre.

La structure est sollicitée principalement par des moments négatifs, ce qui peut s'expliquer par l'application des charges ponctuelles ne provoquant pas une déformée locale de la structure (très rigide), ce qui implique que pour contrer ces charges, l'eau doit exercer une poussée plus importante. Cependant, la poussée de l'eau est uniformément répartie et domine la charge uniformément répartie de la plateforme. Entraînant à terme ce moment négatif sur l'ensemble.

Un constat applicable à la troisième configuration (section 2.4.4.2)



(a) Poutre à t=2s



(b) Poutre à t=4s

Figure 2.17 – Poutre en béton sur vague de 4m

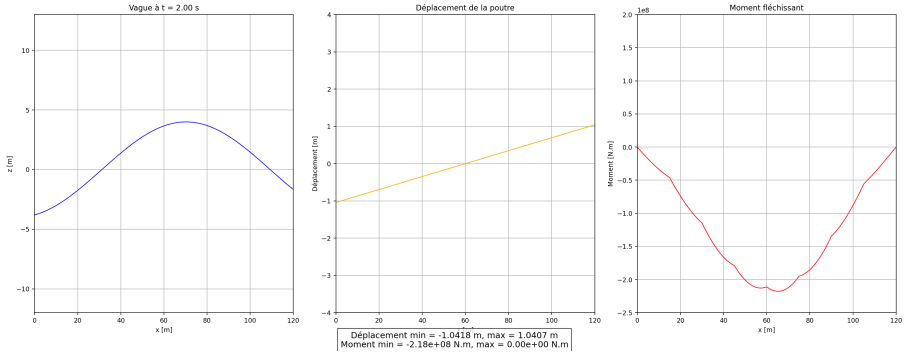
2.3.4.3 En condition de forte houle

1. Méthode

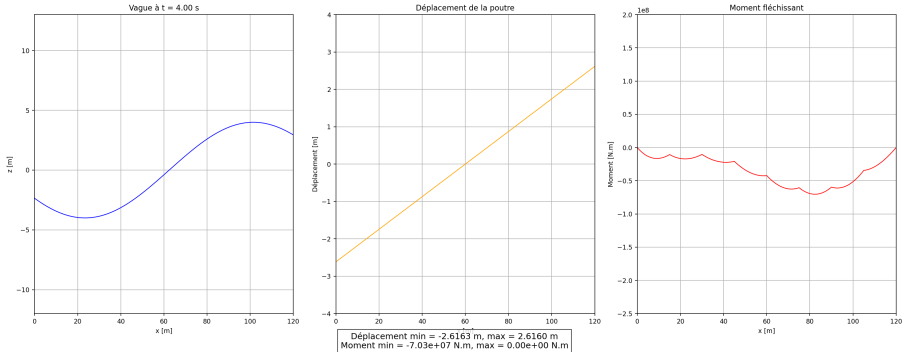
Le code est à nouveau le même avec d'autres paramètres pour des vagues de 8 m.

2. Résultats

En conditions de vagues de 8 m, l'effet des vagues est bien plus important, provoquant un mouvement de basculement allant de -2,7 m à 2,7 m et un moment fléchissant légèrement plus important que pour les vagues de 4 m (Figure 2.18).



(a) Poutre à t=2s



(b) Poutre à t=4s

Figure 2.18 – Poutre en béton sur vague de 8m

2.3.4.4 Avec charge ponctuelle à l'extrémité

1. Méthode

La charge ponctuelle équivalente à 10 conteneurs est insérée à l'extrémité de la plateforme suivant la même méthodologie que pour la section 2.2.4.4.

2. Résultats

L'entièreté des résultats se trouve en Annexe, section 4.5.5.1, Figure 4.8.

La charge ponctuelle a une influence bien plus importante que sur le caisson. La poutre ne bascule plus vraiment dans le temps, elle reste déséquilibrée par la charge ponctuelle. L'influence de cette charge est également visible sur le diagramme des moments avec un pic de moment tendant vers le positif à son point d'application. Ce qui dessine une forme de diagramme des moments encore inédite jusqu'à présent dans les expérimentations et diminue fortement le moment sollicitant dans la poutre ($1{,}2 \cdot 10^8$ MPa).

Il convient toutefois de nuancer l'influence de cette charge ponctuelle telle qu'elle est modélisée. En effet, dans cette analyse, la charge est considérée comme étant entièrement appliquée sur une seule poutre. Or, dans un cas réel, une partie de cette charge serait répartie sur la dalle, et une fraction pourrait également être transférée vers les poutres adjacentes en raison de la rigidité transversale de la structure. Par conséquent, l'effet local observé dans le modèle est probablement surestimé par rapport à la réalité.

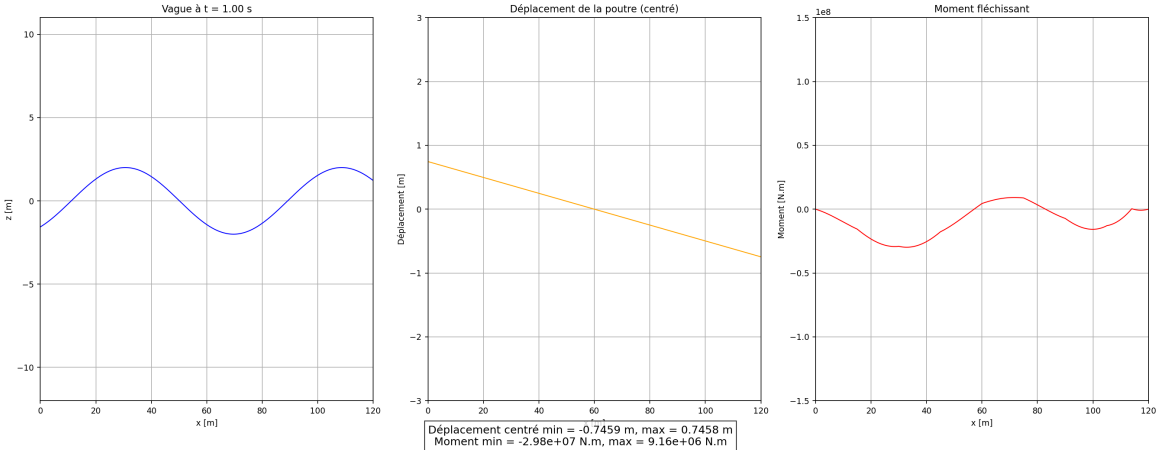


Figure 2.19 – Poutre en béton avec charge ponctuelle en t=1s

2.3.4.5 Échelle de la ville avec les modules reliés à l'aide de rotules

1. Méthode

La modélisation repose sur l'ajout de rotules entre les modules, comme décrit dans la section 2.2.4.5. Cette approche permet de simuler le comportement structural pour des configurations urbaines correspondant à une ville de 10 000, 60 000 et 1 000 000 d'habitants.

2. Résultats

L'entièreté des résultats se trouve en Annexe, section 4.5.5.1, Figure 4.9, 4.10 et 4.11.

Les observations sont similaires à celles formulées pour le caisson : les assemblages rigides offrent une meilleure stabilité globale, mais engendrent des sollicitations internes plus importantes.

Il est clairement observé que les moments fléchissants atteignent des valeurs plus élevées aux extrémités de la structure (notamment sur le premier kilomètre pour les deux plus grandes échelles urbaines étudiées). Cependant, en raison d'une rigidité en flexion plus faible comparée à celle du caisson, la poutre présente des comportements spécifiques : les extrémités de la structure continue, étant plus libres, affichent des déformées plus prononcées, alors que la partie centrale reste peu déformée.

2.4 Étude structurelle du grillage de poutres avec béton allégé

Dans cette section, le même grillage de poutres va être étudié pour une composition de poutres qui n'est plus simplement en béton, mais qui est en béton allégé de polystyrène expansé (PSE).

2.4.1 Définition des dimensions du grillage de poutres

1. Méthode

La méthode de calcul adoptée est identique à celle utilisée pour l'étude du grillage en béton classique. Uniquement les hypothèses et paramètres physiques ont été modifiés, et sont présentés ci-dessous.

Les principales différences dans les hypothèses de modélisation sont les suivantes :

- La masse volumique du béton est réduite de 2500 kg/m^3 à 1700 kg/m^3, conformément aux données issues de la section1.9.9 relative aux matériaux.
- La force totale la plus défavorable considérée, après application des cas de charge, est évaluée à : $P_{totale,poutre} = 1,86 \cdot 10^6 kN$.

- Le volume immergé requis pour satisfaire la condition d'équilibre par poussée d'Archimède est : $V_{immerg,poutre} = 1,856 \cdot 10^5 m^3$

2. Résultats

Les dimensions obtenues pour les poutres sont 29 m de haut pour 7 m de large avec un tirant d'eau de 21 mètres.

2.4.2 Vérification de la flottabilité

L'entièreté des résultats se trouve en Annexe section 4.6.2.

- Les hauteurs du centre de gravité $\overline{KG} = 15,5m$ et du centre de flottaison B ($\overline{KB}$) sont calculées.
- $\overline{KM} = 94,4m$.

$$\overline{GM} = \overline{KM} - \overline{KG} = 39,8 \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \text{Distance métacentre–centre de gravité} \tag{2.50}$$

Avec $\overline{GM} > 0$ cela signifie que la structure est en position d'équilibre stable. De plus, l'analyse de la position relative du centre de gravité par rapport au centre de carène confirme que le centre de gravité est situé au-dessus du centre de flottaison, ce qui constitue une autre garantie de stabilité hydrostatique.

La structure est donc bien stable.

2.4.3 Descente de charges

Suite à la descente de charge, l'effort tranchant aux extrémités de la poutre secondaire $V_{poutre,secondaire} = 1,14 \cdot 10^5 kN$

2.4.4 Modélisation numérique

2.4.4.1 État hydrostatique

1. Méthode

Le code est exactement le même que pour la section 2.3.4.1 avec les paramètres suivants :

a Géométrie et propriétés mécaniques

$L = 120$ m	Longueur de la poutre
$n = 50$	Nombre d'éléments finis
$\Delta x = \frac{L}{n}$	Longueur de discrétisation
$\gamma_{\text{eau}} = 1,02 \cdot 10^4$ N/m^3	Poids volumique de l'eau
$b = 7$ m	Largeur de la poutre
$k = \gamma_{\text{eau}}\, b$	Raideur de la fondation élastique
$EI = 7.12 \cdot 10^{13}$ Pa	Rigidité flexionnelle

b Charges appliquées

Charge répartie initiale On introduit une charge répartie initiale uniforme, notée p_0, de valeur

$$p_0 \;=\; -1,409 \cdot 10^6 \quad \text{N/m}, \quad \text{Charge uniformément répartie} \tag{2.51}$$

Charges ponctuelles périodiques En plus, on place tous les 15 m une charge ponctuelle de même valeur

$$P_{\text{point}} = -2 \times 1{,}14 \times 10^5 = -2{,}28 \times 10^5 \quad \text{N}, \quad \text{Charges ponctuelles} \tag{2.52}$$

2. Résultats

En régime statique, la poutre principale présente un déplacement vertical de -20 m (voir Figure 2.20), soit une valeur légèrement inférieure à la hauteur immergée estimée précédemment à 21 m. Cette différence peut être attribuée à une approximation dans le calcul initial des hauteurs, qui ne tenait pas compte de manière précise de la descente de charges. En effet, la prise en compte de la poussée hydrostatique appliquée sur la poutre secondaire induit une diminution des efforts tranchants transmis à la poutre principale, ce qui peut expliquer cette légère divergence.

Par ailleurs, le déplacement relatif final de la poutre est quasi nul (de l'ordre de 1,2 mm pour une structure d'environ 120 m de longueur), ce qui témoigne d'une rigidité flexionnelle élevée. Il est également à noter que le moment fléchissant calculé est négatif ($\approx -5{\cdot}10^7$ MPa), traduisant localement une domination de la poussée de l'eau sur les autres sollicitations. Ce comportement, similaire à celui observé dans la modélisation du caisson, pourrait être lié à une légère asymétrie dans la matrice de raideur K_e, induite par des imprécisions numériques lors de l'implémentation.

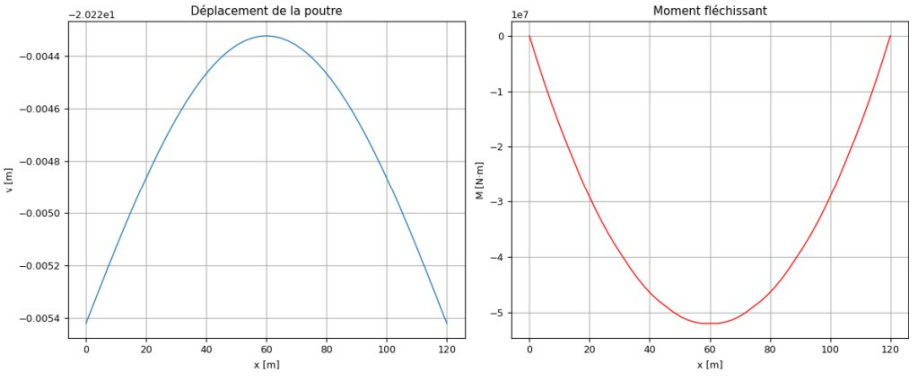


Figure 2.20 – Poutre en béton allégé en état statique sur l'eau

2.4.4.2 En conditions de faible houle

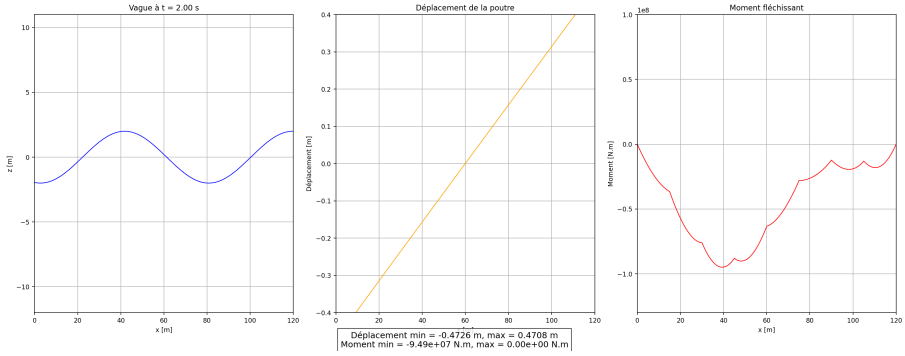
1. Méthode

Au même titre que dans la section 2.2.4.2, seule la représentation de la vague est ajoutée et selon les mêmes critères.

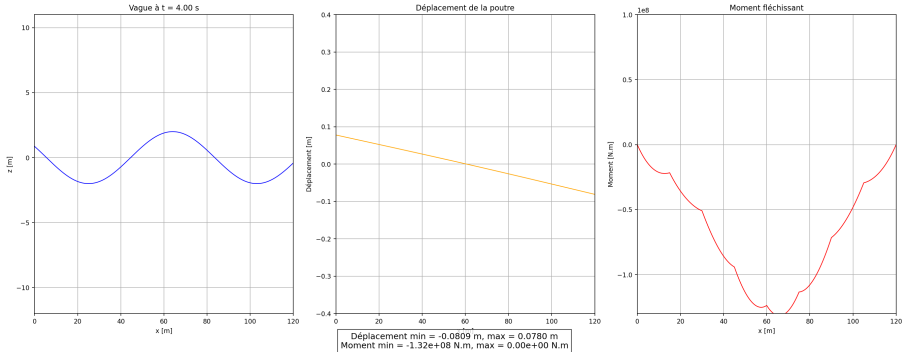
2. Résultats

L'entièreté des résultats est disponible en Annexe, section 4.6.3, Figure 4.12.

Les vagues ont pour effet de faire tanguer la structure entre -0,5 m et 0,5 m par rapport à l'état d'origine pour un moment fléchissant au sein de la structure qui est constamment soumise à des moments négatifs (avec un maximum de $-2 \cdot 10^8 MPa$) (Figure 2.17).



(a) Poutre à t=2s



(b) Poutre à t=4s

Figure 2.21 – Poutre en béton allégé sur vague de 4m

2.4.4.3 Modélisation numérique de la poutre sur vague extrême

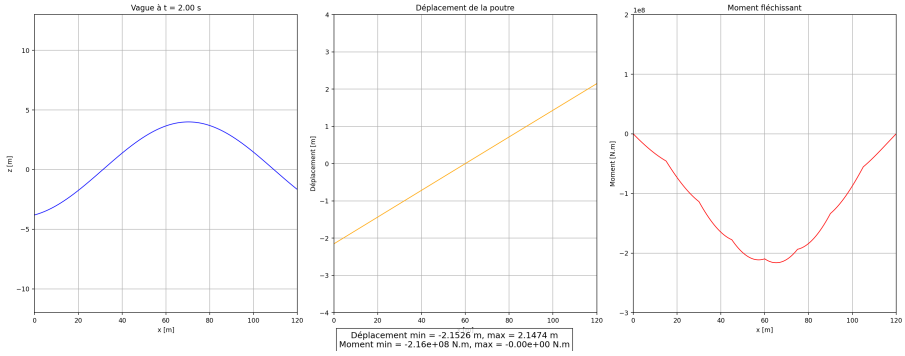
1. Méthode

La procédure utilisée est similaire à celle employée pour toutes les représentations de vagues en amont mais avec une hauteur de 8 m.

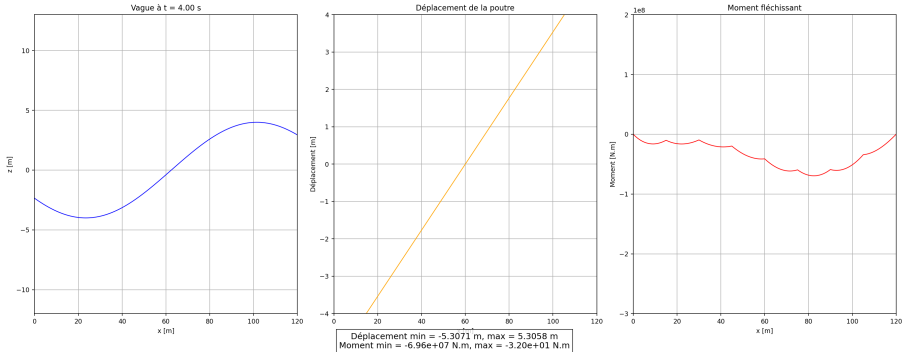
2. Résultats

L'entièreté des résultats se trouve en Annexe, section 4.6.3, Figure 4.13.

En conditions de vagues de 8 m, l'effet des vagues est bien plus important, provoquant un mouvement de basculement allant de -5,3 m à 5,3 m et un moment fléchissant légèrement plus important que pour les vagues de 4 m (Figure 2.22).



(a) Poutre à t=2s



(b) Poutre à t=4s

Figure 2.22 – Poutre en béton allégé sur vague de 8m

2.4.4.4 Avec charge ponctuelle à l'extrémité

1. Méthode

La charge ponctuelle équivalente à 10 conteneurs est insérée à l'extrémité de la plateforme suivant la même méthodologie que pour la section 2.2.

2. Résultats

L'entièreté des résultats se trouve en Annexe, section 4.5.5.1, Figure 4.14.

Tout comme pour l'autre configuration en grillage de poutres, la charge ponctuelle a une influence bien plus importante que sur le caisson. La poutre ne bascule plus vraiment dans le temps, elle reste déséquilibrée par la charge ponctuelle. Elle se comporte de manière très similaire à la section 2.3.4.4

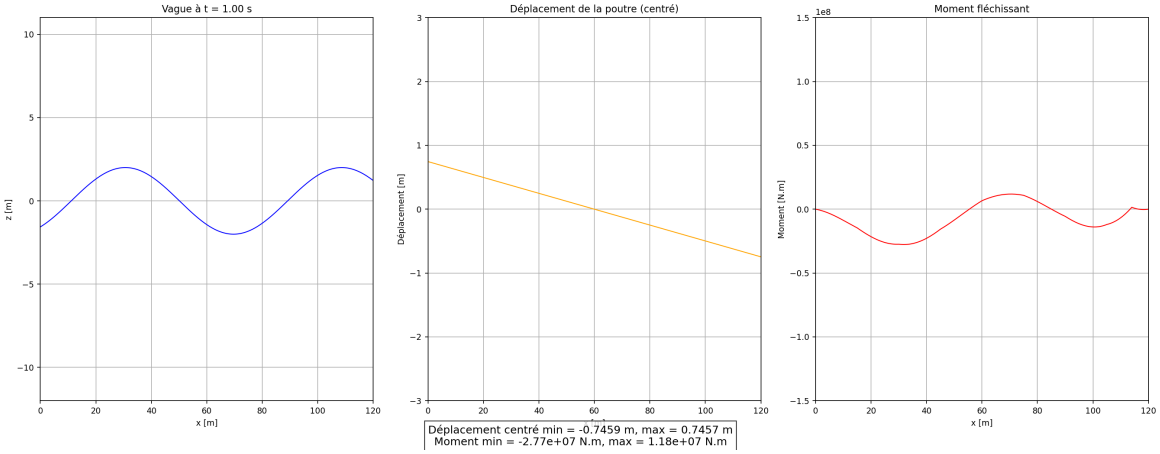


Figure 2.23 – Poutre en béton allégé avec charge ponctuelle en t=1s

2.4.5 Vérification et calcul du Moment de résistance (M_{Rd}) dans la poutre en béton allégé

1. Méthode

Dans cette section, il s'agit de vérifier si la poutre peut bien reprendre les efforts de flexion induits lors des différentes simulations. Les vérifications vont se faire à l'aide d'un code python. L'entièreté du code est en Annexe, section 4.6.4.

a Hypothèses de représentation

La poutre va être représentée comme s'il s'agissait d'une poutre en I ou double T (Figure 2.11). Pour ce faire, l'épaisseur des semelles supérieures et inférieures est la même que celle de la poutre. L'âme centrale de la poutre en double T sera équivalente à la somme des 2 âmes latérales de la poutre.

Une autre particularité fixée dans la section est la position de barres de renforcement dans la semelle supérieure et semelle inférieure. En effet, la structure étant soumise à des moments positifs et négatifs, il est primordial de mettre en partie haute et en partie basse de la section.

b Propriétés des matériaux

Les grandes propriétés sont fixées avec notamment le module de Young de l'acier (E_s) et la résistance caractéristique du béton. Dans le cas de la poutre, la résistance caractéristique est posée à 20 MPa.

$$f_{ck} = 20 \text{ MPa}, \qquad f_{cm} = f_{ck} + 8,$$
$$E_b = 22\,000 \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \text{ MPa}, \quad f_{ctm} = 0{,}33\sqrt{f_{cm}} \text{ MPa},$$
$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}, \qquad E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa},$$

c Géométrie de la poutre en I

Ensuite sont également fixées les propriété de la géométrie de la poutre avec les épaisseurs des âmes et semelles :

$$h = 2,9 \cdot 10^4 \text{ mm}, \quad b_f = 7\,000 \text{ mm},$$
$$t_f = 350 \text{ mm}, \qquad t_w = 700 \text{ mm},$$
$$L = 1,2 \cdot 10^5 \text{ mm}.$$

d Section efficace et inertie

Dans cette partie sont calculées la section efficace de béton et l'inertie.

Les calculs sont détaillés en Annexe, section 4.6.4.

e Ferraillage

Dans cette partie sont fixées la couche d'enrobage et le diamètre des barres, le nombre de barres et l'aire d'acier de renforcement.

$$e = 50 \text{ mm} \quad \text{enrobage},$$
$$\phi = 25 \text{ mm} \quad \text{barres principales},$$

Section des barres :

$$A_{\text{barre}} = \pi\left(\frac{\phi}{2}\right)^2, \quad A_{s_i} = n_i\, A_{\text{barre}}, \quad n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 40.$$

f Moments appliqué

Le moment appliqué est le moment de flexion le plus élevé sorti des différentes simulations réalisées.

$$M_{Ed,\text{ELU}} = 2{,}24 \cdot 10^8 \text{ N m} = 2{,}24 \cdot 10^{11} \text{ N mm}.$$

g Définition de la fonction $N(x)$

Les calculs sont détaillés en Annexe, section 4.6.4. Un processus itératif est mis en place afin de chercher x tel que la résultante des efforts d'armatures et de compression du béton soit nulle :

$$N(x) \;=\; \sum_{i=1}^{4} F_i \;-\; F_c(x) \;=\; 0, \quad \text{Résultante} \tag{2.53}$$

h Recherche de la racine

Recherche de la racine sur l'intervalle $[\,10,\; h-10\,]$ pour résoudre $N(x)=0$ et obtenir x_{sol}.
$x_{sol} = 175,12 \;\; mm$

i Calculs finaux

Les calculs sont détaillés en Annexe section 4.6.4
Avec $x = x_{\text{sol}}$:

$$D_i = \text{distance au point d'application de la force } i,$$

$$M_{Rd} = \sum_{i=1}^{4} F_i\, D_i \;-\; F_c\big(h - y_{c,\text{bton}}\big), \quad \text{Moment de résistance} \tag{2.54}$$

$$\text{Ratio} = \frac{M_{Rd}}{M_{Ed,\text{ELU}}} = |2,53|, \quad \text{Ration moment résistant/moment sollicitant} \tag{2.55}$$

$$N_{\text{final}} = \sum_{i=1}^{4} F_i \;-\; F_c = -7,45 \cdot 10^{-9} N, \quad \text{Résultante finale} \tag{2.56}$$

$$\rho_{min} = \frac{4 \cdot A_{s_i}}{A_n} = 0,3\% > 0,2\%, \quad \text{Ratio aire armatures sur aire béton} \tag{2.57}$$

2. Résultats

La poutre résiste aux efforts internes qu'elle subit, avec un ratio du moment résistant sur le moment interne assez faible, ce qui traduit une bonne optimisation.

2.5 Organisation des villes

À la suite d'une attention approfondie portée à la structure générale, cette analyse s'attache à examiner le fonctionnement potentiel d'une ville flottante située en mer du Nord. L'objectif est de comprendre les principes organisationnels qui pourraient guider son développement, en tenant compte notamment des conditions maritimes, du degré d'autonomie envisageable ainsi que de la relation entre forme urbaine et environnement aquatique.

2.5.1 Analyse de la forme de la ville et sa taille

Cette section évalue la forme et la taille d'une ville flottante principalement selon un critère spécifique : sa relation à l'eau. Cela inclut l'exposition aux conditions maritimes extérieures (mer agitée) et la présence éventuelle d'une mer intérieure plus protégée.

1. Méthode

Sur la base des documents produits par Oceanix, les modèles urbains de villes de 10 000 et 60 000 habitants ont été reproduits. À ces modèles s'ajoute une proposition conceptuelle pour une ville d'un million d'habitants, élaborée selon le même principe : une mer intérieure centrale protégée, existante à différentes échelles (voir Figures 2.24 (a), (b) et (c)).

Ces schémas permettent d'estimer l'emprise spatiale de chaque ville sur la surface marine (y compris les plateformes bâties et les étendues d'eau internes) :

— **Ville de 10 000 habitants** : rayon de 600 m, soit une superficie approximative de 1,13 km^2, correspondant à une densité de 8 850 hab./km^2.

— **Ville de 60 000 habitants** : rayon de 1 800 m, soit une superficie de 10,18 km^2, pour une densité de 5 893 hab./km^2.

— **Ville d'un million d'habitants** : rayon de 3 000 m, soit une superficie de 28,27 km^2, pour une densité de 35 373 hab./km^2.

Parallèlement, plusieurs configurations urbaines à base de modules carrés ont été étudiées (voir Figures 2.24 (d), (e), (f) et (g)), s'appuyant sur une trame orthogonale assimilable à une structure en grillage de poutres.

Les zones périphériques de la ville étant directement exposées aux éléments marins (vents forts, vagues), il était essentiel d'évaluer la proportion de cette exposition par rapport à la surface protégée. Cette évaluation présente une importance particulière dans le cadre de l'objectif de maximiser le lien avec l'eau, un critère de qualité fondamental pour toute ville flottante (section 1.7.2).

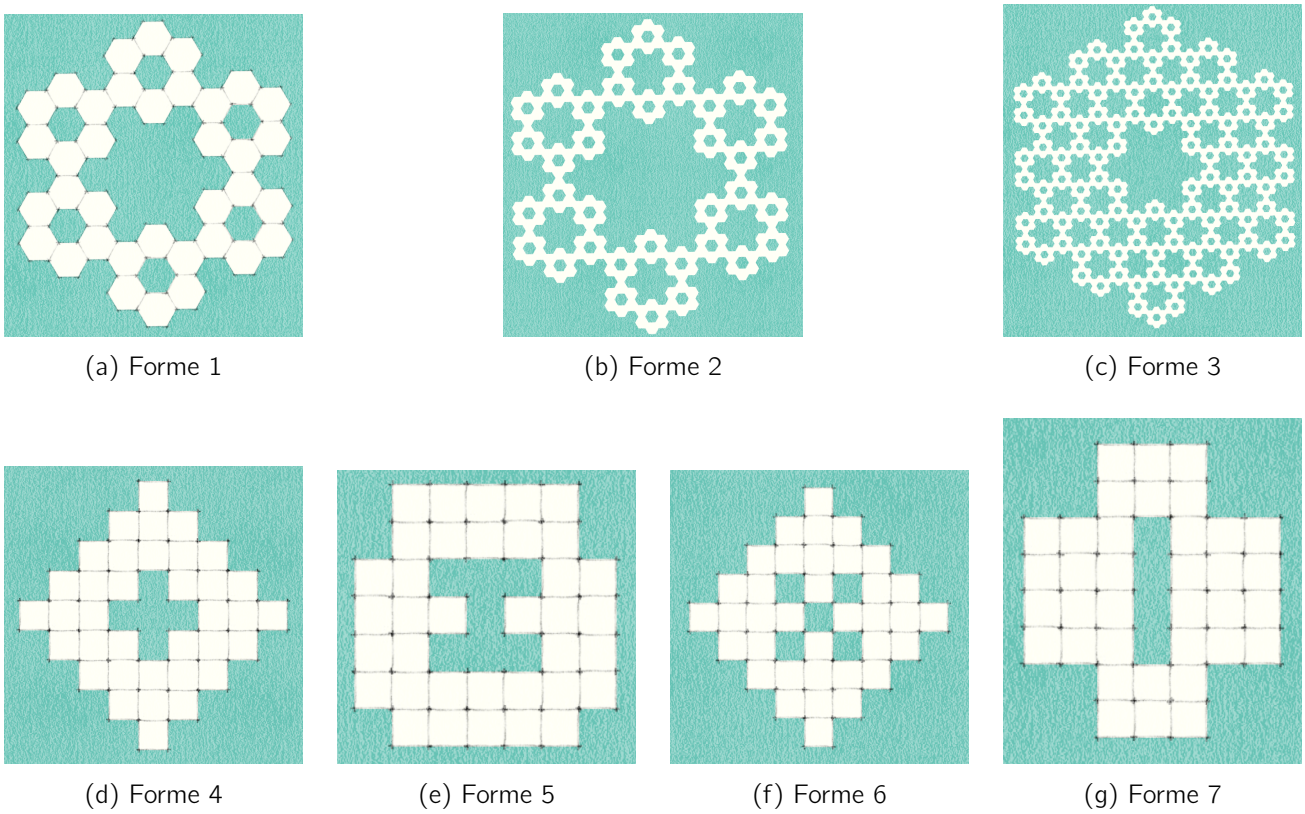
Ainsi, les périmètres externe (exposé à la mer ouverte) et interne (bordant la mer intérieure) ont été mesurés. À partir de ces données, un ratio de vues sur mer intérieure et extérieure a pu être établi, servant d'indicateur comparatif entre les différentes morphologies urbaines envisagées.

2. Résultats

Les résultats de l'analyse démontrent que la disposition basée sur des plateformes hexagonales offre un rapport à l'eau supérieur (environ 1,8%) à l'échelle d'une ville de 10 000 habitants, comparativement à une configuration en grille carrée. Cette performance s'explique par la plus grande facilité à créer des

Tableau 2.7 – Étude des vues sur l'eau

Forme de plateforme	Capacité [habitants]	Périmètre sur mer extérieure $\times 10^3$ [m]	Périmètre sur mer interne $\times 10^3$ [m]	Périmètre total sur mer $\times 10^3$ [m]	Ratio mer extérieure sur périmètre total [%]	Ratio mer interne sur périmètre total [%]	Superficie totale plateforme $\times 10^5 [m^2]$	Ratio périmètre externe - superficie ville [%]	Ratio périmètre interne - superficie ville [%]	Ratio périmètre total - superficie ville [%]
1	10 000	4,95	4,95	9,9	50	50	5,261	0,94	0,94	1,88
2	60 000	19,35	39,15	58,5	33	67	315,2	0,61	1,24	1,85
3	1 000 000	33,75	139	172,8	20	80	94,69	0,35	1,47	1,82
4	10 000	4,32	1,44	5,76	75	25	5,184	0,83	0.28	1,11
5	10 000	3,36	1,92	5,28	63	36	5,184	0,64	0.37	1
6	10 000	4,32	2,4	6,72	64	36	5,184	0,83	0.46	1,29
7	10 000	3,6	1,2	4,8	75	25	5,184	0,69	0.23	0,92



(a) Forme 1 (b) Forme 2 (c) Forme 3

(d) Forme 4 (e) Forme 5 (f) Forme 6 (g) Forme 7

Figure 2.24 – Forme des villes

étendues d'eau internes au sein d'un maillage hexagonal, lesquelles renforcent à la fois l'esthétique urbaine et la qualité des espaces publics.

À mesure que l'échelle de la ville augmente, le ratio entre les surfaces en contact avec l'eau et la superficie totale reste relativement stable, avoisinant les 2 %. Toutefois, la proportion d'eaux internes par rapport aux eaux périphériques augmente significativement. Cette évolution tend à rendre les configurations urbaines de grande taille relativement moins vulnérables aux agressions marines externes, tout en favorisant une plus grande qualité paysagère et environnementale.

En ce qui concerne la densité de population, les valeurs observées restent parfaitement plausibles d'un point de vue urbain. À l'échelle de 10 000 habitants, la densité (env. 8 850 hab./km^2) se situe entre celle de la ville de Liège (2 852 hab./km^2) et celle de la commune la plus densément peuplée de la Région de Bruxelles-Capitale, Saint-Josse-ten-Noode (23 172 hab./km^2) (Statbel, 2024). Pour une ville d'un million d'habitants, la densité s'approche de celle de Barcelone (41 417 hab./km^2). Cependant, la majeure partie des espaces libres de cette ville flottante ne serait pas des parcs verts, mais des étendues d'eau. Les espaces publics de ces villes doivent donc être complètement repensés avec l'eau en part intégrante et chercher des manières de se l'approprier, à travers notamment des infrastructures flottantes, des quais, ou encore des dispositifs de baignade et de navigation douce.

Enfin, ces configurations maritimes constituent également une plus-value écologique notable. Comme évoqué dans le critère écologie de la section 1.7.2, il est essentiel de limiter l'emprise au sol des plateformes afin de préserver la pénétration lumineuse dans l'eau. Des structures urbaines plus étalées, avec des zones d'eau internes, permettent de réduire les zones d'ombre dense, susceptibles de créer des "zones mortes" marines. En revanche, une organisation plus diffuse favorise l'émergence d'écosystèmes sous-marins en offrant un compromis optimal entre urbanisation et préservation des milieux aquatiques.

2.5.2 Implantation des villes flottantes

L'objectif de cette étude est d'identifier les emplacements potentiels pour l'implantation d'une ville flottante de 10 000 habitants (ainsi que pour des scénarios élargis à 60 000 et 1 000 000 d'habitants) au large de la côte belge. Cette recherche s'inscrit dans une logique de planification territoriale, intégrant les contraintes physiques du milieu marin.

Pour ce faire, une analyse de la bathymétrie de la mer du Nord a été conduite, avec pour objectif de localiser les zones présentant une profondeur d'eau adéquate pour accueillir de telles infrastructures, tout en restant à une distance raisonnable du littoral afin de garantir la connectivité logistique, énergétique et sociale avec la terre ferme.

La méthodologie repose initialement sur un cas d'étude utilisant une profondeur seuil de 15 mètres, choisie pour sa pertinence économique dans le contexte de plateformes flottantes. Cette méthode a ensuite été généralisée à d'autres scénarios avec des profondeurs limites de 20, 30 et 50 mètres, afin d'évaluer la sensibilité de l'implantation à la variation de ce paramètre critique.

1. Méthode

Partie réalisée à l'aide d'un code Python.

1. **Lecture des données bathymétriques et cartographiques**
   Sont utilisés : un fichier CSV contenant des mesures de profondeur de l'eau (bathymétrie) issues de European Commission (s.d.), et un fichier GeoJSON pour superposer les contours géographiques de la Belgique issus d'Open Street Map.

   Le fichier CSV comprend des points définis par une latitude et une longitude, auxquels est associée une profondeur marine. Lorsque le point se trouve sur une partie terrestre, le relief n'est plus pris en compte et la profondeur vaut zéro.

2. **Visualisation des profondeurs**
   Une carte est générée pour représenter les points de mesure, en utilisant un code couleur :

   - **Orange** : zones où les fonds marins vont sont plus bas que 15 mètres. Cela reprend tous les points dont la profondeur va au-delà des 15 m de profondeur.
   - **Noir** : zones où la profondeur est comprise entre 15 m (compris) et 0 mètre (non inclus car il s'agit de la terre).
   - **Blanc** : zones aux données manquantes (0) correspondant à la terre ferme.

   La limite de profondeur fixée est de 15 m car il est ressorti de la section 1.2.2 que c'est à partir de cette profondeur que construire flottant peut devenir intéressant financièrement.

3. **Détection de la côte belge**
   Afin de cibler l'implantation potentielle de villes flottantes le long de la côte belge, il est essentiel de définir avec précision la ligne côtière de référence. Cette étape permet de mesurer la distance entre la côte et les zones marines présentant des profondeurs intéressantes pour ce type de projet. Dans ce contexte, les points dépourvus de données bathymétriques, situés entre les latitudes 51.2°N et 51.4°N et les longitudes 2.5°E et 3.5°E, sont considérés comme correspondant à la côte belge. Cette définition permet de localiser une ligne de référence claire à partir de laquelle les distances vers les zones maritimes visées seront calculées.

4. **Modélisation d'une ville flottante**
   La modélisation d'une ville flottante se fera comme un cercle de rayon égal à :

   - 600 m pour une ville de 10 000 habitants
   - 1800 m pour une ville de 60 000 habitants
   - 3000 m pour une ville d'un million d'habitants

   Voir section 2.5.1.

5. **Conditions de placement**
   Pour qu'une ville soit considérée comme "plaçable", plusieurs contraintes à satisfaire ont été fixées :
   - Être entièrement (à 95% minimum) située dans une zone où la profondeur de l'eau est supérieure à 15 m de profondeur. Une condition permettant de s'assurer de rester dans des conditions financières favorables aux villes flottantes tout en acceptant quelques zones ponctuellement moins profondes dues à des bancs de sable ou autre.
   - Se situer dans une zone géographique comprise entre Dunkerque et Zeebruges. Cela permet de cibler la recherche à l'application belge. Il s'agit de la même zone qu'utilisée pour déterminer la ligne de côte.
   - Être à moins de 25 km des côtes belges (distance correspondant approximativement à la limite des eaux territoriales belges).
   - Être à une distance minimale de 3 km des autres villes potentielles pour éviter les chevauchements. Pour arriver à cela, à chaque nouveau cercle validé, une zone de 3km autour de son centre est ajoutée et chaque nouvel emplacement potentiel chevauchant cette zone est annulé, et c'est le point suivant qui est évalué et ainsi de suite jusqu'à avoir évalué tous les candidats.
6. **Sélection aléatoire contrôlée**
   Un ensemble de candidats potentiels est tiré aléatoirement parmi les points en mer remplissant les critères ci-dessus. Les emplacements valides sont sélectionnés de façon à répartir équitablement quelques villes dans la zone.
7. **Tracé des cercles**
   Les emplacements acceptés sont affichés sur la carte sous forme de cercles magenta. Cela permet de visualiser concrètement l'implantation géographique des villes flottantes.
8. **Ajout d'éléments de contexte**
   Les ports et villes (Anvers, Zeebruges, Gand, Bruxelles, etc.) ainsi que les parcs éoliens offshore existants sont ajoutés à la carte pour donner un contexte supplémentaire aux cartes. Les parcs éoliens, étant accessibles en environ 1h30 en moyenne par bateau, permettent ainsi également un point de comparaison (Water-Taxi, s. d.).
9. **Zoom sur la côte belge**
   Un encadrement sur la carte offre un zoom sur une partie de la côte belge, afin d'observer plus précisément la proximité entre les villes flottantes et le littoral.
10. **Calculs de distance**
    Deux distances moyennes sont calculées :
    — La distance moyenne entre chaque point côtier belge et la zone la plus proche d'au moins 15 m de profondeur.
    — La distance moyenne entre chaque ville flottante et la côte belge.

    Ces mesures permettent d'évaluer la faisabilité d'accès et l'ampleur des infrastructures nécessaires (navettes, câbles, etc.).

2. Résultats

Cette approche permet d'identifier objectivement les emplacements marins adaptés à l'installation de villes flottantes au large de la Belgique. En combinant des critères tels que la bathymétrie (profondeur de l'eau), la distance au rivage, et la présence d'infrastructures stratégiques (ports, parcs éoliens offshore), il devient possible d'envisager un développement spatial raisonné de ces infrastructures. Un tel développement est d'autant plus pertinent dans le contexte actuel de montée du niveau des mers et de pression foncière croissante sur les zones urbaines littorales.

L'analyse cartographique révèle qu'une profondeur de 15 m est atteinte, en moyenne, à une distance de 12,41 km des côtes belges. Cette valeur constitue un seuil théorique à partir duquel la construction de

structures flottantes devient envisageable. Sur cette base, les distances minimales à la côte pour implanter les différentes échelles de villes seraient approximativement :

- **Ville de 10 000 habitants** : 14,43 km (Figure 2.25)
- **Ville de 60 000 habitants** : 16,95 km (Figure 2.26)
- **Ville d'un million d'habitants** : 18,58 km (Figure 2.27)

Cependant, si le tirant d'eau des structures dépasse les 15 mètres, une implantation plus éloignée devient nécessaire.

Implantation avec caissons en béton

Dans le cas de structures sur caissons en béton, un tirant d'eau de 15 m combiné à un enfoncement potentiel supplémentaire de 4,9 m en période de forte houle implique une profondeur minimale de 20 m pour garantir la flottabilité et la stabilité. Or cette profondeur est atteinte, en moyenne, à une distance de 18 km des côtes.

Les distances spécifiques estimées sont les suivantes :

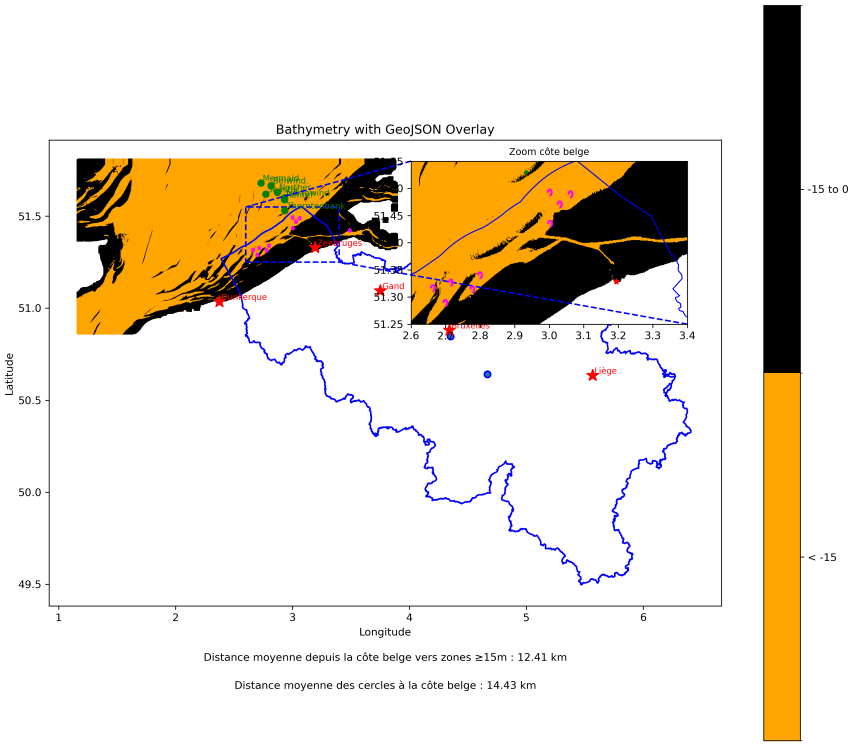
- Ville de 10 000 habitants : 17 km. Cette valeur inférieure à la moyenne s'explique par la taille réduite de la structure, permettant son insertion dans des interstices entre bancs de sable (Figure 2.25, b).
- Ville de 60 000 habitants : 18,5 km (Figure 2.26, b).
- Ville d'un million d'habitants : 21,13 km (Figure 2.27, b).

Implantation avec structures en grillage de poutres

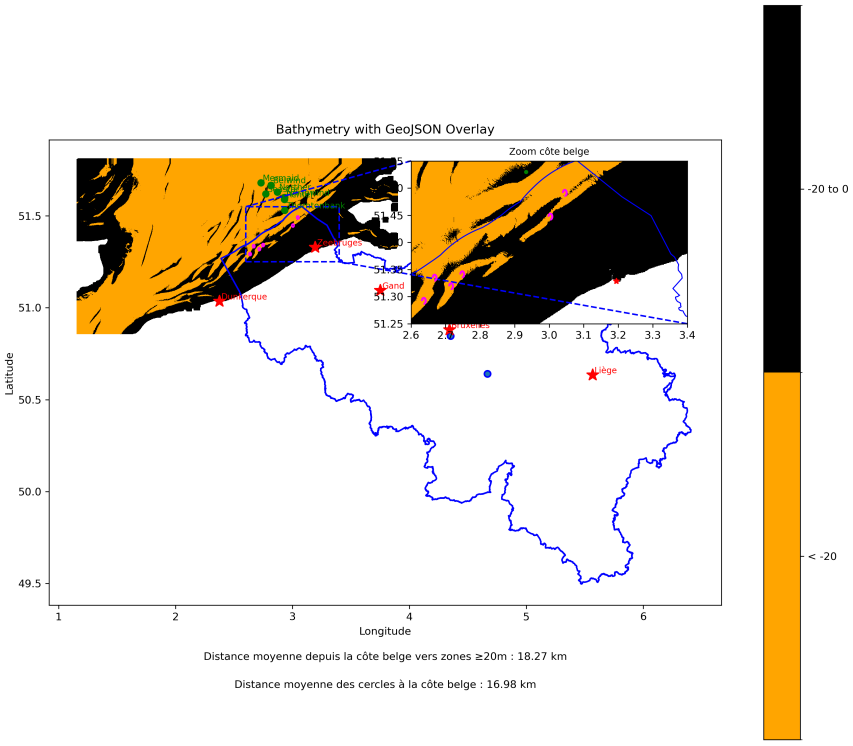
Les structures à grillage de poutres présentent un tirant d'eau nettement supérieur, estimé à 21 m pour des versions en béton allégé, et jusqu'à 44 m pour des versions en béton traditionnel. Dès lors, les profondeurs requises sont respectivement de 30 m et 50 m.

Or, la mer du Nord étant peu profonde, ces conditions bathymétriques imposent une implantation bien plus éloignée du littoral. Les cartes (Figures 2.28, a et b) montrent clairement que :

- Les zones atteignant 30 m de profondeur se situent, en moyenne, à 22,5 km des côtes, au-delà des eaux territoriales belges (limite fixée à 22,2 km). Cela signifie que l'implantation de structures à grillage de poutres en béton allégé serait juridiquement et techniquement plus complexe.
- Une implantation avec poutres en béton classique (profondeur requise : 50 m) serait quasiment irréalisable. Une seule zone répondant à ces critères existe, et elle se situe à 33 km des côtes, rendant tout projet de ce type extrêmement difficile, voire impossible, dans le contexte de la mer du Nord.

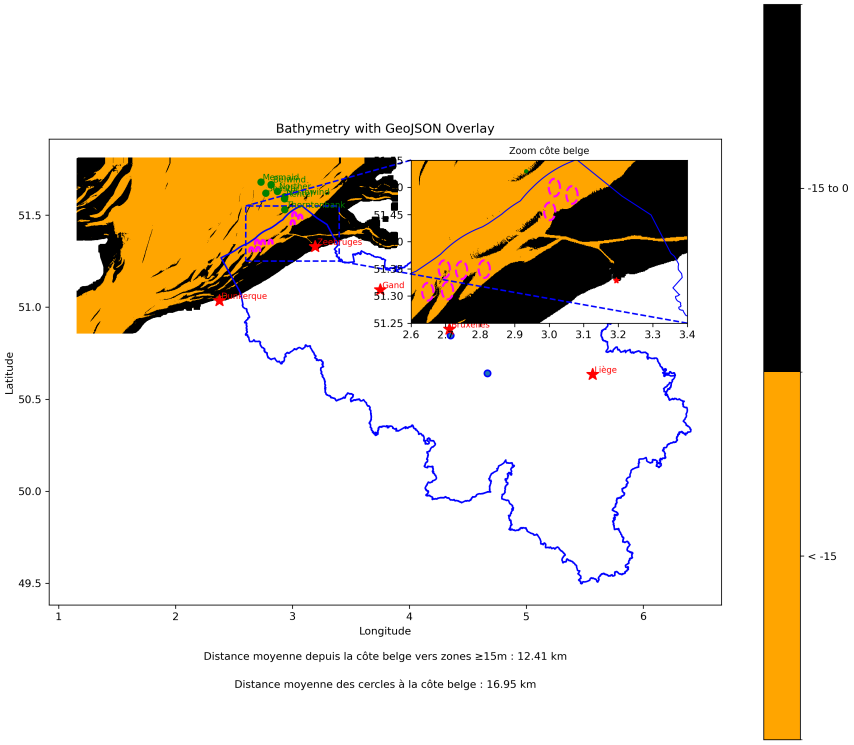


(a) Villes de 10 000 habitants en profondeur de 15 m

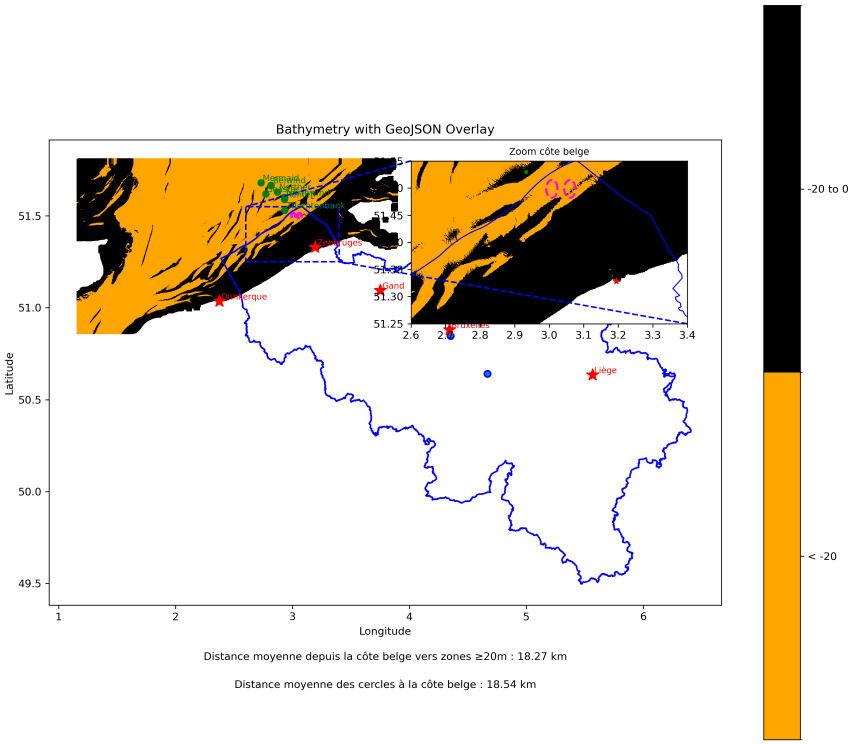


(b) Villes de 10 000 habitants en profondeur de 20 m

Figure 2.25 – Villes de 10 000 habitants

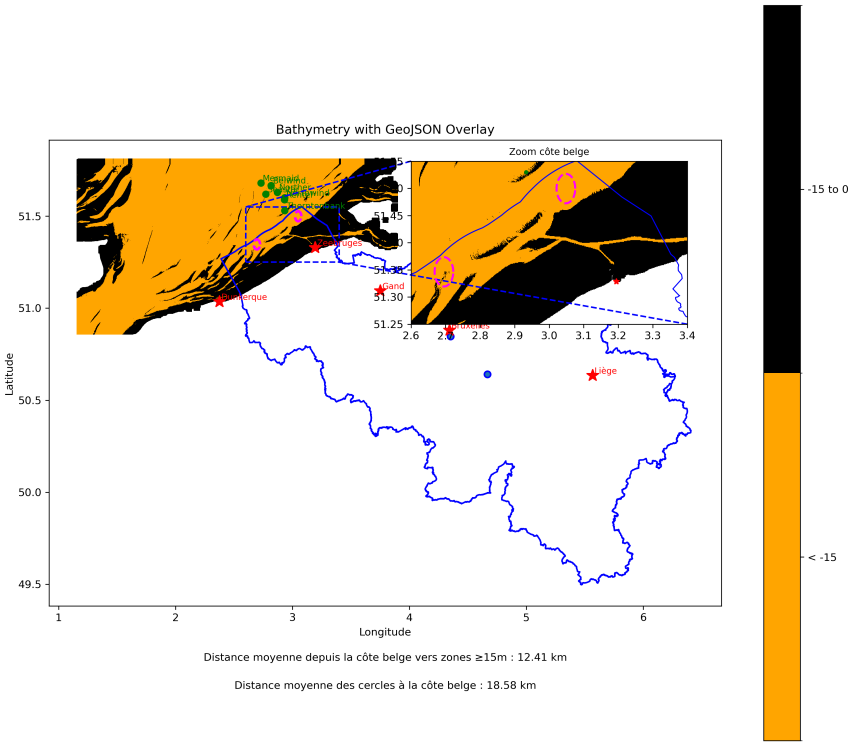


(a) Villes de 60 000 habitants en profondeur de 15 m

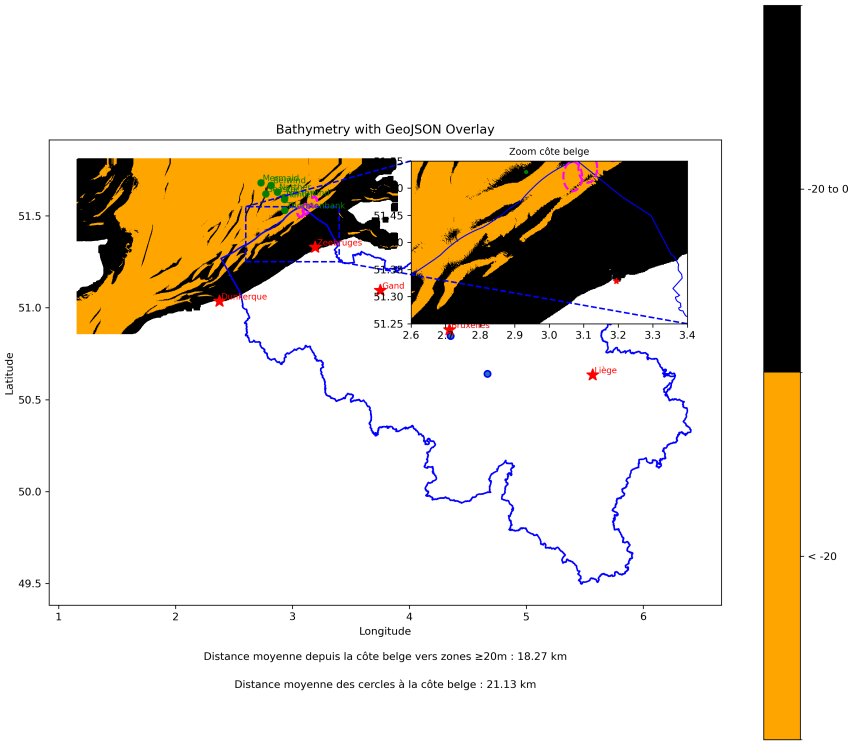


(b) Villes de 60 000 habitants en profondeur de 20 m

Figure 2.26 – Villes de 60 000 habitants

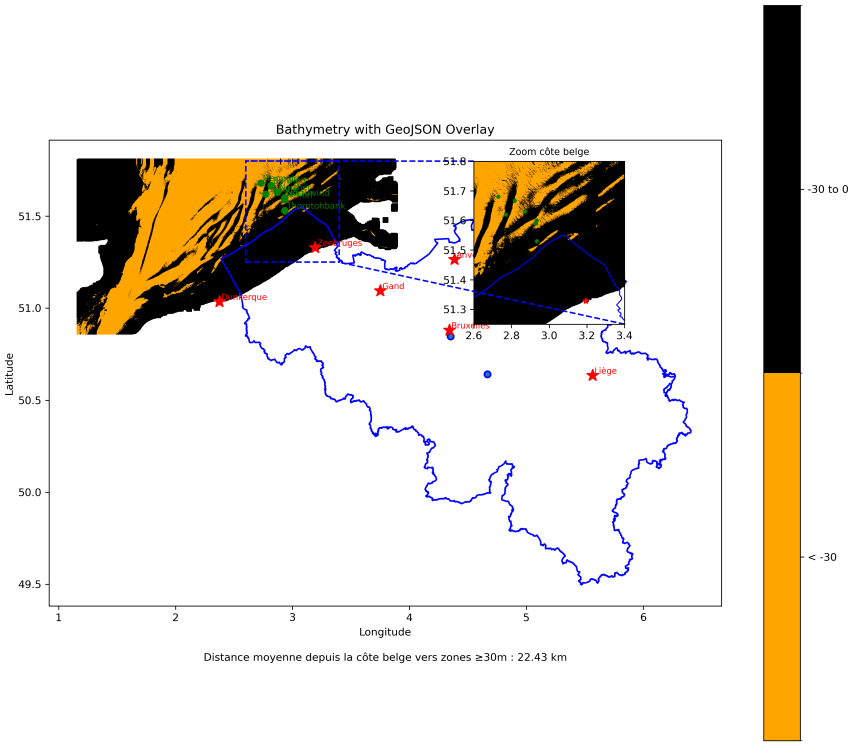


(a) Villes de 1 000 000 habitants en profondeur de 15 m

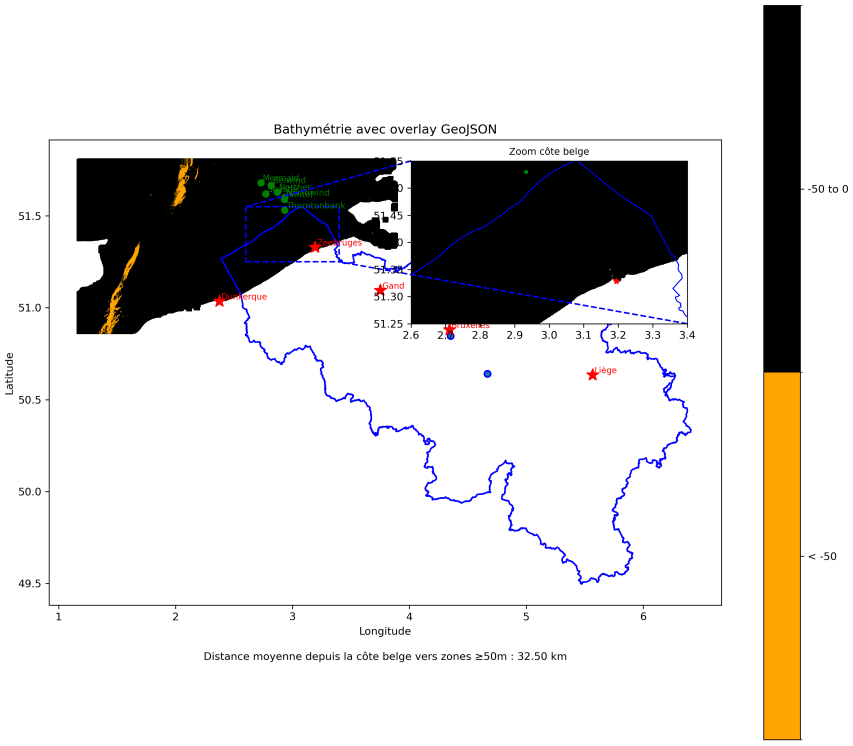


(b) Villes de 1 000 000 habitants en profondeur de 20 m

Figure 2.27 – Villes de 1 000 000 habitants



(a) Profondeur de 30 m



(b) Profondeur de 50 m

Figure 2.28 – Villes pour les structures grillage de poutres : béton alléger et béton

2.5.3 Mobilité

1. Méthode

Cette section vise à établir quelle pourrait être l'importance et la plus-value d'un réseau de navettes maritimes interne à la ville. Il va y être étudiée la zone pouvant être desservie par une navette en 15 minutes.

Pour améliorer la mobilité intra-urbaine, une solution envisageable consiste à déployer un service de navettes fluviales, à l'instar de certaines grandes métropoles françaises.

Définition de la zone de mobilité à 15 minutes

Pour établir la zone maximale reliable en 15 minutes, une analyse des vitesses des navettes existantes au sein des villes a été réalisée et, à partir de la moyenne de celles-ci, une distance concentrique a pu être établie en évaluant la distance parcourue en 15 minutes à cette vitesse.

Les études montrent que, selon le type de plan d'eau, la vitesse de ces navettes varie entre 6 km/h et 12 km/h (Fournier, 2020 ; Razemon *et al.*, 2024).

Dans le cas de la ville de Lyon, l'investissement nécessaire pour aménager les infrastructures fluviales est estimé à :

— 7–9 M€ pour la liaison sur la Saône,

— 5 M€ pour la liaison sur le Rhône

(Fournier, 2020).

L'acquisition des navettes, en elle-même, représenterait, quant à elle :

— 7,2 M€ pour huit navettes desservant la Saône,

— 5,4 M€ pour six navettes desservant le Rhône

(Fournier, 2020). Ces montants restent bien inférieurs aux coûts de réalisation d'autres modes de transport ferroviaire : 120–150 M€/km pour un métro et environ 25 M€/km pour un tramway (Fournier, 2020). Afin de mieux se représenter l'impacte sur les habitants, le tarif d'application des Batobus parisiens est fixé à 23 € par trajet (Razemon *et al.*, 2024).

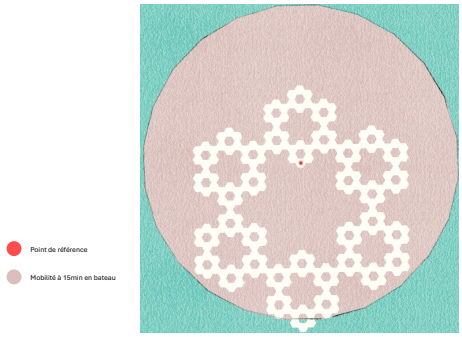
En partant de ces informations il est possible d'établir une zone accessible en 15 minutes par bateau à partir de la zone de centre ville. Sachant que la mobilité par bateau se ferait tantôt par des grandes étendues d'eau centrales aux plateformes, et tantôt des canaux plus étroits, il serait intéressant de prendre une vitesse moyenne théorique de 9km/h — valeur intermédiaire entre 6 km/h et 12 km/h. En posant

$$t = 15 \text{ min} = 0{,}25 \text{ h},$$

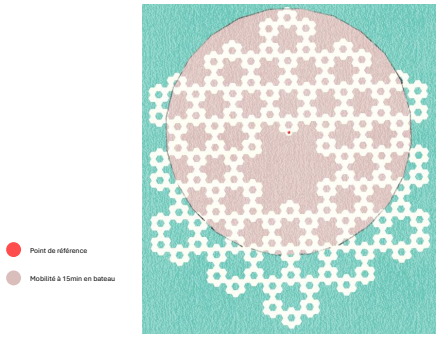
la distance maximale parcourue est

$$d = v \cdot t = 9 \ \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 0{,}25 \text{ h} = 2{,}25 \text{ km}, \quad \text{Rayon zone à 15 min} \tag{2.58}$$

Une zone d'accessibilité de rayon 2,25 km autour du point de référence est obtenue, couvrant à la fois les tronçons de grande largeur d'eau et les canaux plus étroits.



(a) Cercle de mobilité à 15 minutes en bateau dans la ville de 60 000 personnes



(b) Cercle de mobilité à 15 minutes en bateau dans la ville de 1 000 000 d'habitants

Figure 2.29 – Mobilité en bateau au sein de la ville

2. Résultats

Cette zone regroupe l'équivalent de 11 modules de 60 000 habitants. Ce qui donne un résultat de 660 000 personnes habitant à 15 minutes d'un point de référence pouvant symboliser un centre-ville. Cette estimation fournit un premier aperçu de la desserte spatiale offerte par le service de navettes.

Afin d'avoir un point de comparaison, à Liège, ce sont approximativement 195 800 habitants présents dans l'agglomération liégeoise (Liège centre, Seraing, Herstal, Saint-Nicolas, Flémalle et Ans) estimée à environ 15 minutes du centre ville accessible en bus, train ou voiture (Citypopulation, 2024).

Cette information permet de comprendre le potentiel d'exploiter l'eau comme voie navigable pour la ville avec une capacité de desserte environ 3 fois plus importante que la ville de Liège. Avec un tel potentiel, l'organisation des villes et des centres-villes autour des plans d'eau intérieurs pourrait permettre d'en tirer une certaine plus-value pour créer une ville très bien connectée et basée uniquement sur un réseau de transport en commun dominant. Les moyens de transport individuels étant la mobilité douce piétonne et cyclable ainsi que des barques sans moteur dans les intérieurs d'îlots à plus petite échelle.

2.5.4 Forme des bâtiments

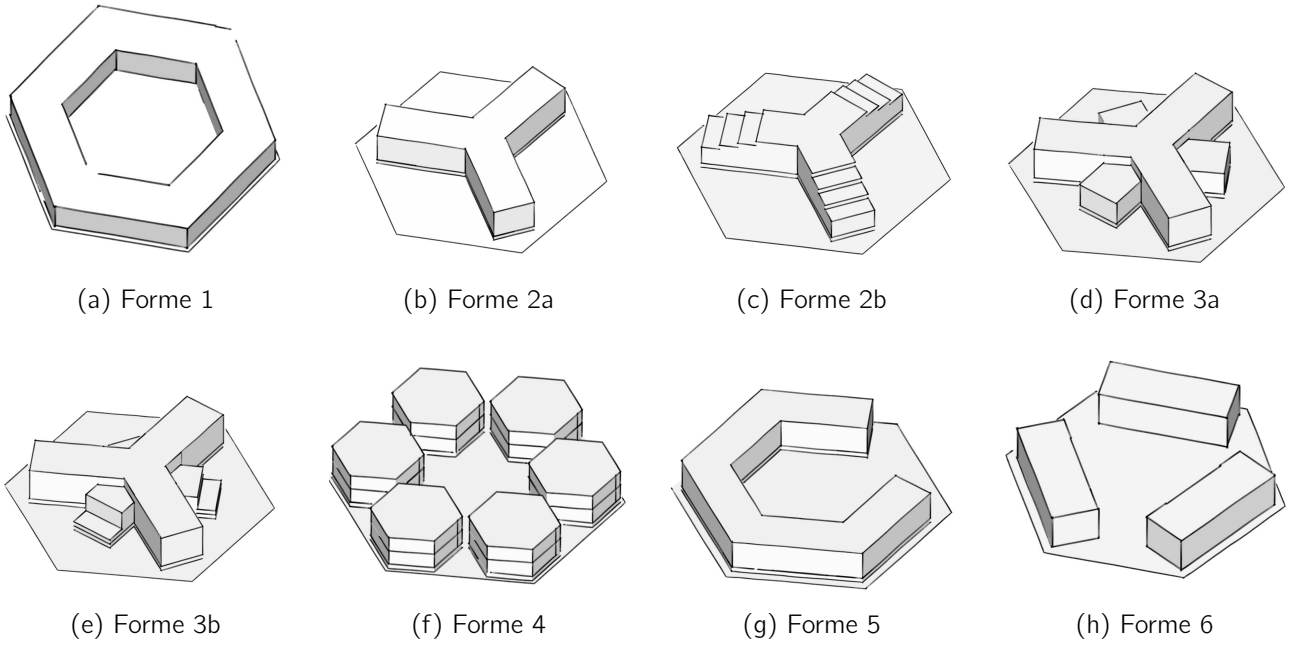
1. Méthode

Un des points importants ressorti de la littérature est qu'il est important de tirer profit en toutes circonstances de l'accès visuel à l'eau. C'est pourquoi, ici, va être étudiée la proportion des vues sur l'eau en fonction des choix de typologies de bâtiment.

Différentes typologies de bâtiments sont dessinées sur une plateforme unique correspondant à la plateforme hexagonale prise comme référence. Cependant, ces typologies peuvent tout à fait être appliquées à une plateforme carrée comme celle constituée par un grillage de poutres. Les valeurs ne seront peut-être pas identiques, mais les résultats ne changeront pas fondamentalement.

Afin de réaliser cette étude, des hypothèses sont posées :

- Tous les bâtiments ont la même largeur, c'est-à-dire 25 m. À l'exception des bâtiments hexagonaux qui ont une profondeur de 40 m.
- L'étude est réalisée comme si les plateformes étaient isolées et complètement entourées d'eau.
- Sont considérées comme vue sur l'eau, pour les parcs, chaque surface permettant un contact visuel de près ou de loin sur l'eau. Il est évident que certaines vues sur l'eau sont plus ouvertes et qualitatives que d'autres cependant, cette distinction n'est pas prise en compte à cette échelle-ci.



(a) Forme 1 (b) Forme 2a (c) Forme 2b (d) Forme 3a

(e) Forme 3b (f) Forme 4 (g) Forme 5 (h) Forme 6

Figure 2.30 – Forme des bâtiments sur les plateformes

Tableau 2.8 – Étude des vues sur l'eau

Forme du bâtiment	Superficie $[m^2]$	Longueur façade avec vue sur l'eau [m]	Vue sur l'eau / superficie totale [1/m]	Longueur totale de façade [m]	Vue sur l'eau / longueur façade [%]	Espace public avec vue sur l'eau $\cdot 10^3$ $[m^2]$	Espace public $\cdot 10^3$ $[m^2]$	% espace public orienté vers l'eau
1	8 738	436	5	702	62,1	0,886	5,875	15
2	4 229	391	9,25	391	100	10,38	10,38	100
3	6 008	380	6,3	500	76	8,605	8,605	100
4	8 246	550	6,67	820	67	2,701	6,368	42,42
5	6 325	475	7,5	591	80,37	8,288	8,288	57,75
6	5 192	435	8,3	565	77	9,422	9,422	100

2. Résultats

Vues sur l'eau des bâtiments

Parmi les typologies analysées, la forme 2 se distingue très nettement comme étant celle qui offre la meilleure relation visuelle avec l'eau. En effet, l'ensemble des façades bénéficient d'un accès direct à une vue sur mer ou sur une étendue d'eau intérieure. Les formes 3, 5 et 6 présentent également un pourcentage élevé de façades orientées vers l'eau (Figure 2.30 et Tableau 2.8).

Vues mer depuis les espaces publics

Ce critère met également en valeur les formes 2, 3, 5 et 6, qui permettent une visibilité sur l'eau depuis pratiquement tous les espaces publics. Une réserve peut néanmoins être émise concernant la forme 6, dont les performances dépendent fortement des dimensions des blocs bâtis et des interstices laissés entre eux. La plateforme 5 permet une vision sur l'eau depuis presque n'importe quel point, à condition toutefois de s'orienter dans une direction spécifique, ce qui la rend légèrement moins performante que les formes 2 et 3, où la vue est plus immédiate et omniprésente (Figure 2.30 et Tableau 2.8).

À l'inverse, la forme 1 présente une structure très refermée sur elle-même, limitant fortement la vue sur l'eau depuis ses espaces extérieurs.

Attribution de fonctions à ces formes

L'analyse des qualités spatiales et visuelles de chaque forme permet d'envisager une répartition programmatique adaptée à chaque typologie. Sur une ville flottante, le caractère insulaire impose de maximiser l'animation des rez-de-chaussée. Il est par ailleurs déconseillé d'y implanter des logements, ceux-ci étant exposés à des risques liés aux projections d'eau ou à des épisodes de houle exceptionnelle. Les fonctions actives (commerces, équipements publics, services, etc.) doivent donc y être privilégiées.

Les formes 2 et 3 apparaissent particulièrement bien adaptées à une mixité fonctionnelle verticale, avec des commerces en rez-de-chaussée et des logements en étages. La forme 3 nécessite cependant une attention particulière pour éviter les situations de vis-à-vis. Les toitures pourraient être exploitées pour accueillir des espaces extérieurs en hauteur, tels que des jardins suspendus, des terrasses de café ou encore des crèches avec espaces verts, contribuant à la sécurité et à la qualité de vie en cas de conditions marines extrêmes. De plus, les espaces publics sur ces plateformes ont un bon potentiel, en partie cadrés par du bâti et la possibilité de créer des ambiances différentes d'un espace à l'autre.

La forme 4, par son organisation en structure centrale et son bon potentiel de centralité urbaine, se prête bien à l'implantation de centres commerciaux, d'équipements culturels ou de bureaux. Elle pourrait symboliser une forme de centre-ville flottant, avec une place centrale principale et des petites places ouvertes sur la mer et une dynamique urbaine forte.

Les formes 1 et 5 présentent un caractère plus introspectif, ce qui les rend particulièrement pertinentes pour accueillir des équipements autonomes : établissements scolaires, infrastructures sportives, hôpitaux, centres de recherche ou activités industrielles. La forme 5, cependant, conserve un potentiel d'ouverture suffisant pour accueillir une mixité fonctionnelle : logements, bureaux et commerces autour d'une grande place centrale bien délimitée, susceptible de constituer un véritable cœur de vie communautaire.

2.5.5 Répartition des fonctions au sein de la ville

Dans cette section une première piste de plan masse va être réalisée.

1. Méthode

Il est important d'essayer de récupérer au plus possible les codes qui font que certaines personnes choisissent une vie sur ces territoires insulaires. Ils ont été évoqués dans l'état de l'art, mais les plus importants

sont : le calme mêlé à la convivialité, un cadre de vie privilégié, une vie sociale intergénérationnelle dans un cadre villageois, une proximité lieu de résidence - lieu de travail ainsi qu'une mobilité sans voitures.

- Calme et convivialité :
  Pour cela, il s'agit de bien réfléchir aux associations de fonctions créées. Par définition, ces villes sont beaucoup plus compactes : 8 893 habitants du km^2 (ville de 10 000 personnes) contre 208,69 habitants du km^2 pour l'île d'Yeu, ce qui aura pour effet de créer de potentiels conflits entre une zone sensée être calme et une autre plus active, puisque la densité n'est pas du tout la même. De plus, mettre les habitations sur la couronne extérieure semble ne pas être la meilleure option puisqu'elles pourraient être plus exposées aux éléments extérieurs, comme mentionné dans l'état de l'art et surtout comme observé dans les modélisations des combinaisons de modules rotulés cependant. Mettre les habitations vers l'intérieur du cœur de ville semble être un élément plus facilement réalisable à partir d'une échelle plus grande de villes.
- Vie sociale et cadre villageois :
  Afin d'avoir une convivialité et une vie sociale de qualité, il est important de créer un "centre ville", il pourrait ne pas prendre la même forme que celui des nos villes actuelles mais il doit y avoir une notion de centre ville tout de même dans ces communautés flottantes. Et cette notion doit également être déclinée à différentes échelles ce qui pourrait donner cet aspect villageois. L'idéal serait d'avoir une proximité centre ville principal et habitation avec en même temps les habitations tournées vers un second centre formant une ambiance villageoise. La place des espaces publics sera plus que jamais un élément primordial pour créer des lieux de rassemblement par exemple. Afin de créer des espace dynamique et vivant les Rez de chaussées doivent absolument être des fonctions qui participe à faire vivre un espace public grâce notamment à des rez de chaussées commerciaux.
- Cadre de vie privilégié :
  Il est évident que le cadre privilégié qui se retrouve sur les îles avec leurs paysages grandioses ne pourra pas être reproduit ici. Néanmoins, il est possible de créer un cadre attractif en créant de nombreuses vues sur l'eau et sur la qualité des espaces créés. La proximité de l'eau et la manière de l'exploiter, pourraient justement créer ce cadre privilégié.

  Ce qui permet de donner sa qualité à une ville, ce sont ses espaces publics et ses espaces verts. Sur l'île, par exemple c'est son paysage et sa nature. Ces espaces sont exploités d'une manière ou d'une autre. Par exemple, dans la nature, ce sont des balades ; dans les parcs ce sont des lieux de rencontre etc.

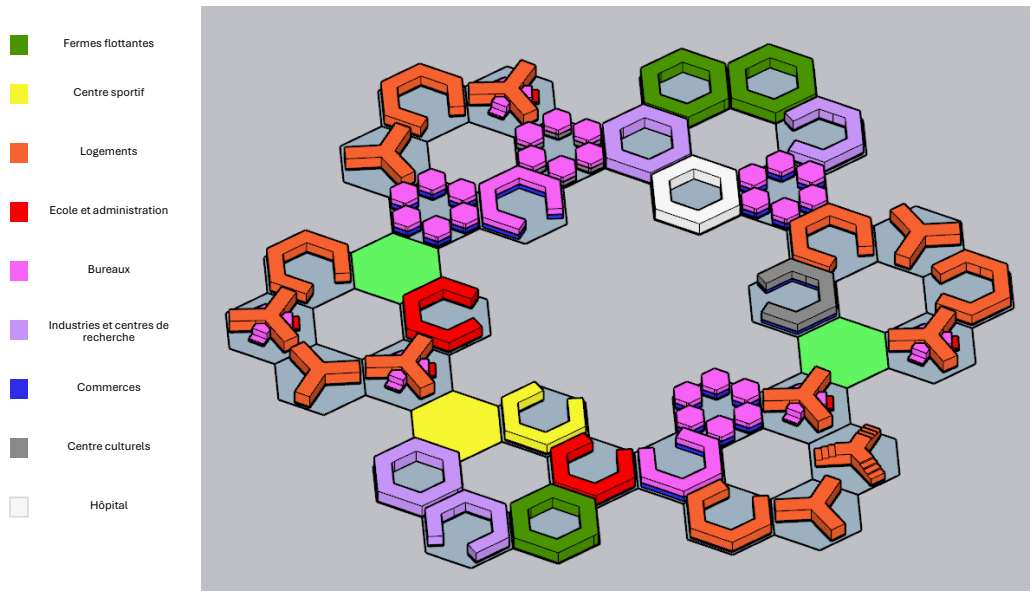
  Les parcs de nos villes terrestres sont les étendues d'eau interne à ces villes. Il serait intéressant de trouver des fonctions et des aménagements capables de tirer profit de ces zones :

  — Des petits jardins, potagers ou petites îles modulables accessibles par barque ou pontons.
  — Des scènes flottantes
  — Réinventer la place du marché sur l'eau
  — Intégrer la nature en essayant de laisser une partie de ce grand espace, parfois perdu, pour faire des refuges pour oiseaux ou poissons
  — des centres sportifs orientés sur les sports nautiques
- Mobilité sans voiture :
  Afin d'avoir une mobilité axée sur la mobilité douce, il serait intéressant de créer des centres-villes autour d'une zone d'eau interne à la ville. Cela permettrait une accessibilité très facile à l'aide de navettes fluviales (qui permettent le déplacement le plus rapide et donc le plus large, si l'on reste sur une ville sans voiture). Si le reste des plateformes est bien réfléchi et pensé autour du principe de ville à 15 minutes par exemple, avec tous les services et fonctions nécessaires à proximité à chaque fois, alors il ne sera pas nécessaire d'avoir beaucoup d'autres modes de transports. Il faudra également hiérarchiser les modes de déplacements.

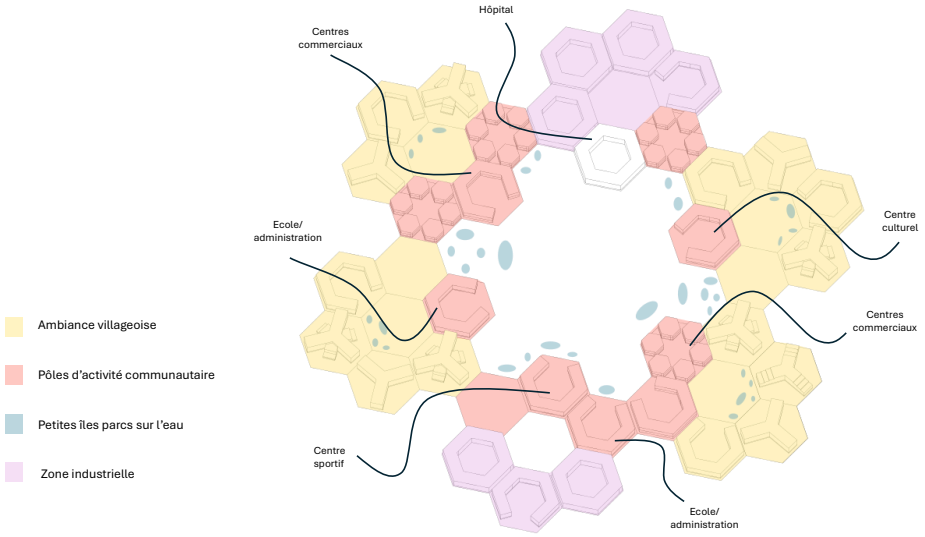
2.5.5.1 2. Résultats

La configuration Figure 2.31 présente une réflexion d'aménagement de ville à 60 000 habitants. L'ensemble fonctionne avec des fonctions dynamiques et attractives orientées vers le cœur de ville avec centres-commerciaux, hôpital, centre culturel, écoles et centres sportifs. Toutes ces fonctions sont axées vers une mobilité maritime avec des associations de fonctions comme écoles et centre sportif, par exemple.

Les zones d'habitations constituent un bloc résidentiel pouvant créer une ambiance de ville où la "place du village" serait l'étendue d'eau. Avec des rez-de-chaussées dynamiques (commerces notamment), ces espaces peuvent incarner une ambiance de village avec déjà les premières nécessités. Cependant, chaque agglomérat résidentiel est à proximité de plateformes commerciales avec des bureaux aux niveaux supérieurs, créant ainsi une proximité de ce qui pourrait être le centre-ville et le lieu de travail. Ces plateformes commerciales sont souvent la jonction entre l'ambiance calme, résidentielle et l'ambiance plus active des industries et fermes urbaines.



(a) Détail des fonctions pour une ville de 10 000 habitants



(b) Ambiances d'une ville de 10 000 habitants

Figure 2.31 – Exemple d'organisation fonctionnelle possible d'une ville de 10 000 habitants (inspiré du profil d'Oceanix)

2.6 Insularité

Dans cette section vont être analysés les capacités autonomes de ces villes flottantes.

2.6.1 Approvisionnement en eau

1. Méthode

En se basant sur les valeurs de précipitation d'Ostende, il est possible de calculer le maximum d'eau de pluie récupérable.

$$14 \cdot 10^4 \cdot 989 = 1,385 \cdot 10^7 \quad L, \quad \text{Litres par plateforme par an} \tag{2.59}$$

$$1,385 \cdot 10^7 \cdot 36 = 4,985 \cdot 10^8 \quad L, \quad \text{Litres récupérés par an sur une ville de 10 000 habitants} \tag{2.60}$$

$$\frac{4,985 \cdot 10^8}{10^4} = 4,985 \cdot 10^4 \quad L, \quad \text{Litres récupérés par an par personne} \tag{2.61}$$

$$\frac{4,985 \cdot 10^4}{365} = 136 \quad L, \quad \text{Litres récupérés par personne par jour} \tag{2.62}$$

2. Résultats

Cette quantité serait la quantité maximale dans la mesure où l'entièreté de la plateforme permettrait de récupérer les eaux de pluies. En partant de cette hypothèse, et sachant qu'un Belge consomme en moyenne 95 litres d'eau domestique par jour, l'eau de pluie récupérée serait suffisante pour cet usage, à condition qu'elle soit filtrée et qu'une partie soit rendue potable (CILE, s.d.).

A contrario, la consommation d'eau est influencée par la culture de la communauté résidente et donc, si les occupants de la ville flottante sont français, cela ne suffirait même plus, car en moyenne un Français consomme 147 litres d'eau par jour (République française, 2023).
Cependant, si la volonté de ces villes est de devenir autonomes, il faudrait prendre en compte tous les besoins en eau indirects, donc nécessaires à l'agriculture, les besoins industriels et autres. En prenant tous ses besoins en compte, le total arrive à 1385 m^3/an ($1,385 \cdot 10^6$ l/an), ce qui correspond à 3795 $l/personne$ par jour. C'est pourquoi le traitement de l'eau par désalinisation sera inévitable, ou alors ce ne sont pas loin de 3700 l/personne chaque jour qui devront être importés (Hoekstra & Mekonnen, 2011).

Impact financier de la production d'eau potable

Sur le plan technique, la désalinisation de l'eau de mer constitue une solution réalisable pour assurer un approvisionnement en eau potable. Toutefois, cette solution soulève des questions économiques non négligeables quant à sa mise en œuvre à grande échelle, notamment dans le cadre d'une ville flottante.

L'investissement initial permettant une capacité de 20 000 litres/jour s'élève à 10 000€ (Hellopro, 2023). Cela signifie que pour 10 000 habitants, il y aura un investissement initial de 19 millions d'euros.

En supposant une durée de vie des installations de 30 ans, l'amortissement du coût d'investissement seul s'élève à environ 0.048 $/m^3$.

Cependant, le coût total de production de l'eau dessalée dépend aussi de l'énergie nécessaire au fonctionnement des systèmes. Ce coût énergétique varie considérablement selon les technologies employées (osmose inverse, distillation multi-effets, etc.), allant de 1€ à 9 $/m^3$ (Hellopro, 2023). Ainsi, le coût global de l'eau dessalée peut se situer entre 1.048 € et 9.048 $/m^3$.

A titre de comparaison, en Belgique, le prix de l'eau de distribution est d'environ 3,15$/m^3$. Ce qui est pratiquement 3 fois moins cher (Société wallonne des eaux, 2025).

2.6.2 Approvisionnement en denrées alimentaires

1. Méthode

Selon l'OMS, la consommation journalière de fruits et légumes devrait être de 400 g par personne (Commandeur, 2024). Cela représente 144 kg par personne par an. Cependant, il s'agit d'une valeur cible ; par exemple, dans la section 1.10.7, la serre urbaine visait à nourrir 200 personnes avec une production annuelle de 12 tonnes (60 kg/personne) pour 1600 m^2 de culture. De la section 1.10.7, il ressort que la capacité de production annuelle est de $7,5 kg/m^2$.

$$C_{prod} \cdot \frac{1,2 \cdot 10^4}{1600}, \quad \text{Capacité de production par } m^2/an \tag{2.63}$$

En partant de ce postulat, il est possible d'établir une fourchette concernant la superficie à réserver à l'agriculture urbaine dans ces villes flottantes.

$$A_{\text{culture}} = \frac{144 \cdot 10000}{7,5} = 1,92 \cdot 10^5 \text{ m}^2, \quad \text{Surface totale à dédier à l'agriculture dans une ville de 10 000 habitants pour 144 kg/personne} \tag{2.64}$$

Cela pourrait représenter une emprise au sol de $2,743 \cdot 10^4 m^2$, pour des bâtiments de 7 niveaux (hauteur également utilisée dans la cité maraîchère présentée section 1.10.7). Cependant, si c'est le scénario avec 60 kg/personne par an qui est étudié, cela représenterait une emprise au sol de $1{,}143 \cdot 10^4 \ m^2$.

2. Résultats

Finalement afin d'être le plus autonome possible en agriculture, il serait nécessaire de dédier entre 1 et 3-4 plateformes à l'usage de l'agriculture pour une ville de 10 000 habitants.

2.6.3 Approvisionnement en énergie

1. Méthode

La consommation énergétique estimée pour ces villes flottantes est de 30 kWh par personne et par jour (communication personnelle, S. Hahn, 13 février 2025). À titre de comparaison, la consommation actuelle en Belgique s'élève à 18,5 kWh par personne et par jour (Wikipedia, 2025). Il est donc possible d'estimer les besoins énergétiques annuels d'une ville flottante de 10 000 habitants.

$$30 \cdot 365 \cdot 10\ 000 \ = \ 1{,}095 \cdot 10^8 \quad \text{kWh}, \quad \text{Consommation annuelle de 10 000 habitants} \tag{2.65}$$

Ces villes étant implantées dans des zones à fort potentiel de développement des énergies renouvelables, la majeure partie de leur approvisionnement énergétique proviendrait de sources telles que l'éolien, le photovoltaïque, et l'énergie houlomotrice (cette dernière n'étant pas quantifiée dans cette section).

En Belgique, le rendement annuel moyen du photovoltaïque est de 200 kWh/m^2. Toutefois, dans des conditions maritimes, la production est en moyenne 13 % plus élevée, ce qui permet d'estimer un rendement de 230 kWh/m^2 (DS New Energy, 2021 ; Solvari, 2025 ; Utrecht University, 2020).

En supposant une surface disponible de 10 000 m^2 de toitures pour l'installation de panneaux photovoltaïques :

$$230 \cdot 10\ 000 \ = \ 2{,}3 \cdot 10^6 \quad \text{kWh}, \quad \text{Production annuelle du photovoltaïque} \tag{2.66}$$

Cela implique que, pour assurer une autonomie énergétique reposant uniquement sur le photovoltaïque, une surface additionnelle de $4{,}66 \cdot 10^5 \ m^2$ de panneaux solaires serait requise.

Le même raisonnement peut être appliqué à l'éolien offshore, dont la puissance nominale est d'environ 7 MW par turbine, ce qui correspond à une production annuelle d'environ 24,53 GWh, en supposant un facteur de capacité de 40 % (Bleoju et al., 2022). Dans ces conditions, pour couvrir l'ensemble des besoins énergétiques d'une ville flottante de 10 000 habitants, le nombre d'éoliennes nécessaires serait :

$$\frac{1{,}095 \cdot 10^8}{24{,}53 \cdot 10^6} = 5 \quad \text{éoliennes}, \quad \text{Nombre d'éoliennes nécessaires} \tag{2.67}$$

2. Résultats

Il apparaît donc qu'une autonomie énergétique complète reposant uniquement sur le photovoltaïque reste difficile à atteindre. En revanche, une autonomie fondée sur l'éolien offshore semble envisageable. Une combinaison de panneaux photovoltaïques installés en toiture et de turbines éoliennes pourrait constituer une solution pertinente, en diversifiant les sources d'approvisionnement.

Cependant, cette approche reste confrontée à une limite fondamentale : la variabilité de la production d'électricité renouvelable. L'ensoleillement et le vent étant des phénomènes intermittents, il est indispensable de prévoir des solutions de secours pour pallier les périodes de faible production. En effet, les besoins énergétiques d'une ville flottante ne peuvent pas être dictés par les seules conditions météorologiques.

Par ailleurs, l'implantation d'éoliennes à proximité immédiate de la ville entraînerait un impact visuel non négligeable. Toutefois, étant donné le nombre relativement réduit d'éoliennes nécessaires, cet impact pourrait être qualifié de ponctuel. Se pose alors la question d'un compromis : faut-il accepter cette altération du paysage, jugée essentielle pour garantir l'autonomie énergétique, ou envisager la délocalisation des installations afin de préserver l'esthétique de l'environnement ?

En conclusion, ces éléments suggèrent la possibilité d'une autonomie énergétique "partielle" fondée sur les énergies renouvelables. Toutefois, cette autonomie resterait conditionnée par un soutien indispensable provenant du réseau continental, capable de garantir un approvisionnement stable, indépendant des fluctuations climatiques.

CHAPITRE 3

DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

3.1 Étude structurelle

3.1.1 Comparaison des systèmes

Rigidité et déplacements statiques

Le grillage de poutres en béton présente la plus grande immersion, tandis que le caisson en béton affiche le plus faible tirant d'eau.

Les trois concepts analysés sont en équilibre de flottaison. Toutefois, le caisson en béton présente un équilibre légèrement plus "fragile", en raison d'une très faible valeur du paramètre métacentrique $\overline{GM}$ (distance entre le centre de gravité et le métacentre), comparativement aux deux autres configurations.

L'ensemble des structures adopte un comportement rigide en eaux calmes, avec des déplacements verticaux négligeables (inférieurs à 1,2 mm) au regard de leur longueur totale (environ 120–130 m).

Le grillage de poutres en béton présente également la plus faible flèche sous l'effet de la charge hydrostatique, tandis que la poutre en béton allégé montre la plus grande déformée (bien que toujours négligeable), ainsi que les plus faibles sollicitations internes en régime statique. À l'inverse, le caisson en béton est soumis aux moments fléchissants les plus élevés.

Comportement dynamique sous houle

L'analyse de la réponse dynamique sous l'action de houles de hauteur significative ($H_s = 4$ m et 8 m) met en évidence des différences notables en termes de tangage et de moments fléchissants.

Le caisson subit des moments très importants ainsi que des mouvements d'amplitude élevée, ce qui peut s'avérer pénalisant en conditions de tempête. Il en va de même pour le grillage constitué de poutres en béton allégé. En revanche, le grillage de poutres en béton traditionnel, caractérisé par des mouvements plus modérés, présente un comportement dynamique plus favorable dans des conditions de mer standard. Ce comportement s'explique notamment par un tirant d'eau plus élevé, rendant la structure moins sensible à l'action des vagues. En effet, la contribution de la force de houle ΔF est proportionnellement plus importante lorsque la hauteur totale de la structure est faible.

Un autre constat intéressant ressort de cette étude : pour chaque configuration avec des vagues de 4 m,

- les déplacements verticaux atteignent un maximum pour $t = 4$ s à 5 s, correspondant aux instants où l'extrémité de la structure se trouve au sommet ou au creux d'une vague ;
- les sollicitations internes maximales surviennent à $t = 2$ s, lorsque le sommet de la vague se situe approximativement au milieu de la structure. Il s'agit du phénomène du hogging arc, comme défini section 1.9.6.

Ces observations mettent en évidence l'influence directe de la houle sur le comportement mécanique global des structures flottantes.

Influence des assemblages

Pour les trois types de structures étudiées, l'utilisation de rotules permet une réduction notable des sollicitations internes, mais cela se fait au détriment du confort structurel et, potentiellement, du comportement dynamique. Les assemblages rigides, bien que plus contraignants du point de vue structurel, offrent une meilleure continuité et cohérence globale du système. Ces observations confirment les résultats

issus de la littérature, mentionnés en section 1.9.3, qui soulignent qu'un assemblage rigide confère une stabilité accrue au détriment de sollicitations internes plus importantes.

Ce qui fait des assemblages rigides le premier choix à envisager, à condition que les connecteurs résistent.

Quantité de matière

Il est également pertinent de comparer les volumes de béton nécessaires pour chacune des trois configurations :

- Le caisson en béton, nécessitant un tirant d'eau de 15 m, requiert un volume total de $5,445 \cdot 10^4$ m^3 de béton.
- Le grillage de poutres en béton, avec un tirant d'eau particulièrement élevé de 44 m, induit un volume total de béton de $1,073 \cdot 10^5$ m^3, soit quasiment le double de celui requis pour le caisson.
- Le grillage de poutres en béton allégé, avec un tirant d'eau de 21 m, nécessite un volume de béton de $6,505 \cdot 10^4$ m^3.

Ainsi, le caisson constitue la solution la plus économique en termes de quantité de matière, suivi par le grillage de poutres en béton allégé, tandis que le grillage de poutres en béton ordinaire est la plus coûteuse en volume. Cette différence s'explique par le fait que le poids propre de la plateforme représente une charge significative par rapport aux charges totales. En raison de la contrainte imposée par le volume immergé nécessaire à la poussée d'Archimède, les dimensions des poutres doivent être fortement augmentées, entraînant un poids propre plus important, formant une boucle en chaîne. Le caisson, en revanche, permet d'obtenir un grand volume immergé pour un poids propre plus faible, ce qui est structurellement plus efficace.

Cette problématique peut être partiellement résolue par l'utilisation de béton allégé, comme observé lors des expérimentations. Une solution complémentaire, parfois mise en œuvre (voir section 1.9.9), consiste à intégrer une dalle en polystyrène expansé sous les poutres. Ce procédé permet d'augmenter significativement le volume immergé tout en diminuant le volume de béton requis.

Un autre aspect lié à la quantité de matière, commun à toutes les configurations, concerne les chaînes d'amarrage. Celles-ci, pouvant dépasser les 300 m de longueur à chaque coin de la plateforme, engendrent des coûts considérables. Ce point a été souligné par Joep Van Der Zanden (voir section 1.9.4 ou section 4.3.1).

3.1.2 Choix de la solution la plus adaptée

En croisant les résultats en statique, en dynamique et l'influence des assemblages et quantité de matière :

- **La poutre en béton allégé** présente des moments internes modérés avec une quantité de matière qui est limitée pour des déplacements sous houle un peu plus importants que les 2 autres systèmes analysés.
- **La poutre en béton** présente des sollicitations plus importantes sous houle mais avec une plus grande stabilité et une énorme quantité de béton (pratiquement le double des 2 autres). En raison de sa géométrie très élancée, elle pourrait poser des problèmes en terme de déversement néanmoins contrebalancés par un réseau dense de poutres.
- **Le caisson** présente un comportement dynamique plus défavorable sous forte houle, comme la poutre en béton allégé, avec des sollicitations internes importantes. Cependant la quantité de béton utilisée reste la plus faible. De plus il s'agit de la structure permettant le plus faible tirant d'eau, un élément important pour la Mer du Nord possédant de faibles profondeur d'eau.

Recommandation : indépendamment de toute contrainte de localisation, profondeur sous marine, pour une infrastructure flottante destinée à l'habitat et aux usages mixtes, le grillage de poutres en béton constitue la solution structurelle qui offrira le meilleur confort aux utilisateurs en raisons de sa plus grande stabilité face aux vagues.

Cependant, lorsque tous les critères sont pris en compte, le caisson en béton reste la solution la plus plausible et qui devrait être privilégiée en raison d'une économie de matière première, un tirant d'eau plus faible permettant un meilleur positionnement en mer du Nord. En effet, il est le seul à pouvoir permettre de construire en mer moins profonde.

Il convient néanmoins de constater qu'un tirant d'eau aussi important remet partiellement en question l'un des avantages fréquemment avancés des villes flottantes, à savoir leur capacité à être remorquées et déplacées aisément. Pour des structures de cette envergure, un tirant d'eau élevé limite considérablement les possibilités de déplacement, en particulier en Mer du Nord, caractérisée par des fonds relativement peu profonds.

Une solution envisageable pour préserver cet avantage opérationnel, notamment lors de la phase d'implantation initiale, consisterait à ne remorquer que le caisson vide, puis à y installer la superstructure sur site. Ce phasage permettrait de faciliter les manœuvres de remorquage en limitant le tirant d'eau au strict minimum pendant le transport, tout en conservant les bénéfices structurels et fonctionnels du système une fois assemblé.

3.2 Organisation et comportement insulaire de la ville

Le caisson en béton, identifié comme le meilleur compromis entre performances structurelles, efficacité économique et compatibilité avec les faibles profondeurs de la mer du Nord, permettrait une implantation à une distance comparable à celle séparant l'île d'Yeu du continent (voir section 1.10.6.1). En effet, il s'agit de la configuration offrant la plus grande facilité d'implantation en mer peu profonde.

Une implantation située aux alentours de 18 km du littoral impliquerait un trajet d'environ une heure en bateau. Cette distance raisonnable pourrait permettre des échanges quotidiens entre la plateforme et le continent, rendant possible aux continentaux de venir travailler sur l'île et inversement, à l'image de certaines îles habitées. Contrairement à l'île d'Yeu (section 1.10.6.1), ces villes flottantes ne seraient probablement pas orientées prioritairement vers le tourisme. Néanmoins, la proximité relative au continent pourrait favoriser des liens économiques réguliers nécessitant une desserte maritime fréquente. Cette dernière serait favorisée par une desserte plus régulière en raison d'un impact des marrés moins important (en mer du Nord) que pour l'île d'Yeu.

Les principaux flux pourraient ainsi être attirés non par des fonctions récréatives classiques, mais par des infrastructures uniques : centres de recherche maritime, industries, installations sportives nautiques ou de loisirs spécifiques. En favorisant une orientation économique active, ces villes flottantes seraient en mesure de stimuler l'attractivité pour les travailleurs, à la différence de l'île d'Yeu, caractérisée par une économie plus modeste et un usage majoritairement résidentiel, entraînant des difficultés d'accès à la main-d'œuvre et freinant le développement.

Afin de favoriser l'émergence d'une communauté dynamique et économiquement viable, l'île flottante devra tirer parti de sa proximité immédiate avec les zones de pêche, de son potentiel en matière de production d'énergies renouvelables (éolienne et houlomotrice), ainsi que du développement d'activités telles que la culture d'algues. Ce positionnement stratégique permettrait de générer des ressources spécifiques, peu accessibles depuis le continent, assurant ainsi à la fois l'attractivité, la pérennité économique et le bon maintien de l'activité sur l'île. Ce type de développement est essentiel pour éviter une marginalisation ou un désintérêt progressif de la part des acteurs continentaux.

Ces cités flottantes visent une autonomie énergétique, alimentaire, et fonctionnelle. Toutefois, à l'image de l'île d'Yeu ou de Belle-Île-en-Mer, qui disposent pourtant d'un certain potentiel agricole, une autonomie complète reste difficile à atteindre. Bien que des solutions techniques existent pour l'approvisionnement en eau douce et en denrées alimentaires, celles-ci demeurent insuffisantes à ce jour. En

particulier, les besoins en matières premières diverses ne peuvent être satisfaits localement.

Par conséquent, une dépendance au continent subsistera nécessairement. Pour favoriser le développement durable de ces communautés insulaires et maintenir une vie sociale et économique active, il sera crucial de minimiser la distance aux côtes afin de maximiser les échanges logistiques, humains et commerciaux.

3.2.1 Organisation

L'analyse des résultats structurels issus de la modélisation à l'échelle urbaine a mis en évidence que les modules situés aux extrémités de la plateforme sont soumis à des déplacements plus importants. Or, dans l'organisation spatiale d'une ville flottante destinée à accueillir environ 10 000 habitants, il est difficile d'éviter l'implantation de fonctions vitales (logements, services, équipements) sur les zones périphériques. Cette contrainte résulte de la nécessité de créer un espace central structurant, facilitant les interactions sociales et l'accessibilité, notamment via les infrastructures portuaires.

Afin de pallier cette problématique, tout en valorisant les investissements consentis et en conservant des vues ouvertes sur la mer, il serait pertinent de disposer, sur l'ensemble du pourtour de la plateforme principale, des modules de plus petite dimension à vocation non résidentielle. Ces plateformes périphériques pourraient être dédiées à des fonctions de type parc, promenade ou espace public.

En s'appuyant sur les solutions proposées dans la littérature, ces modules pourraient également exploiter leur mouvement relatif induit par la houle pour produire de l'électricité via des systèmes de conversion d'énergie houlomotrice. Cette approche permettrait ainsi de conjuguer confort d'usage, aménagement paysager et production énergétique renouvelable, contribuant à l'autonomie et à la résilience du système urbain flottant.

CHAPITRE 4

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

4.1 Conclusions

L'objectif de ce travail de fin d'études était d'apporter des pistes de réponse sur un sujet encore peu abordé, tel que l'étude des communautés flottantes à grande échelle. Dans un contexte marqué par des pressions environnementales, démographiques et foncières, la volonté de cohabiter avec l'eau plutôt que de s'y opposer se renforce. Les structures flottantes suscitent un intérêt croissant en raison de leur adaptabilité, de leur modularité, de leur faible impact environnemental, de leur mise en œuvre rapide et de leur capacité potentielle de résilience face aux catastrophes naturelles. Toutefois, ces atouts doivent être mis en balance avec des contraintes juridiques, institutionnelles et économiques, des risques techniques, des enjeux de maintenance, des répercussions sociales ainsi qu'une articulation complexe avec le territoire continental.

La faisabilité technique et les enjeux multidimensionnels (structuraux, urbanistiques, écologiques et financiers) liés à la conception de communautés flottantes ont été abordés. Pour cela, diverses expérimentations ont été réalisées :

- Étude de flottaison et dimensionnement de trois systèmes structurels (caisson en béton, grillage de poutres en béton, et grillage de poutres en béton allégé), qui ont permis de démontrer les dimensions très importantes nécessaires pour les grillages de poutres comparativement au caisson en béton.
- Modélisations numériques du comportement des trois structures en intégrant le mouvement des vagues, en conditions de faible et de forte houle. Ces expérimentations ont mis en évidence la grande rigidité des structures, ainsi que la meilleure stabilité du grillage de poutres (doté d'un tirant d'eau plus important) face aux mouvements de l'eau.
- Comparaison entre un assemblage rigide et rotulé des modules pour chaque structure, ayant montré que la grande structure rigide offrait une meilleure stabilité, au détriment de sollicitations mécaniques plus importantes.
- Étude des possibilités d'implantation en mer du Nord de villes flottantes de tailles diverses (10 000, 60 000 et un million d'habitants), en fonction des profondeurs marines. Il en ressort que le caisson en béton est la structure la plus adaptée à une implantation en mer du Nord. Par ailleurs, le grillage de poutres en béton traditionnel (sous la forme étudiée 8 par 8) s'est révélé inadapté à ce contexte.
- Étude de la possible autonomie alimentaire, ayant mis en évidence une forte dépendance à la désalinisation de l'eau de mer et la nécessité de vastes surfaces exclusivement dédiées à la production d'aliments frais. L'autonomie (énergie, eau, alimentation) ne saurait être totale : l'expérience des archipels et des îles existantes, comme l'île d'Yeu, témoigne d'une forte dépendance logistique vis-à-vis du continent.
- Étude de pistes d'aménagement visant à rendre ces villes attractives, en s'appuyant sur les atouts de leur environnement et une organisation spatiale adaptée. Elle a notamment mis en avant le potentiel d'accessibilité reposant sur un service de navettes maritimes intérieures.

En conclusion, en modélisant ces trois systèmes structurels, ce travail a permis d'objectiver, par la simulation numérique, les avantages et les limites mécaniques de chaque solution dans le cadre d'une ville maritime de grande envergure en mer du Nord. Il a démontré la faisabilité technique de plusieurs types de structures flottantes, et identifié clairement le caisson en béton comme la solution structurelle la plus pertinente pour ce contexte. Il a également mis en lumière les défis liés à l'autonomie des ressources, à la stabilité dynamique et à l'urbanisme maritime.

Si les expérimentations numériques et l'analyse des scénarios d'implantation montrent qu'une ville flottante de grande envergure en mer du Nord n'est pas une utopie totalement irréalisable, tant d'un point de vue technique que logistique, elle reste fortement contrainte par la faible profondeur marine et des conditions océaniques exigeantes. L'étude de faisabilité de telles villes nécessite encore de nombreux efforts de recherche technique et d'optimisation afin de lever les incertitudes qui demeurent.

En définitive, penser la ville sur l'eau invite aussi à repenser notre rapport au territoire, à la mobilité et aux limites physiques de l'urbanisation : une perspective qui ouvre un champ d'exploration aussi vaste que les mers elles-mêmes.

4.2 Limites et perspectives

Comme tout travail exploratoire, cette recherche présente un certain nombre de limites qu'il convient de reconnaître afin de mieux en situer la portée. D'une part, des simplifications géométriques ont été nécessaires : les plateformes ont été modélisées à l'aide d'éléments bidimensionnels idéalisés, tels que les poutres, sans intégrer la complexité de leur géométrie tridimensionnelle réelle, notamment en ce qui concerne les effets de torsion. De même, la représentation des conditions maritimes repose sur une houle régulière sinusoïdale, avec des amplitudes fixes de 4 et 8 mètres, ce qui ne reflète pas fidèlement la diversité des états de mer réels (houle croisée, mer irrégulière, interactions vent-courant, etc.).

Par ailleurs, les résultats produits s'appuient exclusivement sur des modélisations numériques : aucune validation expérimentale n'a été menée en bassin ou sur maquette physique, ce qui limite la robustesse des conclusions obtenues. Les comportements mécaniques ont été analysés dans un cadre linéaire, sans prise en compte du vieillissement des matériaux, de la fatigue, ou des phénomènes post-fissuration du béton. Enfin, certains facteurs environnementaux majeurs (tels que l'effet du vent, des courants marins ou les contraintes thermiques) ont été volontairement écartés afin de recentrer l'analyse.

Ces limites ouvrent toutefois de nombreuses perspectives de recherche. Sur le plan technique, une modélisation 3D plus aboutie, intégrant les effets de torsion, les fondations des bâtiments, et les sollicitations complexes induites par la mer, pourrait être développée. L'adoption de modèles de houle irrégulière permettrait une approche plus réaliste des sollicitations. De plus, la réalisation d'essais physiques à l'échelle réduite, en collaboration avec des instituts spécialisés en ingénierie maritime, permettrait de valider et d'affiner les simulations numériques.

Au-delà des aspects purement structurels, l'étude pourrait s'enrichir par l'intégration de dimensions humaines, sociales et économiques. Une enquête auprès des citoyens permettrait d'évaluer la perception, l'acceptabilité et les attentes vis-à-vis des villes flottantes. Des analyses de cycle de vie et de coût global (LCC/ACV) pourraient quant à elles apporter une vision plus complète de la viabilité économique et environnementale de telles infrastructures, en comparant notamment les choix de matériaux et de systèmes énergétiques. Enfin, l'exploration des cadres institutionnels et politiques (en particulier les enjeux juridiques liés à l'occupation du domaine maritime) constituerait un approfondissement nécessaire pour envisager leur réalisation concrète à grande échelle.

En définitive, ce travail se veut comme un socle technique et conceptuel, appelant à une approche plus transversale de la ville flottante. Croiser ingénierie, urbanisme, sociologie, économie et droit apparaît aujourd'hui indispensable pour faire émerger des modèles urbains réellement viables en mer.

Bibliographie

Ajibade, I., & Shah, S. H. (2024). Can floating homes make coastal communities resilient to climate risks ? *Nature, 632(8026),* 733 736. https://doi.org/10.1038/d41586-024-02679-w.

Ardenne,P., Audouin,A., Daëron,I., Meadows,F., Pigeon,P., Rahm,P., Rougerie,J. & Younès,C. (octobre 2022). *Et vogue l'architecture !* Editions Gallimard & Cité de l'architecture & du patrimoine.

Arnaud, S., Bruel, N., & Carrel, J. (2020, octobre). Agriculture urbaine Relever le défi de la rentabilité sur un marché à fort potentiel. *Index presse business etude*. https://www.indexpresse-delphes.fr/sites/etudes-indexpresse.gminvent.fr/files/etudes/T3.2010.56-AGRICULTURE-URBAINE.pdf

Bergström, L., Kautsky, L., Malm, T., Rosenberg, R., Wahlberg, M., Capetillo, N. Å., & Wilhelmsson, D. (2014). Effects of offshore wind farms on marine wildlife—a generalized impact assessment. *Environmental Research Letters, 9(3),* 034012. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034012

Bleoju, A., Chirosca, A.-M., & Rusu, L. (2022, décembre). Study on wind farms in the North Sea area. *Energy Reports, 8(16).* https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.244

Bracq,G. (s.d.). L'EOLIEN OFFSHORE FLOTTANT. https://ifmmediterranee.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/11/leolien-offshore-flottant-par-guillaume-bracq.pdf.

Boulay, C., Le Roy, R., & Parrant, E., (2005, avril). Taking into account the inclusions' size in lightweight concrete compressive strength prediction. *Cement and Concrete Research, 35(4)* 770-775

CEN. (2002). Eurocode 1 : Actions sur les structures – Partie 1-1 : Actions générales – Poids propres, charges d'exploitation des bâtiments (EN 1991-1-1). Comité Européen de Normalisation.

Chambre régionale des comptes. (2020, 27 novembre). *RAPPORT D'OBSERVATIONS DÉFINITIVES ET SA RÉPONSE : Les déplacements métropolitains*. `https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2023-10/BRR2021-14.pdf#:~:text=En%202017%2C%20le%20financement%20par,du%20budget%20principal%20a%20progress%C3%A9`

Chaussade, J. (1990). L'île d'Yeu, un exemple de développement insulaire. *Norois, 145(1),* 81 88. https://doi.org/10.3406/noroi.1990.4465

(Chaussade, 1990)

Choisy, C., Sauvage, C., Mehdizadeh, R., & Katiennin, Y. (2020, 13 octobre). Analyse de risque d'une ville flottante. *HAL open sciences* https://hal.science/hal-03348030v1.

Chiriac, C., Czapiewska, K., Dal Bo Zanon, B., de Korte, N., Kirkwood, D., Muera, A.V., Olthuis, K., Stam, A., Subramani, S., Spiridon, K. & Totolici, D. (2019, 28 Novembre). *Demonstrator design Deliverable 7.3* SPACE@SEA. `https://spaceatsea-project.eu/images/20191128-d7.3-demonstrator-design_part1.pdf`

Collin, F. (s.d.). *Fondations superficielles et profondes.* Conception et exécution des ouvages techniques, ULG.

Czapiewska, K., Iorga, G., Koning, J., Lin, F.-Y. & Totolici, D. (2019, 24 juin). *A catalogue of technical requirements and best practices for the design D7.2* SPACE@SEA. https://spaceatsea-project.eu/images/d7.2.pdf

Czapiewska, K., Roeffen, B., & Lin, F.-Y. (2020, 3 juillet). *Business Case Living@Sea D1.3* SPACE@SEA. https://spaceatsea-project.eu/images/d1.3.pdf

Dafnomilis, I., (2020, 18 mars). *Business Case Transport & Logistics@Sea D1.5* SPACE@SEA. https://spaceatsea-project.eu/images/d1.5.pdf

Darling, H., & Schmidt, D. P. (2024). The Role of Fully Coupled Computational Fluid Dynamics for Floating Wind Applications : A Review. *Energies, 17(19)*, 4836.https://doi.org/10.3390/en17194836.

Darwich, G. (2019). *Modélisation du comportement géo-mécanique d'une conduite de transfert et évaluation de sa performance en contexte incertain* [Thèse de doctorat, Université de Bordeaux]. HAL open sciences.https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03092246

Dor, M. (2023, 21 mar). *Béton polystyrène .pdf.* Scribd. https://fr.scribd.com/document/632803312/Beton-polystyrene-pdf

DNV GL. (2016). *DNVGL-ST-0437 : Loads and site conditions for wind turbines. DNV GL*. https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/ST/2016-12/DNVGL-ST-0437.pdf

Egis & Ramoge (1976). *ÉTUDE POUR UNE GESTION DURABLE DE LA NAVIGATION DE CROISIERE ET DE LA GRANDE PLAISANCE : CONCEPTION DES ANCRAGES DES NAVIRES DE CROISIERE ET DE GRANDE PLAISANCE*. 4. https://ramoge.org/wp-content/uploads/2021/12/RAMOGE$_V$ol−4 − *Ancrages*$_V$5.*pdf*

El-Shihy, A. A. (2024). A new approach for configuring modular floating cities : assessing modular floating platforms by means of analytic hierarchy process. *Lecture Notes in Civil Engineering*, *City Territory And Architecture, 11(1)*. https://doi.org/10.1186/s40410-024-00228-6

El-Shihy, A. A., & Ezquiaga, J. M. (2019). Architectural design concept and guidelines for floating structures for tackling sea level rise impacts on Abu-Qir. *Lecture Notes in Civil Engineering*, *Alexandria Engineering Journal, 58(2),* 507 518. https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.05.003

Flikkema, M., & Waals, O. (2019). Space@Sea the Floating Solution. *Frontiers In Marine Science, 6*.https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00553

Graff, W.J. (1981). *Introduction to Offshore Structures : Design Fabrication Installation.* Gulf Publishing Company.

Guillermin, P.-Y. & Allan, M. (2024, novembre 12). *Princess Elisabeth Island : Elia presentation – Ceres*. [Présentation PowerPoint]. Ceres, Université de Liège. https://www.ceres.ulg.ac.be

Guingot, M. (2022, 29 septembre). *L'Ile, l'entreprise et le navire : étude de la desserte insulaire et des adaptations des entreprises du Ponant* [Thèse de doctorat, , UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE (UBO)]. HAL open sciences. https://theses.hal.science/tel-02456036v3

Guingot, M. (2017). *Des îles et des épiciers. S'approvisionner en biens alimentaires dans les îles du Ponant*. HAL open sciences https://hal.science/hal-01609877

Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2011, 21 décembre). The water footprint of humanity. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences, 109(9),* 3232-3237. https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109

Huebner, S. (2025, février). Coastal urban climate adaptation and the advance onto aquatic surfaces using floating solutions : Historical challenges and potential future benefits of floating homes and similar structures. *Ocean & Coastal Management, 261,* 107433. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107433

International Association of Classification Societies (IACS). (2013). Requirements concerning MOORING, ANCHORING AND TOWING. https://doi.org/10.4324/9781315832685-77

Jak, R., Poelman, M., Skirtun, M., & van den Burg., S. (2020, 21 septembre). *Business Case Farming@Sea D1.4* SPACE@SEA. https://spaceatsea-project.eu/images/d1.4.pdf

Januszkiewicz, K., Gołębiewski, J., Czarnecki, B., & Turecki, A. (2024, 14 décembre). *Redefining Urbanism in Perspective of Climate Change : Floating Cities Concept. Arts, 13(6),* 183. https://doi.org/10.3390/arts13060183

Jiang, C., Xu, P., Bai, X., Zhao, Z., el Moctar, O., & Zhang, G. (2023, 1 octobre). A review of advances in modeling hydrodynamics and hydroelasticity for very large floating structures. *Ocean Engineering*, *285*,(115319).https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115319

Kunica, D. (1993). Architecturer la planete mer [Mémoire de master, Institut Saint-Luc de Liège].`https://explore.lib.uliege.be/discovery/fulldisplay?docid=alma990018851140502321&context=L&vid=32ULG_INST:ULIEGE&lang=fr&search_scope=ULIEGE&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=ULIEGE&query=any,contains,architecturer%20la%20plan%C3%A8te%20mer&offset=0`

Kwan, T., Luo, Y., Ma, K.-T. & Wu, Y. (2019). Mooring System Engineering for Offshore Structures. *Elsevier eBooks*. https://doi.org/10.1016/c2018-0-02217-3

Loaiza Zuluaga, S. (2021, 6 septembre). *L'urbanisme alternatif : l'expension sur la mer* [Thèse de doctorat, Université de Strasbourg]. HAL open sciences.https://theses.hal.science/tel-03901682/

Morato, P. G., & Rigo, P. (2020). *Floating Structures*. Université de Liège, ANAST. Présentation PowerPoint.

Proceedings of the Third World Conference on Floating Solutions. (2024). *Lecture notes in civil engineering*.https://doi.org/10.1007/978-981-97-0495-8.

Qiu, L. (2008). Modeling and simulation of transient responses of a flexible beam floating in finite depth water under moving loads. *Applied Mathematical Modelling, 33(3),* 1620 1632. https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.02.015

(Qiu, 2008)

Quirk, J. & Friedman, P. (2017). *Seasteading : How floating nations will restore the environment, enrich*

the poor, cure the sick, and liberate humanity from politicians. Free Press.

Regout, D., (2021, 22 octobre). Hydroelastic Analysis of a Multi-Module Very Large Floating Structure [Mémoire de master, Université de technologie de Delft]. *TU Delft Repository*. https://repository.tudelft.nl/search?search$_term = Hydroelastic + Analysis + of + a + Multi - Module + Very + Large + Floating + Structure + \&search_by = content$.

Rigo, P. (2011). *Chapitre 10 : Les structures flottantes*. [Cours, Université de Liège].

Soulard, C., Legé, R., & Tissière, L. (2017). "La traversée s'est bien passée ?" . Éléments de réflexion sur les relations entre l'Île d'Yeu et le continent. *Les Cahiers Nantais, 2,* 41 50. https://cahiers-nantais.fr/index.php?id=1066

(Soulard, et al., 2017)

Sankalp, A. & De Leeneer, Y. (2020). Mooring Systems for Very Large Floating Structures. *Lecture Notes in Civil Engineering*, *41*, 253–273. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8743-2$_1$4.

Wang, C., & Wang, B. (2015). *Large floating structures. Ocean engineering and oceanography*. https://doi.org/10.1007/978-981-287-137-4.

Wang, C. M. & Tay, Z. Y. (2011). Very Large Floating Structures : Applications, Research and Development. *Procedia Engineering*, *14*, 62–72. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.007

Wang, S. & Han, B. (2024, 25 janvier). Simulating Structural Motions of Floating Cities in an Immersive Virtual Reality Environment. pp. 96–103. https://doi.org/10.1061/9780784485231.012

Yang, H., Zhao, S., & Kim, C. (2022). Analysis of floating city design solutions in the context of carbon neutrality-focus on Busan Oceanix City. *Energy Reports, 8*, 153-162. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.310.

Webographie

Anais. (2024, 17 décembre). *Qu'est-ce qui pollue le plus entre le bateau et l'avion ?*. Ekwateur. Consulté le 6 mai 2025 sur https://ekwateur.fr/blog/transition-energetique/pollution-avion-bateau/.

Atenor, (2019, 12 juillet). *Oceanix, une ville flottante contre la montée des eaux.*. Divercity. Consulté le 12 mai 2024 sur https://www.divercitymag.be/fr/oceanix-une-ville-flottante-contre-la-montee-des-eaux/.

Atlantico. (2015, 3 septembre). *Des fermes flottantes pour nourrir la planète, un projet à l'étude.*. Atlantico. Consulté le 9 avril 2025 sur https://atlantico.fr/article/decryptage/les-fermes-solaires-flottantes-pour-nourrir-la-planete-malgre-le-manque-de-terres-arables

Bernard, P. (2020, 22 février). *L'Hôpital Dumonté et le Centre de Santé de l'Ile d'Yeu*. MYEU Ensemble. Consulté le 5 mai 2025 sur `https://myeu-ensemble.fr/2020/02/lhopital-dumonte-et-le-centre-de-sante-de-lile-dyeu/#:~:text=Image%3A%20Centre%20de%20sant%C3%A9%20M%C3%A9dicalQuelques,chiffres`

BIG | Bjarke Ingels Group. (2022). *Oceanix Busan*. BIG | Bjarke Ingels Group. Consulté le 12 mai 2024 sur https://big.dk/projects/oceanix-busan-4711

CILE. (s.d.). *Combien coûte une douche ? Un bain ? Une chasse d'eau ?*. CILE. Consulté le 12 mai 2024 sur https://www.cile.be/en/node/171#:~:text=Selon%20les%20derniers%20chiffres%20communiqu%C3%A9s%20par%20Belgaqua,pour%20une%20famille%20compos%C3%A9e%20de%203%20personnes

Citypopulation. (2024, 22 juin). *Liège*. Citypopulation. Consulté le 26 mai 2025 sur https://www.citypopulation.de/en/belgium/liege/li%C3%A8ge/62063__li%C3%A8ge/#:~:text=Estimate%202024,184%2C550%20194%2C717%20196%2C970%20196%2C296%20195%2C778%E2%86%92https://www.citypopulation.de/en/belgium/liege/li%C3%A8ge/62063__li%C3%A8ge/#:~:text=Estimate%202024,184%2C550%20194%2C717%20196%2C970%20196%2C296%20195%2C778%E2%86%92

Climate ADAPT. (2022, 22 novembre). *Boîtier flottant et amphibie*. Climate ADAPT. Consulté le 9 avril 2025 sur https://climate-adapt.eea.europa.eu/fr/metadata/adaptation-options/floating-and-amphibious-housing#:~:text=Les%20maisons%20flottantes%20sont%20en,sur%20des%20fondations%20en%20b%C3%A9ton.

Climate ADAPT. (2022, 22 novembre). *Habitations amphibies à Mübommel, Pays-Bas.*. Climate ADAPT. Consulté le 9 avril 2025 sur https://climate-adapt.eea.europa.eu/fr/metadata/case-studies/amphibious-housing-in-maasbommel-the-netherlands#:~:text=L%27un%20de%20ces%20endroits,maisons%20flottantes%20ont%20%C3%A9t%C3%A9%20construites).

Climate Data. (s.d.). *Climat Ostende*. Climate Data. Consulté le 9 avril 2025 sur https://fr.climate-data.org/europe/belgique/flandre/ostende-59482/

Copernicus Marine Service (2024, 18 juin). *Global Ocean Monthly Mean Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model*. Copernicus Marine. Consulté le 20 novembre 2024 sur https://data.marine.copernicus.eu/product/WIND_GLO_PHY_CLIMATE_L4_MY_012_003/description.

Copernicus Marine Service (2024, 18 juin). *Temperature*. Copernicus Marine. Consulté le 21 novembre 2024 sur https://data.marine.copernicus.eu/products?facets=mainVariables%7ETemperature.

Commandeur, J. (2024, 8 février). *Consommation de fruits et légumes : en hausse en 2021 alors pourquoi s'inquiète-t-on ? Réussir Fruits & Légumes.*. Le Monde.fr. Consulté le 6 mai 2025 sur https://www.reussir.fr/fruits-legumes/consommation-de-fruits-et-legumes-en-hausse-en-2021-alors-pourquoi-s-inquiete-t-on

Compagnie Yeu continent. (2025, 27 janvier). *La compagnie maritime régionale de transport* Yeu continent. Consulté le 11 février 2025 sur https://www.yeu-continent.fr/compagnie/entreprise/#:~:text=Depuis%202017%2C%20le%20nombre%20de,ligne%20sur%20le%20site%20internet.

Compagnie Yeu continent. (2025, 18 avril). *Yeu Continent : traversée de l'Ile d'Yeu en bateau.* Yeu continent. Consulté le 5 mai 2025 sur https://www.yeu-continent.fr/

Custos-Quatreville, C. (s.d.). *Les premières fermes flottantes | Floating Farm s'élève sur l'eau*. in :Expeditions. Consulté le 9 avril 2025 sur https://www.inexpeditions.com/immersion/floating-farm

Damgé, M. (2018, 15 novembre). *Un cargo pollue-t-il autant que toutes les voitures françaises ?*. Le Monde.fr. Consulté le 6 mai 2025 sur https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/11/14/un-

cargo-pollue-t-il-autant-que-toutes-les-voitures-francaises$_5$383604$_4$355770.*html*

Deluzarche, C. (2018, 4 septembre). *La première ferme laitière flottante du monde s'installe aux Pays-Bas*. Futura. Consulté le 9 avril 2025 sur https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/ferme-premiere-ferme-laitiere-flottante-monde-installe-pays-bas-72655/

Demers-Lemay, M. (2015, 19 février). *Un village flottant fait de roseaux*. ScienceJunior.fr. Consulté le 9 avril 2025 sur http://sciencejunior.fr/ecologie-et-nature/un-village-flottant-fait-de-roseaux

De Schaepmeester, D. (2023, août 14). *Découverte d'un village englouti depuis 8 000 ans, le plus vieux village lacustre d'Europe*. Futura. Consulté le 9 avril 2025 sur https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/archeologie-decouverte-village-englouti-depuis-8-000-ans-plus-vieux-village-lacustre-europe-107061/

Dillon, S. (2022, 14 juillet). *Les fermes flottantes sont-elles la solution pour pallier aux menaces d'inondations ?*. La Révolution Textile. Consulté le 9 avril 2025 sur https://www.larevolutiontextile.com/les-fermes-flottantes-sont-elles-la-solution-pour-pallier-aux-menaces-dinondations/

Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM).(2020). *Courantologie - Manche et mer du Nord*. Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin. Consulté le 21 novembre 2024 sur `https://data.marine.copernicus.eu/products?facets=mainVariables%7ETemperature`.

DS New Energy. (2021, décembre). *Les Pays-Bas lancent des essais de panneaux solaires flottants flexibles qui se déplacent avec les vagues*. DS New Energy. Consulté le 10 mai 2025 sur `https://www.dsnsolar.com/info/dutch-start-trials-of-flexible-floating-solar-64412457.html`.

Etamine. (2025, 26 mai). *Bâtiment d'agriculture urbaine à Romainville (93)*. Etamine. Consulté le 26 mai 2025 sur https://www.etamine.coop/reference/batiment-dagriculture-urbaine-a-romainville-93/

European Commission. (s.d.). *European Marine Observation and Data Network (EMODnet)*. European Commission. Consulté le 13 février 2025 sur `https://emodnet.ec.europa.eu/en?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTEAAR3ZYgYoutdqv3QXeQRlnumMxKj99RuPyKiqwnFsLxmoXSjmVDjAHxVHHkM_aem_a4d3UigkJcT8ilwC9Rj-Mg`

Faré, B. (2024, 15 janvier). *Les villes flottantes Oceanix City*. Oxiam Consulting. Consulté le 24 mars 2024 sur https://oxiam.fr/blog/2024/01/15/les-villes-flottantes-oceanix-city/

FasterCapital. (s. d.). *Structures Flottantes*. FasterCapital. Consulté le 30 octobre 2024 sur `https://fastercapital.com/fr/mots-cle/structures-flottantes.html/1`.

Federal Highway Administration Research and Technology (1999, juin). *Chapter 2 : Foundation Engineering Project-A Quarter Century of Geotechnical Research*. Federal Highway Administration Research and Technology. Consulté le 3 mai 2025 sur `https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/geotechnical/98139/02.cfm#:~:text=Foundations%20represent%20about%2030%20percent,total%20annual%20expenditure%20of%20public`

Fhf. (s. d.). *Hopital dumonte hopital de proximite l ile d yeu* Consulté le 5 mai 2025 sur `https://www.hopital.fr/annuaire-etablissement/hopital-dumonte-hopital-de-proximite-l-ile-d-yeu,12133#:~:text=Capacit%C3%A9`

Floating future. (2024, 10 septembre). *About us*. Floating Future Consulté le 5 mai 2025 sur https://floating-future.nl/about/

Fournier, F. (2020, 6 avril). *Les navettes fluviales de Lyon, une vraie solution ?*. Lyon Entreprises. Consulté le 17 mai 2025 sur https://www.lyon-entreprises.com/actualites/article/navettes-fluviales-lyon

Galoffre, C. (2015, 23 octobre). *Une maison amphibie créée pour résister aux inondations*. Batiactu. Consulté le 9 avril 2025 sur https://www.batiactu.com/edito/maison-amphibie-creee-resister-aux-inondations-42539.php

Immorise. (2025, 16 février). *Fabrication des bâtiments flottants : techniques et matériaux utilisés*. Immorise. Consulté le 6 mai 2025 sur https://www.immorise.fr/fabrication-des-batiments-flottants-techniques-et-materiaux-utilises/

Insee. (2024, 27 juin). *EMP2 - Emplois au lieu de travail par sexe, statut et secteur d'activité économique en 2021*. Insee. Consulté le 6 mai 2025 sur https://www.insee.fr/fr/statistiques/8201660?sommaire=8205898&geo=COM-85113#:~:text=EMP2%20,action%20sociale%20446%2030%20476

Insee. (2024, 27 juin). *Mobilités professionnelles en 2019 : déplacements domicile - lieu de travail*. Insee. Consulté le 6 mai 2025 sur https://www.insee.fr/fr/statistiques/6454112

Joignot, F. (2015, 19 mai). *OCÉANS. . . PLANÈTE DE RECHANGE ? LES HABITER, LES PROTÉGER POUR DÉSENGORGER LES TERRES MENACÉES. C'EST LA «RÉVOLUTION BLEUE ».* Le Monde. Consulté le 24 mars 2024 sur https://www.lemonde.fr/blog/fredericjoignot/2015/05/19/2247/

Journaldesfemmes. (s.d.). *Ecoles, collèges et lycées à l'Île-d'Yeu*. Journaldesfemmes. Consulté le 5 mai 2025 sur https://www.journaldesfemmes.fr/maman/ecole/l-ile-d-yeu/ville-85113#:~:text=Publics%20Priv%C3%A9s%20Nombre%20d%27%C3%A9coles%20maternelles,Nombre%20de%20lyc%C3%A9es%20Aucun%20Aucun

(Journaldesfemmes, s.d.

KNMI (s.d.).*Klimaat van Nederland - zeespiegel* KNMI. Consulté le 11 avril 2025 sur https://www.knmi.nl/klimaat

Larmagnac-Matheron, O. (2023, 20 juin). *Pour ou contre les villes flottantes ?* Philosophie Magazine. Consulté le 29 octobre 2024 sur https://www.philomag.com/articles/pour-ou-contre-les-villes-flottantes

Le Moniteur. (2024, 16 septembre). *Zones inondables : et si nous construisions des maisons qui flottent ?* Le Moniteur. Consulté le 9 avril 2025 sur www.lemoniteur.fr. https://www.lemoniteur.fr/article/zones-inondables-et-si-nous-construisions-des-maisons-qui-flottent.1468784

MARC - Modélisation et Analyse pour la Recherche Cotière. (2024, 21 Novembre). *Hauteur significative et direction des vagues* MARC. Consulté le 21 Novembre 2024 sur https://marc.ifremer.fr/resultats/vagues/modeles_atlantique_nord/(typevisu)/map/(zoneid)/6735#visualisation_type0

Groizeleau, V. (2023, 5 mai). *Insula Oya III : à bord du nouveau navire desservant l'île d'Yeu.* Mer et Marine. Consulté le 5 mai 2025 sur https://www.meretmarine.com/fr/marine-marchande/insula-oya-

iii-a-bord-du-nouveau-navire-desservant-l-ile-d-yeu

Hellopro. (2023, 20 décembre). *Prix d'une dessalinisation d'eau potable*. Hellopro. Consulté le 20 mai 2025 sur https://conseils.hellopro.fr/quel-est-le-prix-d-une-dessalinisation-d-eau-potable-1691.html

Meyer, C. (2023, 20 juillet). *Les Pays-Bas, un modèle d'adaptation à la montée des eaux.* Les Echos. Consulté le 12 avril 2025 sur https://www.lesechos.fr/weekend/planete/les-pays-bas-un-modele-dadaptation-a-la-montee-des-eaux-1961056#:~:text=A%20l%27heure%20qu%27il,niveau%20moyen%20de%20la%20mer.

MPR News. (2012, 29 avril). *Deep muck raises cost of new St. Croix River bridge.* MPR News. Consulté le 3 mai 2025 sur https://www.mprnews.org/story/2012/04/29/deep-muck-raises-cost-of-new-st-croix-river-bridge

Mobiwisy. (2023, 27 mai). *Île d'Yeu : découvrez l'Insula Oya III*. Mobiwisy. Consulté le 3 mai 2025 sur https://mobiwisy.fr/transports-collectifs/bateau/ile-dyeu-comment-linsula-oya-iii

Office de Tourisme de L'Île D'Yeu. (2025, 20 février). *Shopping sur l'île.* Consulté le 5 mai 2025 sur https://www.ile-yeu.fr/que-faire-a-l-ile-d-yeu/se-divertir/shopping-sur-l-ile#:~:text=L%27%C3%A9picerie%20du%20Bourg%20ALIMENTAIRE%20Situ%C3%A9e,d%27Yeu

Office de Tourisme de L'Île D'Yeu. (2025, 19 février). *Commerces et services.* Consulté le 5 mai 2025 sur https://www.ile-yeu.fr/pratique/commerces-et-services?listpage=7#:~:text=Type%20de%20commerces%20et%20services

Office de Tourisme de L'Île D'Yeu. (2025, 3 février). *Restaurants on l'île d'Yeu* Consulté le 5 mai 2025 sur https://www.yeu-island.com/what-to-do-on-the-ile-d-yeu/where-to-eat/restaurants: :text=Types

Office québécois de la langue française. (2019). *ville flottante*. Vitrine linguistique. consulté le 12 avril 2025 sur https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26556589/ville-flottante

Otaku, A. (2023, 8 janvier). *Oceanix Busan.*. YAZU. consulté le 12 avril 2025 sur https://www.yazu.it/architettura/oceanix-busan/

Proceedings of the Third World Conference on Floating Solutions. (2024). *Lecture notes in civil engineering*.https://doi.org/10.1007/978-981-97-0495-8.

Rayman, N. (2014, 26 juin). *This Floating City May Be The Future of Coastal Living.* TIME. https://time.com/2926425/the-floating-homes/

Razemon, O., Van Eeckhout, L., & Benveniste, J. (2024, 15 mai). *Paris 2024 relance le rêve d'un « métro fluvial » sur la Seine.* Le Monde.fr. consulté le 17 mai sur https://www.lemonde.fr/smart-cities/article/2024/05/15/paris-2024-relance-le-reve-d-un-metro-fluvial-sur-la-seine_6233378_4811534.html

République française. (2023, 11 janvier). *Consommation d'eau potable en France.* notre-environnement. consulté le 17 mai sur https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/societe/le-mode-de-vie-des-menages-ressources/article/consommation-domestique-en-eau-potable#:~:text=Depuis%202012%2C%20la%20consommation%20domestique%20d%27eau%20potable%20tend%20d%C3%A9sormais,m3%20par%20habitant%20par%20an.

REZMAT. (s.d.). *CALCUL MOMENT INERTIE Sectiunea 18.* https://www.rezmat.ro/moment-inertie-18

Service Changements climatiques. (s.d.). *Océans.* Climat.be. Consulté le 2 mai 2024 sur https://climat.be/changements-climatiques/changements-observes/oceans

Sirenergies. (s.d.). *L'histoire de l'énergie éolienne.* Sirenergies. Consulté le 30 avril 2025 sur https://www.sirenergies.com/article/histoire-energie-eolienne/#:~:text=L%27essor%20des%20%C3%A9oliennes%20flottantes,une%20capacit%C3%A9%20de%2040%20MW.

Shimizu Corporation. (s. d.). *The Environmental Island, GREEN FLOAT* Shimizu Corporation. Consulté le 30 octobre 2024 sur https://www.shimz.co.jp/en/topics/dream/content03/.

Société wallonne des eaux. (2025). *Le prix de l'eau à la SWDE.* SWDE. Consulté le 20 mai 2025 sur https://www.swde.be/fr/le-prix-de-leau-la-swde

Solvari. (2025, 6 mai). *Production des panneaux solaires.* Panneausolaire-info.be. Consulté le 20 mai 2025 sur https://www.panneausolaire-info.be/production#:~:text=Production%20annuelle%20des%20panneaux%20solaires,-En%20Belgique%2C%201&text=Comme%20les%20conditions%20ne%20sont,conversion%20de%200%2C85).

Statbel (2024, 21 novembre). *Densité de la population* Statbel. Consulté le 30 mai 2025 sur https://statbel.fgov.be/fr/themes/population/structure-de-la-population/densite-de-la-population

Temperville, A., (2021, 2 novembre). *Vagues et houles* Encyclopédie de l'environnement. Consulté le 15 février 2025 sur https://www.encyclopedie-environnement.org/eau/vagues-houles/

TF1 INFO. (2021, 22 octobre). *Emploi : de nombreux postes à pourvoir sur l'île d'Yeu* TF1 INFO. Consulté le 6 avril 2025 sur https://www.tf1info.fr/vie-pro/video-emploi-de-nombreux-postes-a-pourvoir-sur-l-ile-d-yeu-2199737.html

Thomas, P. (2004, 1er mars). *Fonte des glaces, dilatation thermique de l'eau et montée du niveau marin.* Planet-Terre. Consulté le 27 octobre 2024 sur https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/montee-mer.xml

Utrecht University. (2020, 8 juin). *Floating solar panels at sea : higher yields, better for the landscape.* Consulté le 20 mai 2025 sur https://www.uu.nl/en/news/floating-solar-panels-at-sea-higher-yields-better-for-landscape

Villepratique. (s. d.). *Magasins Intermarché à L'Île-d'Yeu (85350).* villepratique.fr. Consulté le 5 mai 2025 sur https://www.villepratique.fr/intermarche/l-ile-d-yeu-85350

Viva Arquitectura. (2022, 10 mai). *Oceanix Busan - BIG Bjarke Ingels Group* Arquitectura Viva. Consulté le 12 avril 2025 sur https://arquitecturaviva.com/works/oceanix-busan

Wallemacq, T. (2020, 11 février). *Montée des eaux : voici à quoi pourrait ressembler la Belgique en 2100* Metrotime. Consulté le 11 avril 2025 sur https://www.metrotime.be/fr/actualite/montee-des-eaux-voici-quoi-pourrait-ressembler-la-belgique-en-2100

Water-Taxi. (s. d.). *Excursion en mer au parc éolien* Water-Taxi. Consulté le 26 mai 2025 sur https://www.water-taxi.be/fr/tours/excursion-en-mer-au-parc-eolien/

Wikipedia. (2025, 7 juin). *European countries by electricity consumption per person.* Wikipedia. Consulté le 7 juin 2025 sur https://en.wikipedia.org/wiki/European_countries_by_electricity_consumption_per_person

Filmographie

Brantjes, M. (réalisateur). (2023, 14 décembre). *Olaf Waals van Marin over de Floating Future. Wonen en werken op het water ! | BrantjesPodcast afl 7.* [Vidéo]. YouTube. Consulté le 31 octobre 2024 sur https://www.youtube.com/watch?v=icu5kqwztB4

DamiLee. (réalisateur). (2024, 23 février). *The REAL Problem with Floating Cities.* [Vidéo]. YouTube. Consulté le 31 octobre 2024 sur https://www.youtube.com/watch?v=vJP7I_QMXY0.

DW Documentary. (réalisateur) (2023, 6 juin). *Floating cities as an innovative response to climate change.* [Vidéo]. YouTube. Consulté le 31 octobre 2024 sur https://www.youtube.com/watch?v=S0oGaoqSAl0.

PolyU RILS Channel. (réalisateur). (2022, 6 décembre). *Land from Water : Technology, Design and Governance of Climate Resilient Floating Urban Development* [Vidéo]. YouTube. Consulté le 31 octobre 2024 sur https://www.youtube.com/watch?v=L$_F$*ypuVzs*50

Bagayoko, J.M. & Parrot, G. (2021, 26 novembre). *À la découverte des îles flottantes du lac Titicaca au Pérou.* [Vidéo]. TF1 INFO. Consulté le 9 avril 2025 sur https://www.tf1info.fr/voyages/video-a-la-decouverte-des-iles-flottantes-du-lac-titicaca-au-perou-2203081.html

Ipso Facto. (réalisateur). (2023, mai 8). *Pays-Bas : Les maisons flottantes D'Ijburg | Habiter le monde | Ipso facto* [Vidéo]. YouTube. Consulté le 9 avril 2025 sur https://www.youtube.com/watch?v=4EE5JIRq3LM

Maritime Research Institute Netherlands - MARIN. (réalisateur). (2021, 11 mars). *Floating islands* [Vidéo]. YouTube. Consulté le 31 octobre 2024 sur https://www.youtube.com/watch?v=HeFgnwEfPcU.

The Impossible Build. (réalisateur) (2023, 19 octobre). *The world's biggest floating cities planned for construction.* [Vidéo]. YouTube. Consulté le 31 octobre 2024 sur https://www.youtube.com/watch?v=B26xq6iU9Hg

Tomorrow's Build. (2023, août 29). *The Race to Build Japan's First Floating City.* [Vidéo]. YouTube. Consulté le 31 octobre 2024 sur https://www.youtube.com/watch?v=iLQRCK1v5lA.

4.3 Interviews

4.3.1 Interview Avec Joep Van Der Zanden, 20 février 2025

4.3.1.1 Retranscription originale

— Moi : So, I'm Thomas. I'm currently pursuing a Master's degree at the University of Liège. I'm studying civil engineering with a specialization in architecture.As part of my studies, I'm required to complete a master's thesis. At my university, the thesis involves in-depth research on a specific topic. My topic is the analysis of the relevance of different structural systems for constructing floating cities. The goal is to develop both technical and scientific expertise in this area.

My thesis has several objectives. The first is to compare three structural systems, inspired by real-world projects like Green Float and Oceanic City. I will assess them based on both structural and financial criteria.

The second objective is to examine how solutions vary depending on city scale—for instance, whether it's better to use a single large platform or multiple smaller interconnected ones.

A third objective is to optimize architectural quality based on various architectural criteria. I also want to look at the applicability of floating cities specifically in the North Sea context.

The three structural systems I'll be studying are :
- Concrete caissons, as in Oceanic City
- Grid beams

Buoyant systems, where stability depends on factors such as the center of gravity, building height, draft depth, and the flexibility or constraints of mooring systems.

I'll also analyze internal constraints for large structures, as well as the types of connectors used between smaller platforms. On the financial side, I'll study the influence of shape and size, maintenance costs, material quantity, and other related factors.

Regarding architectural criteria, I'll consider aspects like city location, connection to the mainland, environmental impact, platform shape, public spaces, social accessibility, and so on. I'm still in the early stages of my research, and I'd like to ask you a few questions, if that's okay. But feel free to ask anything as well.

— Joep Van Der Zanden : Okay, yes there are many interesting topics here. Maybe to begin, I can tell you a bit about the "Floating Future" project I'm currently working on. Have you seen their website ?

— Moi : Yes, I've heard of it.

— Joep Van Der Zanden : Great. So I'm involved in a project called Floating Future. It's a five-year research program with a large team working across different domains, trying to answer similar questions to yours. It really shows that this is a very relevant and emerging topic, although there's still a lot to explore. I may not have all the answers, but I'll gladly share what I can.

— Moi : Thank you. So, my first question is : In your opinion, how relevant are floating cities as a solution to rising sea levels, compared to other strategies in the Netherlands ?

— Joep Van Der Zanden : Well, when it comes to the North Sea, we're already seeing the rise of offshore wind farms, and that creates a need for maintenance crews to stay nearby. That's one potential use case for floating units. There are also plans to expand food production offshore, for example through seaweed farming. That's another application.

But when it comes to true floating cities—where people live full-time offshore—I think it's not very realistic, at least not in the coming decades. For now, the focus is more on industrial applications.

For inland waters in the Netherlands, however, we see more potential for floating housing. Much of the country lies below sea level, and the ground in these low-lying areas is very soft and wet, making construction difficult.

Traditionally, people have dealt with this by pumping out water, but this causes the land to sink, leading to infrastructure issues. Roads sink, but houses—resting on deeper foundations—do not, which creates uneven conditions.

Rising sea levels and heavier rainfall increase the need for water retention. That's where floating houses can help.
Space is another key issue. Most people live in the western part of the country, where all the land is already used—for housing, industry, or agriculture. That's why developers are exploring building on water. There's still space available there, though of course we have to consider recreational, ecological, and fishing uses too.

If housing can be combined with other water-based services, that could be a valuable solution.

— Moi : Thanks. My second question is : What characteristics do you consider for installations in the North Sea ? What factors need to be accounted for wind, etc. ?

— Joep Van Der Zanden : Yes, engineering for offshore environments involves very different regulations. For example, floating houses are still legally considered ships, which means that maritime safety and design standards apply.

Regarding the North Sea specifically, it's crucial to design for the exact location, considering wave, current, and wind conditions. You have to prove that your design will withstand these conditions throughout its lifespan, including extreme storms.

— Moi : So the environmental conditions of the North Sea are different from those in tropical locations ?
— Joep Van Der Zanden : Exactly. In tropical areas, you might face lower waves but more extreme wind events like hurricanes. The North Sea has its own specific conditions, and you can't directly compare the two.

Water depth is also critical. Mooring something in shallow water is very different from doing so in deeper water. You also need to ensure the structural integrity of the floating unit—especially when people will be living or working there. Access is another factor : you need to evaluate in what weather conditions people can safely reach the platform. Guidelines that apply to ships also tend to apply here.

— Moi : Understood. So how do you determine the flexibility needed for mooring chains ? How much extra distance is typically provided beyond the minimum ?

— Joep Van Der Zanden : We often use catenary mooring systems—they're well-established and widely used. For instance, we used them in a previous project called Space@Sea. I can send you a video about it.

As the platform or city grows in size, wave and wind loads increase, meaning you need more mooring chains. That also means the structure will move slowly in the horizontal plane.

— Moi : What kind of movement is acceptable for such platforms ? Too little movement puts strain on the mooring system, but too much affects stability, right ?

— Joep Van Der Zanden : Yes, exactly. Excessive movement can make it uncomfortable or impractical for people. It also makes access by boat more difficult. So the platform's excursions (the extent of its movement) must be managed carefully.

There are no universal numbers, but there are certainly limits—particularly for things like maximum acceleration before people start to feel seasick. The Space@Sea project might have some specific guidelines on this.

— Moi : Thank you. So, which structural systems do you study most often and why—concrete caissons, honeycombs, beams ?

— Joep Van Der Zanden : Actually, in our research, we don't focus so much on the structural material or system itself. We're more concerned with the interaction between the structure and water—things like overall dimensions, weight distribution, and center of gravity. The choice of material is usually secondary in our line of work.

— Moi : Understood. What lessons have you learned from past projects or case studies ? How have they influenced your recommendations for future designs ?

— Joep Van Der Zanden : Let me start with inland applications, which are more common. One of the biggest challenges isn't technical—it's legal and regulatory. In the Netherlands, a floating house is considered a ship, so you can't get a traditional mortgage for it, and permits are often temporary, even when the house is designed to stay in place for decades.

This uncertainty makes it hard to scale up floating housing into full neighborhoods or cities. Investors are hesitant because of legal grey areas.

For offshore applications, the challenges are both technical and financial. If you search for "floating cities" online, you'll often see large, interconnected platforms. These modular concepts require robust connectors, and managing the loads on them is a real challenge.

In our Space@Sea project, we were able to design something that met all the technical requirements, but the mooring system alone—just the steel chains—was extremely expensive.

That's why in our current project (Floating Future), we're shifting toward smaller, more compact platforms—more like the ones used in oil and gas industries, with accommodation decks and functional zones for things like aquaculture or seaweed farming. It's more practical and cost-effective.

— Moi : That makes sense. Do you have any recommended reading or references for my thesis ?

— Joep Van Der Zanden : Yes ! The SETSEA website has some excellent reports—I can send you a link. I also noticed you referenced some floating solutions earlier ; I'd suggest reviewing those proceedings as well. And there was a recent paper published in Nature on this topic that could be very useful. I'll send that to you too.

— Moi : Thank you. One final question : How do you decide on the distance from the coast for placing an offshore industry hub ? I assume depth is a factor, but are there others ?

— Joep Van Der Zanden : Yes, water depth is one consideration. But there are others too. For example, logistics is still cheaper closer to shore. As wind parks move further offshore, the cost of transporting people and materials rises. At some point, it becomes more economical to have offshore accommodation—similar to oil and gas, where workers stay offshore for a few weeks at a time before returning.

So yes, further offshore could be more economical in the future, depending on logistics and project needs.

— Moi : Thank you very much for your time !

4.3.1.2 Retranscription traduite en français

— Moi : Bonjour, je m'appelle Thomas. Je suis actuellement étudiant en Master à l'Université de Liège, en ingénierie civile avec une spécialisation en architecture. Dans le cadre de mon cursus, je dois réaliser un travail de fin d'études. Celui-ci consiste en une recherche approfondie sur un sujet spécifique.

Mon sujet porte sur l'analyse de la pertinence de différents systèmes structurels pour la construction de villes flottantes. L'objectif est de développer une expertise à la fois technique et scientifique dans ce domaine.

Ma recherche s'articule autour de plusieurs objectifs. Le premier consiste à comparer trois systèmes structurels inspirés de projets existants comme Green Float et Oceanic City, en les évaluant selon des critères structurels et financiers.

Le deuxième objectif est d'analyser l'adaptabilité des solutions selon l'échelle urbaine, en étudiant par exemple s'il est préférable d'avoir une grande plateforme unique ou plusieurs plateformes interconnectées.

Le troisième objectif est d'optimiser la qualité architecturale selon différents critères spécifiques. Je m'intéresse aussi à l'applicabilité des villes flottantes dans le contexte particulier de la mer du Nord.

Les trois systèmes structurels que j'étudierai sont :

- des caissons en béton, comme dans le projet Oceanic City,
- des structures à poutres croisées,
- des systèmes fondés sur la flottabilité passive, dont la stabilité dépend du centre de gravité, de la hauteur des constructions, du tirant d'eau et de la flexibilité ou non du système d'ancrage.

J'analyserai également les contraintes internes dans le cas de grandes structures, ainsi que les types de connexions possibles entre petites plateformes. Sur le plan financier, j'évaluerai l'influence de la forme et de la taille, les coûts de maintenance, la quantité de matériaux et d'autres facteurs associés.

Concernant les critères architecturaux, je prendrai en compte l'emplacement de la ville, la connexion au continent, l'impact environnemental, la forme des plateformes, les espaces publics, l'accessibilité sociale, etc. Je suis encore au début de ma recherche, et j'aimerais vous poser quelques questions, si vous êtes d'accord. N'hésitez pas non plus à me poser des questions.

— Joep Van Der Zanden : Très bien, il y a beaucoup de sujets intéressants ici. Pour commencer, je peux peut-être vous parler un peu du projet « Floating Future » sur lequel je travaille actuellement. Avez-vous consulté leur site web ?

— Moi : Oui, j'en ai entendu parler.

— Joep Van Der Zanden : Parfait. Je suis impliqué dans un programme de recherche de cinq ans intitulé Floating Future. C'est un projet interdisciplinaire avec une grande équipe qui travaille sur des questions similaires aux vôtres. Cela montre bien que c'est un sujet d'actualité très pertinent, même s'il reste encore beaucoup à explorer. Je n'aurai peut-être pas réponse à tout, mais je partagerai volontiers ce que je peux.

— Moi : Merci beaucoup. Première question : selon vous, dans quelle mesure les villes flottantes représentent-elles une solution pertinente face à l'élévation du niveau de la mer, par rapport à d'autres stratégies, notamment aux Pays-Bas ?

— Joep Van Der Zanden : En ce qui concerne la mer du Nord, on observe déjà un développement important des parcs éoliens offshore, ce qui crée un besoin de structures permettant aux équipes de maintenance de rester sur place. C'est un des cas d'usage possibles pour des unités flottantes. Il existe aussi des projets visant à étendre la production alimentaire en mer, comme la culture d'algues. C'est une autre application envisagée.

Mais pour ce qui est de véritables villes flottantes, où des gens vivraient en permanence en mer, je pense que ce n'est pas réaliste à court ou moyen terme. Pour l'instant, l'accent est davantage mis sur des applications industrielles.

En revanche, pour les eaux intérieures des Pays-Bas, le potentiel est beaucoup plus important. Une grande partie du territoire est située sous le niveau de la mer, et le sol y est très meuble et humide, ce qui complique la construction.

Traditionnellement, on a géré cela en pompant l'eau, mais cela provoque l'affaissement des terres, entraînant des problèmes pour les infrastructures. Les routes s'enfoncent alors que les maisons, reposant sur des fondations plus profondes, ne bougent pas, ce qui crée des déséquilibres.

Avec la montée des eaux et les pluies plus intenses, le besoin de stocker l'eau devient plus pressant. Les maisons flottantes peuvent contribuer à répondre à ce défi.

L'espace est aussi une contrainte majeure. La majorité de la population vit dans l'ouest du pays, une région déjà entièrement utilisée pour l'habitat, l'industrie ou l'agriculture. C'est pour cela que certains promoteurs envisagent de construire sur l'eau, où il reste encore de l'espace, bien que les usages récréatifs, écologiques et la pêche doivent également être pris en compte.

Si on peut combiner l'habitat avec d'autres fonctions sur l'eau, cela pourrait s'avérer une solution intéressante.

— Moi : Merci. Ma deuxième question est : quelles caractéristiques faut-il prendre en compte pour des installations en mer du Nord ? Quels facteurs environnementaux sont les plus importants (vent, courant, etc.) ?

— Joep Van Der Zanden : Oui, l'ingénierie en milieu offshore implique des normes très différentes. Par exemple, les maisons flottantes sont juridiquement considérées comme des navires, ce qui signifie qu'elles doivent respecter les normes de sécurité maritime.

Pour la mer du Nord en particulier, il est essentiel d'adapter le design aux conditions locales, en tenant compte des vagues, des courants, du vent, etc. Il faut pouvoir prouver que la structure résistera à ces conditions durant toute sa durée de vie, y compris lors de tempêtes extrêmes.

— Moi : Donc les conditions de la mer du Nord sont bien différentes de celles des régions tropicales ?

— Joep Van Der Zanden : Exactement. Dans les zones tropicales, on a souvent des vagues plus faibles, mais des événements climatiques plus extrêmes comme les ouragans. La mer du Nord a ses propres spécificités, et il ne faut pas faire de comparaisons trop directes.

La profondeur de l'eau est aussi un facteur clé. Ancrer une structure en eau peu profonde est très différent d'un ancrage en eau profonde. Il faut également garantir l'intégrité structurelle de la plateforme, notamment si des personnes y vivent ou y travaillent. L'accessibilité est un autre point important : il faut évaluer dans quelles conditions météorologiques on peut accéder à la structure en toute sécurité. Les normes applicables aux navires s'appliquent souvent ici aussi.

— Moi : D'accord. Et comment détermine-t-on la flexibilité nécessaire pour les chaînes d'ancrage ? Quelle marge de mouvement est généralement prévue ?

— Joep Van Der Zanden : Nous utilisons souvent des systèmes d'ancrage en chaîne caténaire – ce sont des systèmes bien établis. Par exemple, nous les avons utilisés dans le projet Space@Sea. Je peux vous envoyer une vidéo à ce sujet.

Quand la plateforme ou la ville flottante augmente en taille, les charges dues aux vagues et au vent augmentent également, ce qui nécessite plus de chaînes d'ancrage. Cela entraîne aussi un certain déplacement lent de la structure à l'horizontale.

— Moi : Quel type de mouvement est acceptable dans ce cas ? Trop peu de mouvement endommage les chaînes, mais trop de mouvement nuit à la stabilité, non ?

— Joep Van Der Zanden : Oui, tout à fait. Un mouvement trop important rend l'usage inconfortable, voire impraticable. Cela complique aussi l'accès par bateau. C'est pourquoi on définit des limites aux « excursions » (c'est-à-dire les déplacements de la plateforme).

Il n'y a pas de chiffres universels, mais il existe bien des limites, notamment en ce qui concerne l'accélération maximale avant que les personnes ne ressentent le mal de mer. Le projet Space@Sea contient probablement des directives spécifiques à ce sujet.

— Moi : Merci. Et donc, quels systèmes structurels étudiez-vous le plus souvent ? Par exemple, caissons en béton, structures en nid d'abeille, poutres croisées ?

— Joep Van Der Zanden : En réalité, dans notre recherche, nous ne nous concentrons pas tant sur les matériaux ou les systèmes structurels en eux-mêmes. Nous nous intéressons plutôt à la manière dont la structure interagit avec l'eau – la répartition des masses, le centre de gravité, les dimensions globales, etc. Le choix du matériau est souvent secondaire dans notre approche.

— Moi : Je comprends. Quelles leçons tirez-vous des projets passés ? En quoi influencent-elles vos recommandations pour les projets futurs ?

— Joep Van Der Zanden : Pour les applications en eaux intérieures, qui sont plus courantes, le principal défi n'est pas technique, mais juridique. Aux Pays-Bas, une maison flottante est considérée comme un navire, donc il est difficile d'obtenir un prêt hypothécaire classique, et les permis d'amarrage sont souvent temporaires, même si la maison est conçue pour rester sur place pendant plusieurs décennies.

Cette incertitude rend difficile la transition vers des quartiers ou villes flottantes. Les investisseurs hésitent à s'engager à cause de ce flou réglementaire.

En mer, les défis sont à la fois techniques et financiers. Si vous cherchez des images de « villes flottantes » en ligne, vous verrez souvent de grandes plateformes interconnectées. Ces concepts modulaires nécessitent des connecteurs très solides, et la gestion des charges sur ces connexions est complexe.

Dans le projet Space@Sea, nous avons réussi à concevoir une structure répondant à toutes les exigences techniques, mais le système d'ancrage – uniquement les chaînes en acier – était extrêmement coûteux.

C'est pourquoi, dans le cadre du projet Floating Future, nous nous orientons vers des plate-formes plus petites et plus compactes, similaires à celles utilisées dans l'industrie pétrolière et gazière, avec des zones d'hébergement et des fonctions comme l'aquaculture ou la culture d'algues. C'est plus pratique et plus économique.

— Moi : C'est logique. Avez-vous des lectures ou des sources à recommander pour mon mémoire ?

— Joep Van Der Zanden : Oui, le site du projet SETSEA contient plusieurs rapports intéressants – je peux vous envoyer le lien. Vous avez aussi mentionné certains projets de villes flottantes : leurs publications peuvent vous être utiles. Un article récent dans la revue Nature traite aussi du sujet et pourrait vous servir de référence. Je vous le transmettrai également.

— Moi : Merci. Dernière question : comment détermine-t-on la distance optimale entre la côte et un hub offshore ? Est-ce seulement une question de profondeur ?

— Joep Van Der Zanden : La profondeur est effectivement un critère, mais il y a d'autres facteurs. Par exemple, la logistique reste beaucoup plus simple et moins chère près des côtes. Mais à mesure que les parcs éoliens s'éloignent en mer, les coûts de transport des matériaux et des personnes augmentent.

À un certain moment, il devient plus rentable de loger les travailleurs en mer – comme dans l'industrie pétrolière, où les employés restent plusieurs semaines offshore avant de revenir.

Donc oui, une plus grande distance peut devenir économiquement viable, en fonction des besoins logistiques et du type de projet.

— Moi : Merci beaucoup pour votre temps !

4.3.2 Inteview de Koen Olthuis (Waterstudio), 2025

4.3.2.1 Retranscription en langue originale

Thank you for your thoughtful questions and for including Waterstudio in your thesis research. I'm pleased to see your interest in floating cities from both structural and multicultural perspectives — it's exactly this interdisciplinary lens that the future of resilient urbanism requires. Below are my responses :

1. Does the floating nature of a city allow for greater architectural freedom, or does it introduce new limitations ? Floating architecture offers enormous freedom in terms of layout and growth. Traditional cities are bound by fixed grids and land use ; floating cities can reorganize, expand, and adapt. That said, they come with new parameters — balance, weight distribution, and movement — which architects must respect. In a way, it's like shifting from brick-and-mortar to living, dynamic infrastructure. So yes, freedom exists, but it comes with a new rulebook.

2. What kind of flexibility should be considered in mooring systems to ensure resilience to sea level rise and lateral movement ? We design mooring systems that allow for vertical adaptation (to follow tides or rising seas) and horizontal flexibility (to absorb wave and wind forces). Think of them like elastic anchors : they hold firm but adapt to motion. A mix of piling systems, tension cables, and elastic connectors ensures both safety and longevity. For extreme resilience, these systems should be modular and easy to relocate or upgrade over time.

3. How can public space and mobility be reimagined in a floating urban environment ? Mobility becomes multi-dimensional. In floating cities, we think in terms of slow water movement (boats, kayaks), fast electric ferries, but also modular floating walkways that act as public plazas and parks. Streets become canals ; sidewalks become boardwalks. Public space can float and be rearranged,

reflecting community needs. Even green spaces and markets can shift location, creating a kind of urban choreography that we don't yet see on land.

4. Does the concept of a "neighborhood" or "city center" still hold meaning in a floating city ? Absolutely. People still need familiarity, proximity, identity — all the ingredients of neighborhoods. Floating cities allow neighborhoods to form organically, and their clustering can be flexible. City centers may become floating hubs, perhaps anchored around ports, public functions, or cultural venues. In our projects, we often design these floating cores to attract and connect, while allowing outer neighborhoods to orbit and evolve.

5. Do floating cities become "islands" in a social sense ? Is there a risk of community isolation ? How do you envision their connection to the mainland ? This is a key challenge. Floating cities should never become gated islands — physically or socially. We design them to be porous, both digitally and physically. Seamless connections via water shuttles, bridges, or even autonomous boats are essential. But so are shared values. We emphasize shared infrastructure, cultural spaces, and community-driven design to avoid isolation. Think of floating cities as extensions of the mainland, not alternatives.

6. How relevant are floating cities as a solution to sea level rise compared to other approaches ? Would you consider them a viable alternative or more of a utopia ? Floating cities are a very real part of a layered solution. We need retreat, defense, elevation, and adaptation. Floating urbanism is that adaptation layer : not utopian, but a logical next step in coastal evolution. It's not for every place, but in delta regions, island states, and waterfront cities, it can be scalable and viable, especially if we approach it incrementally and with local ownership.

7. What are the main barriers to the realization of floating cities today—financial, political, or technical ? The biggest barriers are institutional and psychological. Technically, we can already build these cities. Politically, it's unfamiliar terrain — few policies are ready for water-based zoning. Financially, it's perceived as high-risk, although that's changing. In the end, the real hurdle is a mental shift : seeing water not as a threat, but as a space of opportunity.

8. How can local social and dietary practices be meaningfully integrated into the design of a floating city ? Great question — this is where design meets identity. We often work with local chefs, farmers, and cultural experts to integrate local food systems — floating gardens, aquaponics, seaweed farming. Architecture should reflect local materials and rituals. Spaces for communal cooking, festivals, and markets should be embedded from the start. Floating cities shouldn't erase culture ; they should float it forward.

4.3.2.2 Retranscription traduite en français

Merci pour vos questions réfléchies et pour avoir inclus Waterstudio dans votre recherche de thèse. Je suis ravi de voir votre intérêt pour les villes flottantes, tant du point de vue structurel que multiculturel — c'est précisément ce regard interdisciplinaire dont l'urbanisme résilient du futur a besoin. Voici mes réponses :

1. La nature flottante d'une ville permet-elle une plus grande liberté architecturale, ou introduit-elle de nouvelles limitations ?
L'architecture flottante offre une immense liberté en matière de disposition et de croissance. Les villes traditionnelles sont contraintes par des grilles fixes et l'usage du sol ; les villes flottantes peuvent se réorganiser, s'étendre et s'adapter. Cela dit, elles obéissent à de nouveaux paramètres (équilibre, répartition des masses et mouvements) que les architectes doivent respecter. C'est un peu comme passer de la brique à une infrastructure vivante et dynamique. Donc oui, il y a une liberté, mais elle vient avec un nouveau règlement du jeu.

2. Quel type de flexibilité doit être envisagé dans les systèmes d'amarrage pour assurer une résilience face à l'élévation du niveau de la mer et aux mouvements latéraux ?
Nous concevons des systèmes d'amarrage qui permettent une adaptation verticale (pour suivre les marées ou la montée des eaux) et une flexibilité horizontale (pour absorber les forces du vent et des vagues). Imaginez-les comme des ancres élastiques : elles maintiennent, mais s'adaptent au mouvement. Un mélange de pieux, câbles de tension et connecteurs élastiques assure à la fois sécurité et durabilité. Pour une résilience maximale, ces systèmes doivent être modulaires et facilement déplaçables ou évolutifs avec le temps.

3. Comment peut-on réimaginer l'espace public et la mobilité dans un environnement urbain flottant ?
La mobilité devient multidimensionnelle. Dans les villes flottantes, on pense en termes de déplacements lents sur l'eau (bateaux, kayaks), de ferries électriques rapides, mais aussi de passerelles flottantes modulaires qui servent de places publiques et de parcs. Les rues deviennent des canaux ; les trottoirs, des promenades. L'espace public peut flotter et être réarrangé selon les besoins des communautés. Même les espaces verts et les marchés peuvent changer d'emplacement, créant une sorte de chorégraphie urbaine qu'on ne voit pas encore sur la terre ferme.

4. Le concept de « quartier » ou de « centre-ville » a-t-il encore un sens dans une ville flottante ?
Absolument. Les gens ont toujours besoin de repères, de proximité, d'identité — tous les ingrédients des quartiers. Les villes flottantes permettent aux quartiers de se former de manière organique, avec une configuration flexible. Les centres-villes peuvent devenir des pôles flottants, peut-être ancrés autour de ports, de fonctions publiques ou de lieux culturels. Dans nos projets, nous concevons souvent ces noyaux flottants pour attirer et connecter, tout en laissant les quartiers périphériques évoluer autour.

5. Les villes flottantes deviennent-elles des « îles » au sens social ? Y a-t-il un risque d'isolement communautaire ? Comment envisagez-vous leur lien avec la terre ferme ?
C'est un enjeu majeur. Les villes flottantes ne doivent jamais devenir des îles fermées — ni physiquement, ni socialement. Nous les concevons comme des lieux poreux, autant physiquement que numériquement. Des connexions fluides via navettes aquatiques, ponts ou même bateaux autonomes sont essentielles. Mais il faut aussi des valeurs partagées. Nous mettons l'accent sur les infrastructures communes, les espaces culturels et la conception participative pour éviter l'isolement. Pensez aux villes flottantes comme à des extensions du continent, pas comme des alternatives.

6. Quelle est la pertinence des villes flottantes face à la montée du niveau de la mer par rapport à d'autres approches ? Sont-elles une alternative viable ou une utopie ?
Les villes flottantes font partie d'une solution en couches. Il faut du recul, de la défense, de l'élévation et de l'adaptation. L'urbanisme flottant est cette couche d'adaptation : ce n'est pas une utopie, mais une étape logique de l'évolution côtière. Ce n'est pas une solution universelle, mais dans les régions deltaïques, les États insulaires et les villes littorales, c'est une approche évolutive et potentiellement viable, surtout si elle est mise en œuvre de manière progressive et avec un ancrage local.

7. Quels sont les principaux obstacles à la réalisation de villes flottantes aujourd'hui — financiers, politiques ou techniques ?
Les plus grands obstacles sont institutionnels et psychologiques. Techniquement, nous savons déjà construire ces villes. Politiquement, c'est un terrain nouveau — peu de réglementations sont adaptées à l'urbanisme sur l'eau. Financièrement, c'est perçu comme risqué, bien que cette perception évolue. En fin de compte, le vrai blocage est mental : voir l'eau non comme une menace, mais

comme une opportunité.

8. Comment les pratiques sociales et alimentaires locales peuvent-elles être intégrées de manière significative dans la conception d'une ville flottante ?
Excellente question — c'est là que le design rencontre l'identité. Nous collaborons souvent avec des chefs locaux, des agriculteurs et des experts culturels pour intégrer les systèmes alimentaires locaux — jardins flottants, aquaponie, culture d'algues. L'architecture doit refléter les matériaux et les rituels locaux. Les espaces pour la cuisine collective, les fêtes et les marchés doivent être intégrés dès le départ. Les villes flottantes ne doivent pas effacer la culture ; elles doivent la faire flotter vers l'avenir.

4.4 Étude structurelle du caisson

4.4.1 Définition des dimensions du caisson en béton

1. Charges permanentes

- **Poids des bâtiments**
  Il est adopté une charge uniformément répartie de

$$q_{\text{bâtiment}} = 100 \text{ kg/m}^2.$$

  Avec une emprise au sol maximale (dépendant de la forme du bâti choisie) de

$$A_{\text{sol}} = 10\,000 \text{ m}^2$$

  et 7 niveaux (avec parois externe et plancher), il est obtenu après multiplication par la gravité :

$$Q_{\text{bâtiment}} = q_{\text{bâtiment}} \cdot (A_{\text{sol}} \cdot 7 + A_{\text{façades}}) \cdot g \approx 7,84 \cdot 10^4 \text{ kN}, \quad \text{Poids des bâtiments sur la structure} \tag{4.1}$$

- **Poids du caisson**
  Le béton a une masse volumique de

$$\rho_{\text{béton}} = 2500 \text{ kg/m}^3.$$

  Afin de connaître le volume par lequel multiplier cette masse volumique, il est nécessaire de procéder par itération, car les dimensions du caisson sont influencées par le volume immergé nécessaire à la poussée d'Archimède. La poussée d'Archimède, qui est elle-même influencée par les charges s'appliquant car le but est de les contrebalancer. Après itérations pour déterminer la hauteur totale du caisson : $h_{\text{tot,caisson}} = 23$ m dont $h_{\text{immergée}} = 15$ m, Il est calculé :

  Le volume des parois verticales

$$V_{\text{murs}} = 6 \cdot h_{\text{tot,caisson}} \cdot e_{\text{caisson}} \cdot a,$$

  Le volume des parties inférieures et supérieures de la plateforme

$$V_{\text{plateformes}} = 2 \cdot A_{\text{plateforme}} \cdot e_{\text{caisson}},$$

  Le volume interne servant de diaphragme

$$V_{\text{diaphragmes}} = 0,1 \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2} a^2 \, h_{\text{tot,caisson}} = 3,36 \cdot 10^4 \text{ m}^3,$$

  Le volume total de béton

$$V_{\text{total,caisson}} = V_{\text{murs}} + V_{\text{plateformes}} + V_{\text{diaphragmes}} = 5,52 \cdot 10^4 \text{ m}^3,$$

  Le poids total du caisson

$$Q_{\text{caisson}} = \rho_{\text{béton}} \cdot V_{\text{total,caisson}} \cdot g \approx 1,34 \cdot 10^6 \text{ kN}.$$

2. Charges variables

- **Usage public (commerces de détail, plateforme RDC destinée à un usage publique ne présentant pas d'obstacle à la circulation de personnes)**
  Selon CEN (2002), il est pris $q_{\text{public}} = 5$ kN/m^2. La force correspondante vaut

$$Q_{\text{public}} = q_{\text{public}} \cdot A_{\text{plateforme}} \cdot g \approx 7,31 \cdot 10^4 \text{ kN}.$$

- **Exploitation résidentielle**
  D'après CEN (2002), $q_{\text{résidentielle}} = 2$ kN/m^2. Soit

$$Q_{\text{résidentielle}} = A_{\text{sol}} \cdot (n_{\text{étages}} - 1) \cdot q_{\text{résidentielle}} \approx 1,2 \cdot 10^5 \text{ kN}.$$

- **Stockage**
  On retient $q_{\text{stockage}} = 7{,}5$ kN/m^2, appliqué sur 25 % de la plateforme :

$$Q_{\text{stockage}} = q_{\text{stockage}} \cdot A_{\text{plateforme}} \cdot 0{,}25 \approx 2,74 \cdot 10^4 \text{ kN}.$$

- **Neige**
  La charge de la neige est prise sur toute la superficie de la plateforme. Avec $q_{\text{neige}} = 0{,}5$ kN/m^2, on obtient

$$Q_{\text{neige}} = q_{\text{neige}} \times A_{\text{plateforme}} \approx 7,3 \cdot 10^3 \text{ kN}.$$

3. Cas de charges

On combine ces actions à l'aide des coefficients Ψ_i de l'eurocode 1 CEN (2002) :

Tableau 4.1 – Coefficient de combinaison (CEN, 2002).

Action	$\Psi 0$	Ψ_1	Ψ_2
Exploitation résidentielle	0,7	0,5	0,3
Aire de shopping	0,7	0,7	0,6
Espace de stockage	1	0,9	0,8
Neige	0,5	0,2	0

Le cas le plus défavorable (cas 1) correspond aux charges d'exploitation résidentielle considérées comme action principale. La charge totale s'élève à :

$$P_{\text{totale, cas 1}} \approx 2,211 \cdot 10^6 \text{ kN}.$$

Tableau 4.2 – Répartition des coefficients dans chaque cas de charge.

Cas	Q_{perm}	Résidentiel	Public	Neige	Stockage	P_{totale} (kN)
1	1,35	1,5	$1,5\,\Psi_0$	$1,5\,\Psi_0$	$1,5\,\Psi_0$	2 211 457,53
2	1,35	$1,5\,\Psi_0$	1,5	$1,5\,\Psi_0$	$1,5\,\Psi_0$	2 190 339,44
3	1,35	$1,5\,\Psi_0$	$1,5\,\Psi_0$	1,5	$1,5\,\Psi_0$	2 162 937,85
4	1,35	$1,5\,\Psi_0$	$1,5\,\Psi_0$	$1,5\,\Psi_0$	1,5	2 157 457,53

4. Dimensionnement

Pour garantir la flottabilité de la structure, la poussée d'Archimède doit équilibrer la charge totale la plus défavorable, notée $P_{\text{totale, cas 1}} \approx 2,211 \cdot 10^6$ kN. Étant donné que la surface de la plateforme $A_{\text{plateforme}}$ est fixée, c'est la hauteur immergée $H_{\text{immergé}}$ qui s'ajuste pour obtenir cet équilibre. Comme la hauteur immergée modifie le volume et donc le poids du caisson, on met en place une boucle itérative : on suppose une $H_{\text{immergé}}$, on calcule le volume et le poids du caisson, on reconstitue P_{totale} et on ajuste $H_{\text{immergé}}$ jusqu'à convergence.

Le volume immergé nécessaire est directement obtenu en équilibrant la poussée et la charge :

$$V_{\text{immergé,caisson}} = \frac{P_{\text{totale}}}{\rho_{\text{eau}}} \quad \longrightarrow \quad \text{Volume immergé du caisson} \tag{4.2}$$

avec $\rho_{\text{eau}} = 10{,}25$ kN/m^3.

En divisant ce volume par la surface de la plateforme, on obtient la hauteur immergée :

$$H_{\text{immergé}} = \frac{V_{\text{immergé,caisson}}}{A_{\text{plateforme}}} = 15\text{m} \quad \longrightarrow \quad \text{Tirant d'eau du caisson} \tag{4.3}$$

4.4.2 Vérification de la flottabilité

On choisit pour origine du calcul (point K = (0 ;0)) la position la plus basse de la structure.

Calcul de $\overline{KG}$

La distance verticale KG se calcule par moyenne pondérée des forces et de leurs hauteurs :

$$\overline{KG} = \frac{\sum_i (F_i \cdot z_i)}{P_{\text{totale}}} = 11,34\text{m} \quad \longrightarrow \quad \text{Position du centre de gravité} \tag{4.4}$$

où F_i est chaque charge (poids des bâtiments, du caisson, etc.) et z_i sa distance verticale depuis K.

Position du centre de flottaison B

Il faut également déterminer la position du centre de flottaison, B se trouve à mi-hauteur immergée :

$$\overline{KB} = \frac{H_{\text{immergé}}}{2} = 7,5\text{m} \quad \longrightarrow \quad \text{Position du centre de flottaison} \tag{4.5}$$

Métacentrique $\overline{BM}$

La hauteur métacentrique $\overline{BM}$ s'obtient à partir de l'inertie I de la surface de flottaison et du volume immergé :

$$\overline{BM} = \frac{I}{V_{\text{immergé,caisson}}} = 4,15 \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \text{Bras métacentrique} \tag{4.6}$$

avec

$$I = \frac{5\sqrt{3}\, a^4}{16} - \frac{5\sqrt{3}\,(a-2e)^4}{16} = 8,95 \cdot 10^5 \text{ m}^4 \quad \longrightarrow \quad \text{Inertie du caisson} \tag{4.7}$$

où a est le côté de l'hexagone et e l'épaisseur des parois (REZMAT. s.d.).

Calcul de $\overline{KM}$ et de la marge de stabilité $\overline{GM}$

$$\overline{KM} = \overline{KB} + \overline{BM} = 11,65\text{m} \quad \longrightarrow \quad \text{Position du métacentre} \tag{4.8}$$

$$\overline{GM} = \overline{KM} - \overline{KG} = 0,303\text{m} \quad \longrightarrow \quad \text{Distance métacentre–centre de gravité} \tag{4.9}$$

Un $\overline{GM} > 0$ garanti la stabilité initiale. Il est également nécessaire de vérifier :

$$\overline{KG} - \overline{KB} = 3,846\text{m} > 0 \quad \longrightarrow \quad \text{Le centre de gravité reste supérieur au centre de flottaison} \tag{4.10}$$

4.4.3 Codes modélisation numérique

4.4.3.1 En conditions de faible houle

Géométrie et propriétés

$b = \sqrt{3} \times 75 \approx 129.9$ m	Largeur du caisson
$L = b$	Longueur considérée
$n = 200$	Nombre d'éléments de discrétisation
$\gamma_{\text{eau}} = 10200$ N/m^3	Poids volumique de l'eau
$k = \gamma_{\text{eau}}\, b$	Raideur de la fondation élastique [N/m^3]
$h = 23$ m	Hauteur du caisson
$t = 0.5$ m	Épaisseur des parois
$I = \dfrac{b\,h^3 - (b-2t)\,(h-2t)^3}{12}$	Moment d'inertie
$E = 3 \times 10^{10}$ Pa	Module de Young
$EI = E\,I$	Rigidité flexionnelle [N·m^2]

Charges

$p_0 = -154070.07 \times b$	Charge répartie uniforme [N/m]
$x_i = i\,\Delta x, \quad \Delta x = \dfrac{L}{n} \quad (i = 0, \ldots, n)$	
$p_i = p_0\,\Delta x$	

Paramètres des vagues

$A = 2$ m	Amplitude
$\lambda = 78$ m	Longueur d'onde
$k_w = \dfrac{2\pi}{\lambda}$	Nombre d'onde
$T = 7$ s	Période
$v = \dfrac{\lambda}{T}$	Vitesse de propagation
$\omega = k_w\, v$	Pulsation
$z_{\text{top}} = 8$ m, $\quad z_{\text{base}} = z_{\text{top}} - h$	

Interaction vague–caisson

$$z_w(x,t) = A\,\sin\big(k_w\,x - \omega\,t\big) \qquad \text{Ligne de flottaison}$$
$$\Delta z(x,t) = \max\big(z_w(x,t) - z_{\text{base}},\,0\big) \qquad \text{Immersion}$$
$$\Delta F(x,t) = \gamma_{\text{eau}}\,\Delta z(x,t)\,b \qquad \text{Force verticale [N/m]}$$
$$p^{\text{tot}}(x,t) = p(x) + \Delta F(x,t)\,\Delta x$$

Équation de la poutre sur fondation élastique

$$E I\,\frac{\mathrm{d}^4 w}{\mathrm{d}x^4}(x,t) \;+\; k\,w(x,t) = p^{\text{tot}}(x,t) \qquad \text{Équilibre de la poutre}$$
$$M(x,t) = -\,E I\,\frac{\mathrm{d}^2 w}{\mathrm{d}x^2}(x,t) \qquad \text{Moment fléchissant}$$

4.4.3.2 Avec charge ponctuelle à l'extrémité

Géométrie et propriétés

$$b = \sqrt{3}\times 75 \approx 129.9\ \text{m} \qquad \text{Largeur de la poutre}$$
$$L = b \qquad \text{Longueur considérée}$$
$$n = 200 \qquad \text{Nombre d'éléments de discrétisation}$$
$$\gamma_{\text{eau}} = 10200\ \text{N/m}^3 \qquad \text{Poids volumique de l'eau}$$
$$k = \gamma_{\text{eau}}\,b \qquad \text{Raideur de la fondation élastique [N/m}^3\text{]}$$
$$h = 23\ \text{m} \qquad \text{Hauteur du caisson}$$
$$t = 0.5\ \text{m} \qquad \text{Épaisseur des parois}$$
$$I = \frac{b\,h^3 - (b-2t)\,(h-2t)^3}{12} \qquad \text{Moment d'inertie}$$
$$E = 3\times 10^{10}\ \text{Pa} \qquad \text{Module de Young}$$
$$EI = E\,I \qquad \text{Rigidité flexionnelle [N·m}^2\text{]}$$

Charges

$$p_0 = -154070.07\times b \qquad \text{Charge répartie uniforme [N/m]}$$
$$P_2 = -10\cdot 2\cdot 10^5\cdot 0, \quad x_2 = 0.95\,L \qquad \text{Charge ponctuelle à 95\% de } L$$
$$x_i = i\,\Delta x, \quad \Delta x = \frac{L}{n} \quad (i = 0,\ldots,n)$$
$$p_i = p_0\,\Delta x + \frac{P_2}{\Delta x}\,\delta_{i,i_2}$$

Paramètres des vagues

$A = 2$ m	Amplitude
$\lambda = 78$ m	Longueur d'onde
$k_w = \dfrac{2\pi}{\lambda}$	Nombre d'onde
$T = 7$ s	Période
$v = \dfrac{\lambda}{T}$	Vitesse de propagation
$\omega = k_w\, v$	Pulsation
$z_{\text{top}} = 8$ m, $\quad z_{\text{base}} = z_{\text{top}} - h$	

Interaction vague–caisson

$z_w(x,t) = A\,\sin\big(k_w\,x - \omega\,t\big)$	Ligne de flottaison
$\Delta z(x,t) = \max\big(z_w(x,t) - z_{\text{base}},\,0\big)$	Immersion
$\Delta F(x,t) = \gamma_{\text{eau}}\,\Delta z(x,t)\,b$	Force verticale [N/m]
$p^{\text{tot}}(x,t) = p(x) + \Delta F(x,t)\,\Delta x$	

Équation de la poutre sur fondation élastique

$E I\,\dfrac{\mathrm{d}^4 w}{\mathrm{d}x^4}(x,t) \;+\; k\,w(x,t) = p^{\text{tot}}(x,t)$	Équilibre du caisson (Winkler)
$M(x,t) = -\,E I\,\dfrac{\mathrm{d}^2 w}{\mathrm{d}x^2}(x,t)$	Moment fléchissant

4.4.3.3 Reliés avec des rotules ou connecteurs rigides

Géométrie et propriétés

$b = \sqrt{3} \times 75 \approx 129.9$ m	Largeur de la poutre
$L = b$	Longueur d'un module
$N_{\text{mod}} = 10$	Nombre de modules
$L_{\text{tot}} = L\,N_{\text{mod}}$	Longueur totale de la poutre
$n_{\text{tot}} = 3000$	Nombre de points de discrétisation
$\gamma_{\text{eau}} = 10200$ N/m^3	Poids volumique de l'eau
$k = \gamma_{\text{eau}}\,b$	Raideur de la fondation élastique
$h = 23$ m	Hauteur du caisson
$t = 0.5$ m	Épaisseur des parois
$I = \dfrac{b\,h^3 - (b-2t)\,(h-2t)^3}{12}$	Moment d'inertie
$E = 3 \times 10^{10}$ Pa	Module de Young
$EI = E\,I$	Rigidité en flexion

Discrétisation et charges initiales

$$x_i = i\,\Delta x, \quad \Delta x = \frac{L_{\text{tot}}}{n_{\text{tot}}}, \quad i = 0, \ldots, n_{\text{tot}}$$

$p_0 = -154070.07 \times b$ — Charge répartie uniforme [N/m]

$p_i = p_0\,\Delta x$ — Charge répartie sur chaque segment

Paramètres de la houle

$A = 2$ m — Amplitude de la vague

$\lambda = 78$ m — Longueur d'onde

$k_w = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ — Nombre d'onde

$v = 5$ m/s — Vitesse

$\omega = k_w\, v$ — Pulsation

$z_{\text{top}} = 8$ m, $\quad z_{\text{base}} = z_{\text{top}} - h$ — Profondeur du caisson dans l'eau

Interaction houle–poutre

$z_w(x,t) = A\,\sin(k_w\,x - \omega\,t)$ — Hauteur de la surface libre

$\Delta z(x,t) = \max(z_w(x,t) - z_{\text{base}},\, 0)$ — Profondeur immergée

$\Delta F(x,t) = \gamma_{\text{eau}}\,\Delta z(x,t)\,b$ — Force surfacique

$p^{\text{tot}}(x,t) = p(x) + \Delta F(x,t)\,\Delta x$ — Charge totale sur la poutre

Charnières modulaires

$$n_{\text{modul}} = \frac{n_{\text{tot}}}{N_{\text{mod}}} \quad \Rightarrow \quad \text{indices des charnières : } i_{\text{hinge},j} = n_{\text{modul}} \cdot (j+1), \quad j = 0, \ldots, N_{\text{mod}} - 2$$

Équation de la poutre sur fondation élastique

$$EI\,\frac{\mathrm{d}^4 w}{\mathrm{d}x^4}(x,t) \;+\; k\,w(x,t) = p^{\text{tot}}(x,t) \qquad \text{Équation d'équilibre}$$

$$M(x,t) = -\,EI\,\frac{\mathrm{d}^2 w}{\mathrm{d}x^2}(x,t) \qquad \text{Moment fléchissant}$$

4.4.4 Résultats modélisations numériques

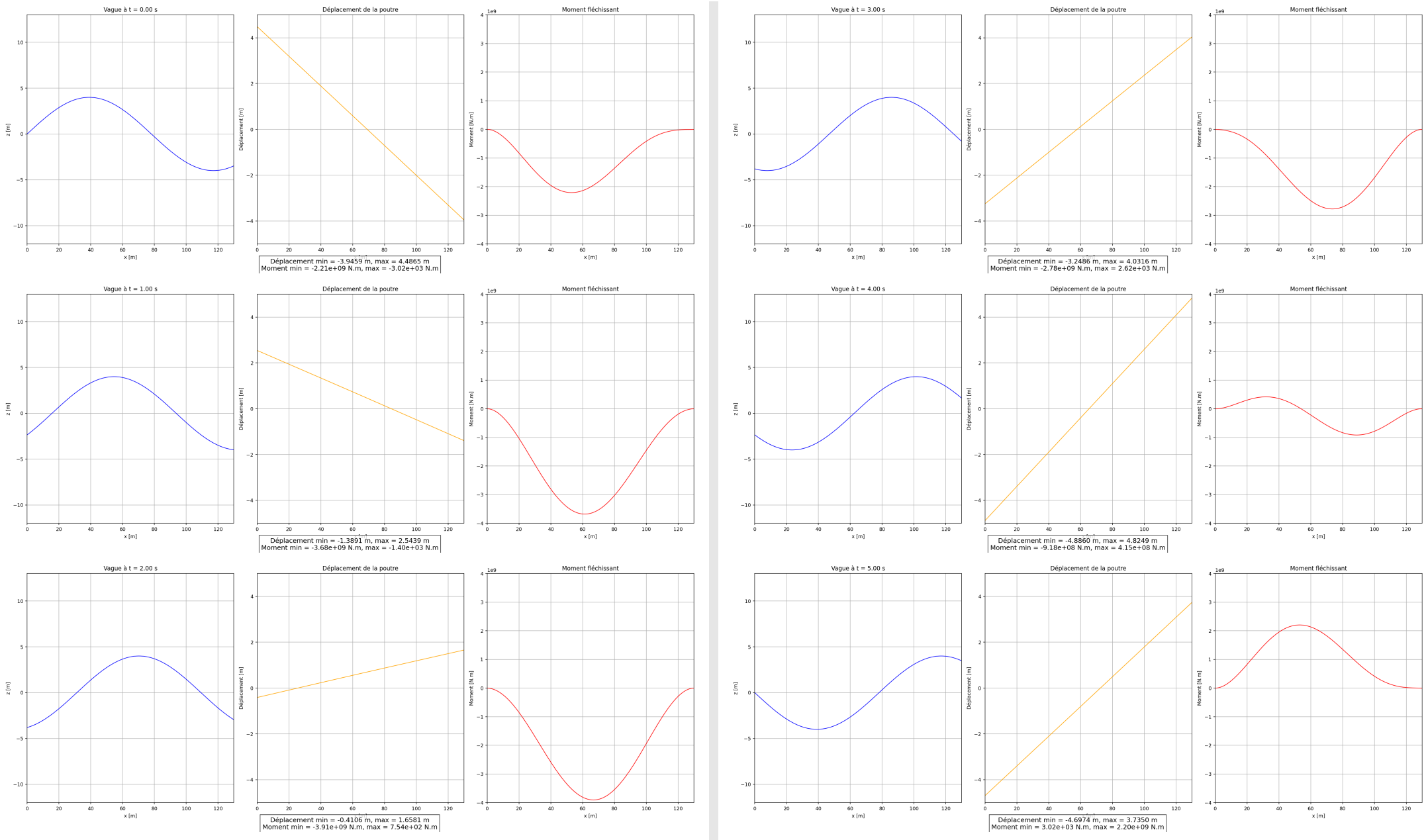


Figure 4.1 – Structure sur vagues de 8 m d'hauteur

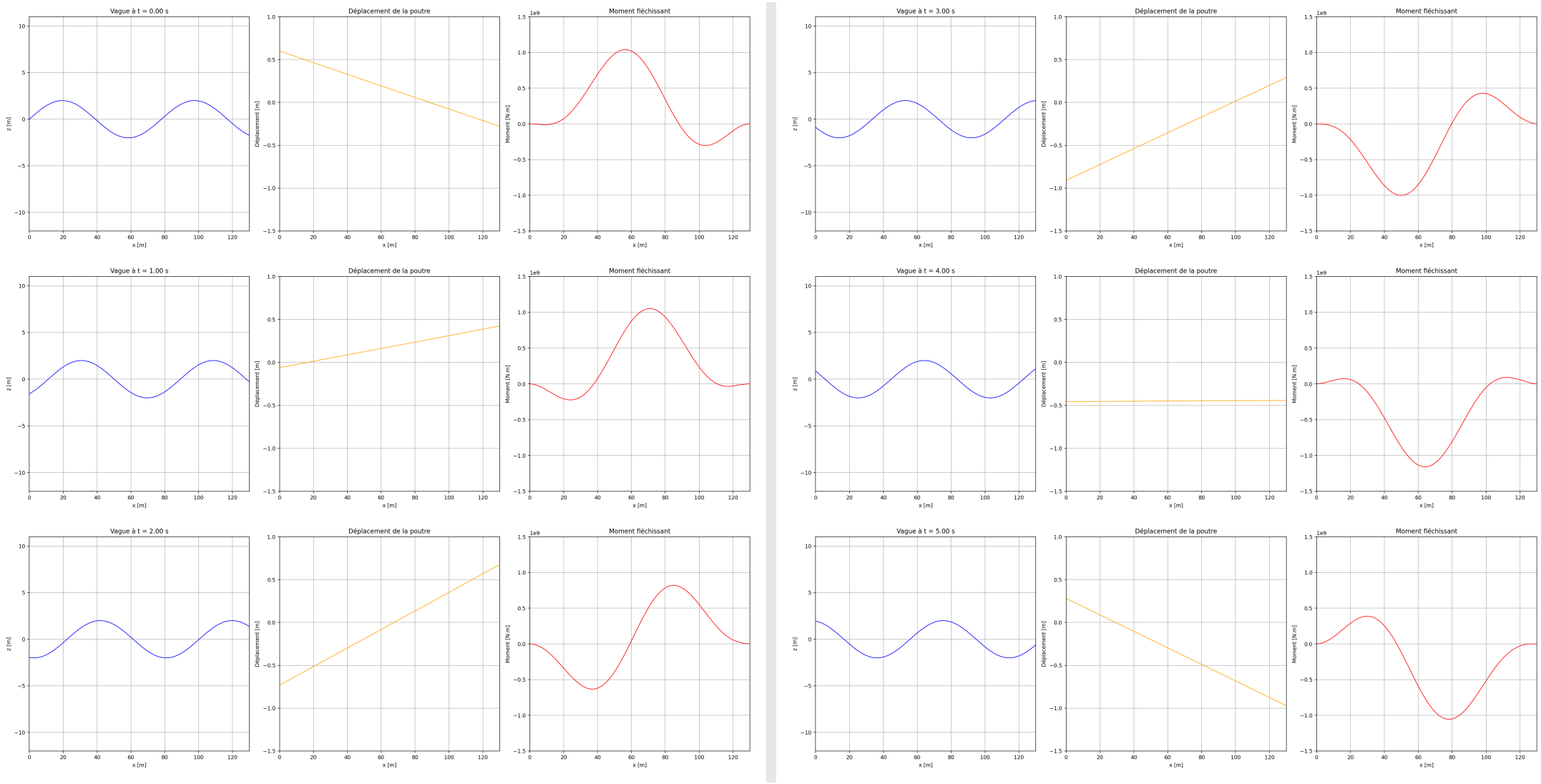


Figure 4.2 – Structure avec chargement ponctuel sur l'extrémité de la plateforme

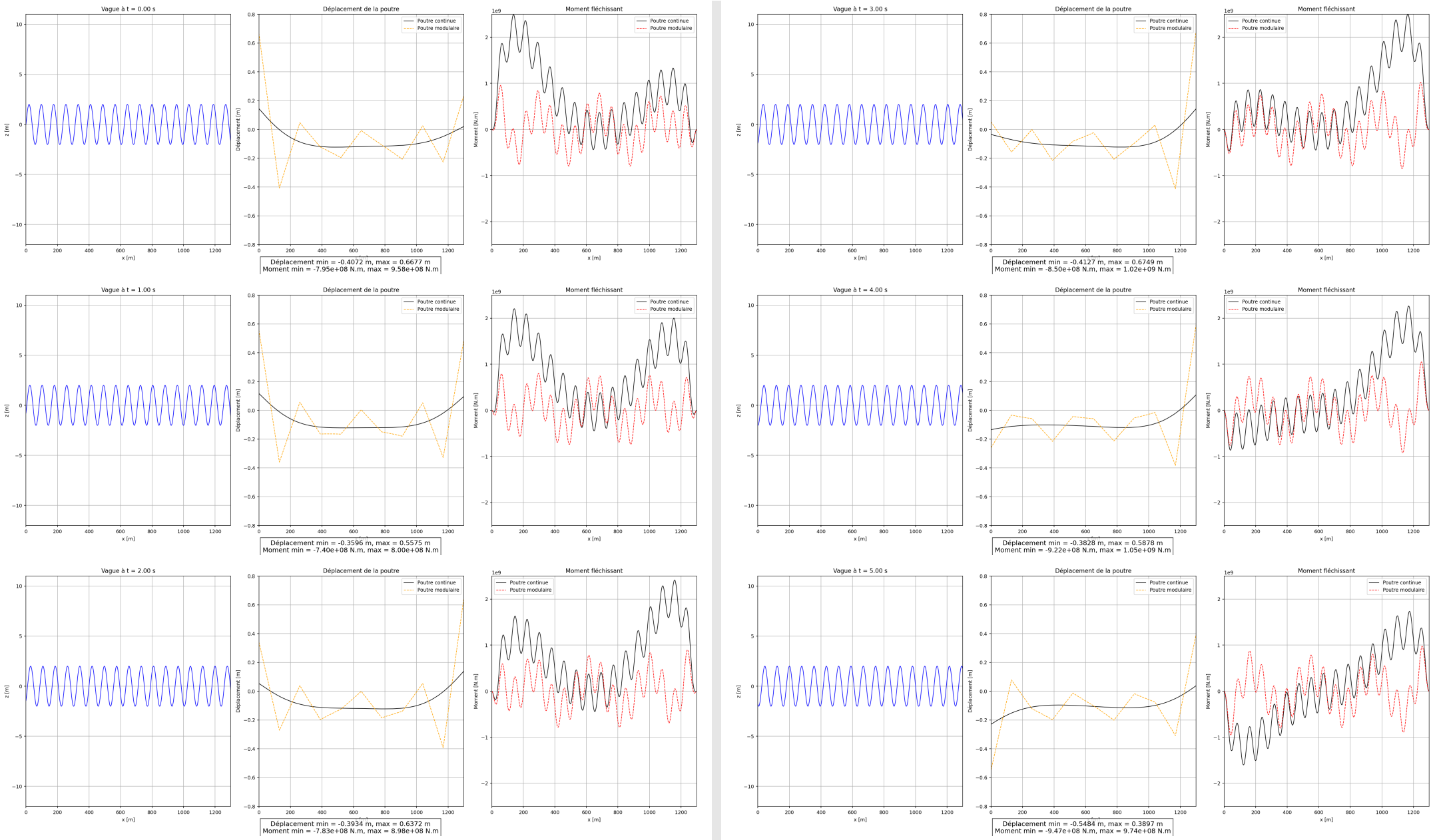


Figure 4.3 – Ville de 10 000 habitants en caissons : comparaison connecteurs rigides et rotulés

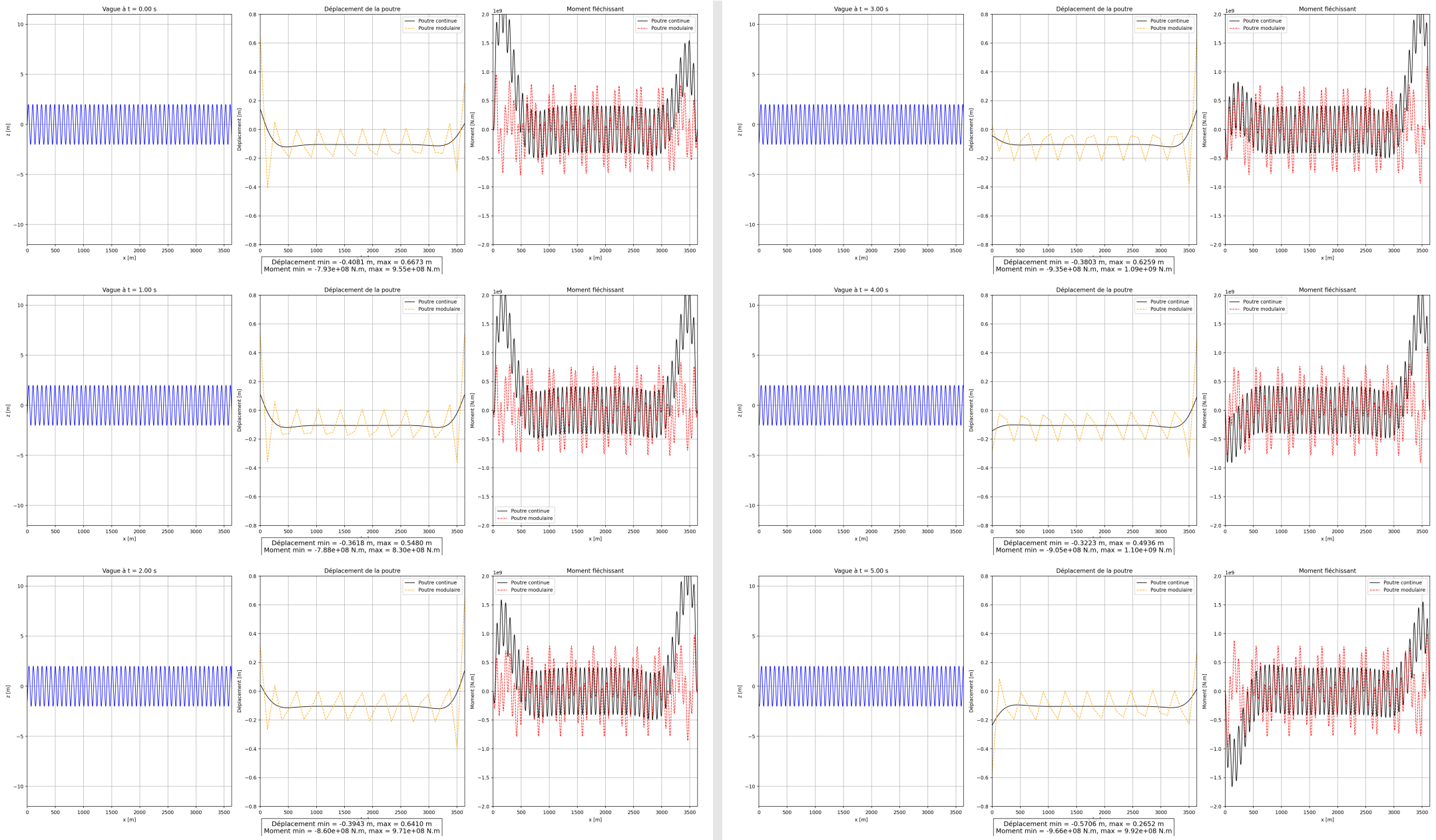


Figure 4.4 – Ville de 60 000 habitants en caissons : comparaison connecteurs rigides et rotulés

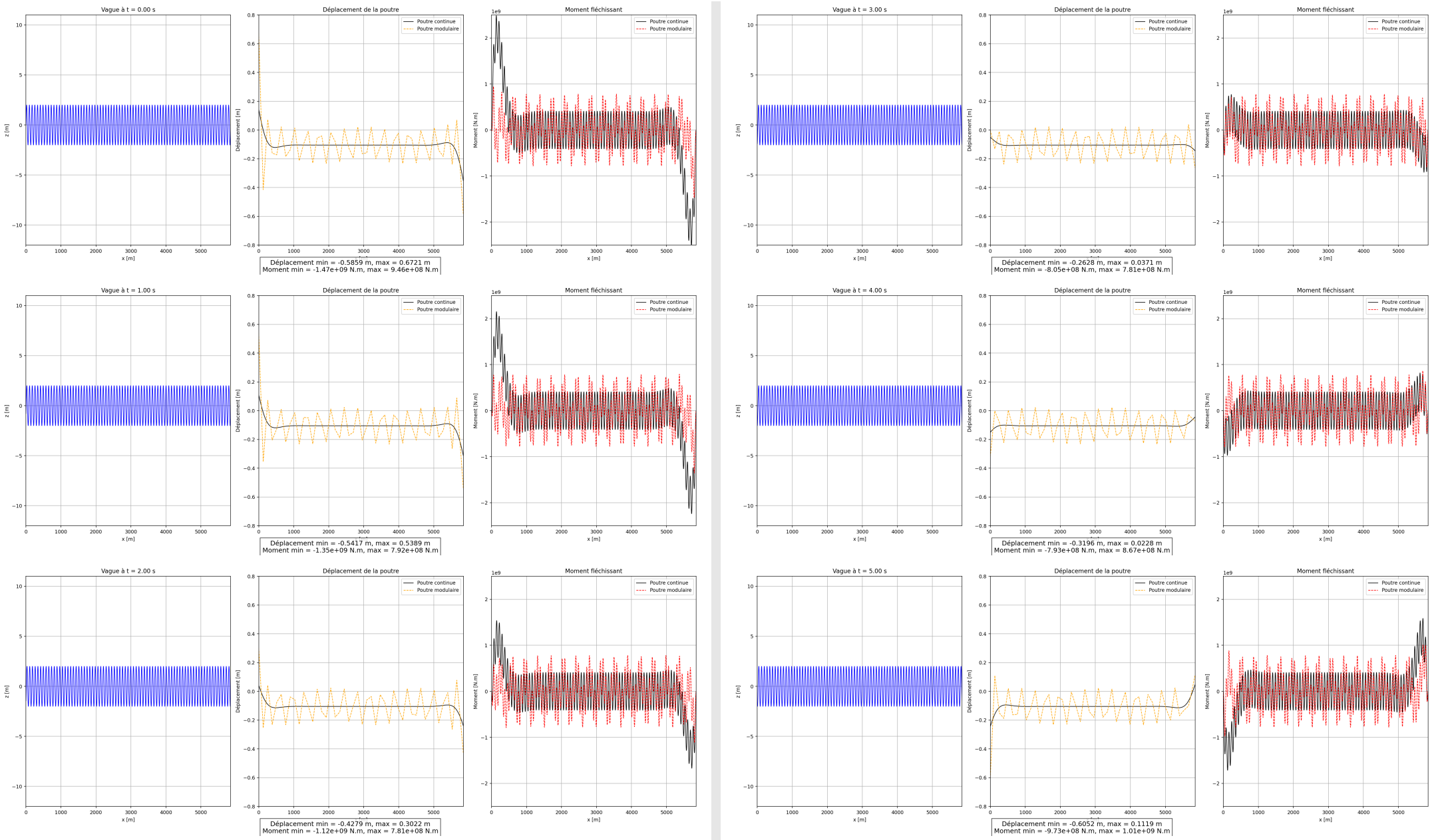


Figure 4.5 – Ville de 1 000 000 habitants en caissons : comparaison connecteurs rigides et rotulés

4.4.5 Calcul du Moment de résistance (M_{Rd}) dans le caisson en béton

Script Python

2. Propriétés des matériaux

$$f_{ck} = 45 \text{ MPa}, \qquad f_{cm} = f_{ck} + 8,$$
$$E_b = 22\,000 \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \text{ MPa}, \quad f_{ctm} = 0{,}33\sqrt{f_{cm}} \text{ MPa},$$
$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}, \qquad E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa},$$

3. Géométrie de la poutre en I

$$h = 2{,}3 \cdot 10^4 \text{ mm}, \qquad b_f = 1{,}299 \cdot 10^5 \text{ mm},$$
$$t_f = 500 \text{ mm}, \qquad t_w = 10^3 \text{ mm},$$
$$L = 1{,}299 \cdot 10^5 \text{ mm}.$$

4. Section efficace et inertie

$$A_{f,\text{sup}} = b_f\, t_f, \qquad A_{f,\text{inf}} = b_f\, t_f,$$
$$A_w = t_w\,(h - 2t_f), \qquad A_n = A_{f,\text{sup}} + A_{f,\text{inf}} + A_w.$$

Position de l'axe neutre (depuis le haut) :

$$Y_n = \frac{A_{f,\text{sup}}\,(t_f/2) + A_w\big(t_f + \frac{h-2t_f}{2}\big) + A_{f,\text{inf}}\,(h - t_f/2)}{A_n}.$$

Inertie par rapport à l'axe neutre :

$$I_{\text{sup}} = \frac{b_f\, t_f^3}{12} + A_{f,\text{sup}}\,(Y_n - \tfrac{t_f}{2})^2,$$
$$I_{\text{inf}} = \frac{b_f\, t_f^3}{12} + A_{f,\text{inf}}\,(h - \tfrac{t_f}{2} - Y_n)^2,$$
$$I_w = \frac{t_w\,(h-2t_f)^3}{12} + A_w\left(Y_n - (t_f + \tfrac{h-2t_f}{2})\right)^2,$$
$$I_y = I_{\text{sup}} + I_{\text{inf}} + I_w.$$

Module de flexion :

$$S_b = \frac{I_y}{Y_n}.$$

4. Ferraillage

$$e = 50 \text{ mm} \quad \text{Enrobage},$$
$$\phi = 28 \text{ mm} \quad \text{Diamètre barres principales},$$

Section des barres :

$$A_{\text{barre}} = \pi\big(\tfrac{\phi}{2}\big)^2, \quad A_{s_i} = n_i\, A_{\text{barre}}, \quad n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 250.$$

5. Moments appliqué

$$M_{Ed,\mathrm{ELU}} = 3{,}91 \times 10^{9}\ \mathrm{N\,mm}.$$

6. Définition de la fonction $N(x)$

$$N(x) \;=\; \sum_{i=1}^{4} F_i \;-\; F_c(x) \;=\; 0.$$

- Déformation maximale du béton : $\varepsilon_c = -3{,}5 \times 10^{-3}$.
- Positions des barres (par rapport à la face inférieure) :

$$y_1 = h - \left(e + \tfrac{\phi}{2}\right), \quad y_2 = h - \left(e + \phi + 320 + \tfrac{\phi}{2}\right),$$
$$y_3 = e + \tfrac{\phi}{2}, \qquad\qquad y_4 = e + \phi + 320 + \tfrac{\phi}{2}.$$

- Loi de déformation linéaire :

$$\varepsilon(y) = \varepsilon_c + \left(-\varepsilon_c\right)\frac{y}{x}.$$

- Loi de comportement de l'acier (limitée entre ± 500 MPa) :

$$\sigma(\varepsilon) = \max\!\big(\min(\varepsilon\, E_s,\ 500),\ -500\big).$$

- Efforts dans chaque nappe :

$$F_i = \sigma\big(\varepsilon(y_i)\big)\, A_{s_i}, \quad i = 1 \ldots 4.$$

- Effort de compression du béton, suivant x :

$$F_c(x) = \begin{cases} b_f\, x\, 0{,}8\, f_{ck}, & x \le t_f, \\ b_f\, t_f\, 0{,}8\, f_{ck} \;+\; t_w\,(x - t_f)\, 0{,}8\, f_{ck}, & x > t_f. \end{cases}$$

7. Recherche de la racine

La racineest est déterminée sur l'intervalle $[\,10,\ h - 10\,]$ pour résoudre $N(x) = 0$ et obtenir x_{sol}.

8. Calculs finaux

Avec $x = x_{\mathrm{sol}}$:

$$y_{c,\mathrm{bton}} = \begin{cases} \frac{x}{2}, & x \le t_f, \\ \dfrac{b_f\, t_f \cdot \frac{t_f}{2} + t_w\,(x - t_f)\cdot\left(t_f + \frac{x - t_f}{2}\right)}{b_f\, t_f + t_w\,(x - t_f)}, & x > t_f, \end{cases}$$

$$D_i = \text{bras de levier de la force } i,$$

$$M_u = \sum_{i=1}^{4} F_i\, D_i \;-\; F_c\big(h - y_{c,\mathrm{bton}}\big),$$

$$\mathrm{Ratio} = \frac{M_u}{M_{Ed,\mathrm{ELU}}},$$

$$N_{\mathrm{final}} = \sum_{i=1}^{4} F_i \;-\; F_c.$$

4.5 Étude structurelle du grillage de poutre en béton

4.5.1 Définition des dimensions des poutres

1. Charges permanentes

- **Poids des bâtiments**
  Le poids des bâtiments est le même que pour les caissons,

$$Q_{\text{bâtiment}} = q_{\text{bâtiment}} \cdot A_{\text{sol}} \cdot 7 \cdot g \approx 7,84 \cdot 10^4 \text{ kN}.$$

- **Poids de la poutre**
  Pareil que pour le caisson, après itérations la hauteur totale des poutres est : $h_{\text{tot,poutre}} = 52,29$ m dont $h_{\text{immergée}} = 44,29$ m, $l_{poutre} = 7$ m,

- **Volume des murs verticaux de la poutre principale**

$$V_{\text{murs,verticaux,poutre}} = 2 \cdot a_{\text{grillage,poutres}} \cdot h_{\text{tot,poutre}} \cdot e_{\text{poutre}}$$

- **Volume des faces horizontales de la poutre principale**

$$V_{\text{faces,horizontales,poutre}} = 2 \cdot \left(l_{\text{poutre}} - 2\, e_{\text{poutre}}\right) \cdot a_{\text{grillage,poutres}} \cdot e_{\text{poutre}}$$

- **Volume interne pour les diaphragmes du caisson**

$$V_{\text{interne,poutre,princ}} = 0,1 \cdot a_{\text{grillage,poutres}} \cdot h_{\text{tot,poutre}} \cdot e_{\text{poutre}} = 4,392 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

- **Volume externe de la poutre principale**

$$V_{\text{externe,poutre,princ}} = V_{\text{murs,verticaux,poutre}} + V_{\text{faces,horizontales,poutre}} = 4,922 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

- **Volumétrie des poutres secondaires**
  Pour une longueur de 7,125 m (distance extrémité–poutre principale) :

$$V_{\text{interne,poutre,secondaire}} = 260{,}8 \text{ m}^3, \quad V_{\text{externe,poutre,secondaire}} = 292{,}2 \text{ m}^3$$

- **Charge totale due aux poutres**
  En notant q_{bton} la charge volumique du béton, on obtient :

$$\begin{aligned} Q_{\text{poutres}} = q_{\text{bton}} \cdot \Big(& (V_{\text{interne,poutre,princ}} + V_{\text{externe,poutre,princ}}) \times 8 \\ & + 7 \times 7 \times (V_{\text{interne,poutre,secondaire}} + V_{\text{externe,poutre,secondaire}}) \Big) \\ \approx 2,54 \cdot 10^6 \text{ kN} & \end{aligned}$$

- **Poids de la dalle plateforme**
  Avec $A_{\text{plateforme,grillage,poutres}}$ l'emprise et e_{dalle} l'épaisseur :

$$Q_{\text{dalle}} = q_{\text{bton}} \cdot A_{\text{plateforme,grillage,poutres}} \cdot e_{\text{dalle}} = 1,44 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

- **Charges permanentes**

$$q_{\text{permanentes}} = Q_{\text{btiment}} + Q_{\text{poutres}} + Q_{\text{dalle}} = 2,763 \cdot 10^6 \text{ kN}$$

2. Charges variables

- **Usage public (commerces de détail, plateforme RDC destinée à un usage publique ne présentant pas d'obstacle à la circulation de personnes)**
  Selon CEN (2002), il est pris $q_{\text{public}} = 5$ kN/m^2. La force correspondante vaut

$$Q_{\text{public}} = q_{\text{public}} \cdot A_{\text{plateforme}} \cdot g \approx 7,3 \cdot 10^4 \text{ kN}.$$

- **Exploitation résidentielle**
  D'après CEN (2002), $q_{\text{résidentielle}} = 2$ kN/m^2. Soit

$$Q_{\text{résidentielle}} = A_{\text{sol}} \cdot (n_{\text{étages}} - 1) \cdot q_{\text{résidentielle}} \approx 1,2 \cdot 10^5 \text{ kN}.$$

- **Stockage**
  On retient $q_{\text{stockage}} = 7{,}5$ kN/m^2, appliqué sur 25 % de la plateforme :

$$Q_{\text{stockage}} = q_{\text{stockage}} \cdot A_{\text{plateforme}} \cdot 0{,}25 \approx 2,7 \cdot 10^4 \text{ kN}.$$

- **Neige**
  La charge de la neige est prise sur toute la superficie de la plateforme. Avec $q_{\text{neige}} = 0{,}5$ kN/m^2, on obtient

$$Q_{\text{neige}} = q_{\text{neige}} \times A_{\text{plateforme}} \approx 7\,307 \text{ kN}.$$

4.5.1.1 3. Cas de charges

Tableau 4.3 – Coefficient de combinaison (CEN, 2002).

Action	$\Psi 0$	Ψ_1	Ψ_2
Exploitation résidentielle	0,7	0,5	0,3
Aire de shopping	0,7	0,7	0,6
Espace de stockage	1	0,9	0,8
Neige	0,5	0,2	0

Le cas le plus défavorable est le cas 1 avec une force totale $P_{totale,poutre} = 4,031 \cdot 10^6 \quad kN$ (Tableau 4.4)

Tableau 4.4 – Cas de charges sur le caisson.

Cas de charge	Charges permanentes ($q_{\text{permanentes}}$)	Exploitation résidentielle ($q_{\text{résidentielle}}$)	Aire de shopping (q_{public})	Espace de stockage (q_{stockage})	Neige (q_{snow})	Valeur (kN)
Cas 1	1,35	1,5	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	4 031 045,303
Cas 2	1,35	$1,5 \cdot \Psi_0$	1,5	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	4 009 445,303
Cas 3	1,35	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	1,5	$1,5 \cdot \Psi_0$	3 982 445,303
Cas 4	1,35	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	1,5	3 977 045,303

4. Dimensionnement

Pour assurer la flottabilité de la structure, il est nécessaire que la poussée d'Archimède soit égale à la force totale (la plus défavorable) appliquée sur la plateforme :

$$P_{\text{totale, poutre}} = 4,031 \cdot 10^6 \quad kN.$$

Il faut donc déterminer le volume d'eau déplacé permettant d'équilibrer cette force. La surface de la plateforme étant fixée, c'est la hauteur de plateforme immergée (le tirant d'eau) qui doit être ajustée. Cela implique l'utilisation d'une boucle de calcul itérative pour déterminer cette hauteur, car elle influence les dimensions du caisson, son poids, et donc les cas de charge.
Le volume immergé est calculé comme suit :

$$V_{\text{immergé, poutre}} = \frac{P_{\text{totale, poutre}}}{\rho_{\text{eau}}} = 4,059 \text{ m}^3, \qquad \text{(Volume immergé de la poutre)}$$

avec $\rho_{\text{eau}} = 10{,}25$ kN/m^3.
La hauteur immergée de la plateforme est alors :

$$H_{\text{immergé, poutre}} = \frac{V_{\text{immergé, poutre}}}{A_{\text{plateforme, grillage, poutres}}} = 44{,}29 \text{ m}, \qquad \text{(Hauteur immergée)}$$

où $A_{\text{plateforme, grillage, poutres}}$ est la surface projetée horizontale de la plateforme.

4.5.2 Vérification de flottabilité

Comme vu section1.9.5, la stabilité de la plateforme se contrôle par la position relative du centre de gravité G et du métacentre M. On choisit pour origine du calcul le point le plus bas de la structure, noté $K = (0; 0)$.

Calcul de $\overline{KG}$

La distance verticale $\overline{KG}$ se calcule par moyenne pondérée des forces et de leurs hauteurs :

$$\overline{KG} = \frac{\sum_i (F_i \cdot z_i)}{P_{\text{totale}}} = 23{,}13 \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \text{Position du centre de gravité} \tag{4.11}$$

où F_i est la force de l'élément i et z_i sa distance verticale depuis K.

Position du centre de flottaison B

Le centre de flottaison se situe à mi-hauteur immergée :

$$\overline{KB} = \frac{H_{\text{immerge}}}{2} = 22{,}14 \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \text{Position du centre de flottaison} \tag{4.12}$$

Bras métacentrique BM

Le bras métacentrique s'obtient à partir de l'inertie polaire I de la surface de flottaison et du volume immergé :

$$\overline{BM} = \frac{I}{V_{\text{immerg}}} = \frac{I_x + I_y}{V_{\text{immerg}}} = 39{,}52 \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \text{Bras métacentrique} \tag{4.13}$$

Calcul de l'inertie I

$$I_{f,\text{cent}} = \frac{a_{\text{poutre}}\, l_{\text{poutre}}^3 - a_{\text{poutre}}\,(l_{\text{poutre}} - 2\,e_{\text{poutre}})^3}{12} = 9,295 \cdot 10^2 \text{ m}^4 \quad \longrightarrow \quad \text{Inertie polaire du caisson} \tag{4.14}$$

$$I_x = I_y = \sum_{i=1}^{8} I_{f,\text{mid},i} = 7,94 \cdot 10^6 \text{ m}^4 \quad \longrightarrow \quad \text{Inertie totale (axe } x \text{ ou } y) \tag{4.15}$$

Tableau 4.5 – Calcul de chaque $I_{f,\text{mid},i}$

Poutre i	$d_{\text{axe},i}$ (m)	$l_{\text{poutre}}\, a_{\text{grillage,poutres}}\, d_{\text{axe},i}^2$ (m^4)	$I_{f,\text{mid},i}$ (m^4)
1	52,5	2 315 250	2 316 179,53
2	37,5	1 181 250	1 182 179,53
3	22,5	425 250	426 179,53
4	7,5	47 250	48 179,53
5	7,5	47 250	48 179,53
6	22,5	425 250	426 179,53
7	37,5	1 181 250	1 182 179,53
8	52,5	2 315 250	2 316 179,53

Volume immergé

$$V_{\text{immerg}} = 4,058 \cdot 10^5 \text{ m}^3 \quad \longrightarrow \quad \text{Volume immergé de la poutre} \tag{4.16}$$

Position du métacentre M et marge $\overline{GM}$

$$\overline{KM} = \overline{KB} + \overline{BM} = 22,14 + 39,52 = 61,66 \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \text{Position du métacentre} \tag{4.17}$$

$$\overline{GM} = \overline{KM} - \overline{KG} = 61,66 - 23,13 = 38,53 \text{ m} > 0 \quad \longrightarrow \quad \text{Marge métacentrique} \tag{4.18}$$

Un $\overline{GM} > 0$ garantit la stabilité initiale.

Vérification supplémentaire

$$\overline{KG} - \overline{KB} = 23,13 - 22,14 = 0,982 \text{ m} > 0 \quad \longrightarrow \quad \text{Le centre de gravité reste au dessus du centre de flottaison} \tag{4.19}$$

4.5.3 Modélisation numérique de la poutre secondaire

Géométrie, discrétisation et propriétés mécaniques

$L = 7.125$ m	Longueur de la poutre
$n = 50$	Nombre d'éléments finis
$\Delta x = \dfrac{L}{n}$	Longueur de discrétisation
$\gamma_{\text{eau}} = 10200$ N/m^3	Poids volumique de l'eau
$b = 7$ m	Largeur de la poutre
$k = \gamma_{\text{eau}}\, b$	Raideur de la fondation élastique
$EI = 3.39 \times 10^{14}$ N $\cdot$ m^2	Rigidité flexionnelle

Charge répartie initiale

$$p_0 = -1710.92 \text{ N/m} \quad , \quad p_i = p_0\, \Delta x \quad (i = 0, \ldots, n)$$

Paramètres de la houle

$A = 2$ m	Amplitude
$\lambda = 78$ m	Longueur d'onde
$k_w = \dfrac{2\pi}{\lambda}$	Nombre d'onde
$T = 7$ s	Période
$v = \dfrac{\lambda}{T}$	Vitesse de propagation
$\omega = k_w\, v$	Pulsation
$z_{\text{top}} = 8$ m , $z_{\text{base}} = z_{\text{top}} - 52.29$ m	

Interaction houle–poutre

$z_w(x,t) = A \sin\big(k_w\, x - \omega\, t\big)$	Élévation de la surface libre
$\Delta z(x,t) = \max\big(z_w(x,t) - z_{\text{base}},\, 0\big)$	Immersion de la poutre
$\Delta F(x,t) = \gamma_{\text{eau}}\, \Delta z(x,t)\, b$	Force surfacique apportée [N/m]
$p^{\text{tot}}(x,t) = p(x) + \Delta F(x,t)\, \Delta x$	Charge élémentaire totale

Équilibre de la poutre sur fondation élastique

$EI\, \dfrac{\mathrm{d}^4 w}{\mathrm{d}x^4}(x,t) \;+\; k\, w(x,t) = p^{\text{tot}}(x,t)$	Équilibre d'Euler–Bernoulli
$M(x,t) = -\, EI\, \dfrac{\mathrm{d}^2 w}{\mathrm{d}x^2}(x,t)$	Moment fléchissant

Calcul des efforts tranchants

$$V(x,t) = -\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}x}(x,t) \quad \Longrightarrow \quad \begin{cases} V_{\text{gauche}}(t) = V(0,t), \\ V_{\text{droite}}(t) = V(L,t). \end{cases}$$

4.5.4 Modélisation numérique de la poutre en état hydrostatique

1. Paramètres physiques et géométriques

On considère une poutre de longueur $L = 120\,\mathrm{m}$ modélisée sur une fondation de type Winkler. Elle est discrétisée en $n = 200$ segments, d'une distance $dx = \frac{L}{n}$.

— Rigidité en flexion : $EI = 3{,}39 \times 10^{14}\ \mathrm{N\,m^2}$

— Largeur de la poutre : $b = 7\,\mathrm{m}$

— Poids volumique de l'eau : $\gamma_{\text{eau}} = 10200\ \ N/m^3$

Le coefficient de la fondation est donné par :

$$k = \gamma_{\text{eau}} \cdot b = 10200 \times 7 = 7,14 \cdot 10^4\ \ N/m^2$$

2. Charges appliquées

Charge répartie constante

Une charge uniformément répartie est appliquée le long de la poutre :

$$p_0 = -2,65 \cdot 10^6\ \mathrm{N/m}$$

On l'exprime par :

$$p(x) = p_0 \cdot dx$$

Charges ponctuelles

Des charges ponctuelles nulles sont placées à :

$$x_1 = \frac{L}{2}, \qquad x_2 = 0{,}95L$$

En complément, des charges ponctuelles P_{point} sont appliquées tous les 15 m :

$$P_{\text{point}} = -2 \cdot 2{,}3 \cdot 10^5 = -4{,}6 \cdot 10^5\ \mathrm{N}$$

Celles-ci sont converties en charges réparties sur le pas :

$$p(x) \leftarrow p(x) + \frac{P_{\text{point}}}{dx}$$

3. Modélisation des vagues

Les vagues sont modélisées par une fonction sinusoïdale :

$$z_{\text{eau}}(x,t) = A \cdot \sin(kx - \omega t)$$

où :

$$A = 2\,\text{m} \quad \text{Amplitude}$$
$$\lambda = 78\,\text{m} \quad \text{Longueur d'onde}$$
$$T = 7\,\text{s} \quad \text{Période}$$
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \qquad v = \frac{\lambda}{T}, \qquad \omega = k \cdot v$$

Immersion relative

Le sommet de la poutre est situé à $z_{\text{haut}} = 8\,\text{m}$ et la base à :

$$z_{\text{bas}} = z_{\text{haut}} - 52{,}29 = -44.29\,\text{m}$$

La hauteur d'eau au-dessus de la poutre est donnée par :

$$\Delta z(x,t) = \max(z_{\text{eau}}(x,t) - z_{\text{bas}}, 0)$$

Pression induite par la vague

La force verticale exercée par l'eau est :

$$\Delta F(x,t) = \gamma_{\text{eau}} \cdot \Delta z(x,t) \cdot b$$

La charge totale appliquée devient alors :

$$p_{\text{totale}}(x,t) = p(x) + \Delta F(x,t) \cdot dx$$

4. Résolution du problème

Le déplacement vertical $v(x,t)$ est obtenu en résolvant l'équation différentielle de la poutre sur fondation de Winkler :

$$EI \cdot \frac{d^4 v}{dx^4} + k \cdot v = p_{\text{totale}}(x,t)$$

Cette équation est résolue numériquement pour chaque instant $t \in \{0,1,2,3,4,5\}$ s.

5. Post-traitement

Pour chaque instant t, on extrait :

$$v_{\min}(t) = \min_x v(x,t), \qquad v_{\max}(t) = \max_x v(x,t)$$
$$M_{\min}(t) = \min_x M(x,t), \qquad M_{\max}(t) = \max_x M(x,t)$$

Des figures sont générées pour illustrer :

- Le profil de la vague $z_{\text{eau}}(x,t)$
- Le déplacement vertical $v(x,t)$
- Le moment fléchissant $M(x,t)$

4.5.5 Modélisation numérique poutre en béton en conditions de houle

4.5.5.1 Géométrie et propriétés mécaniques

$L = 120$ m	Longueur de la poutre
$n = 50$	Nombre d'éléments finis
$\Delta x = \frac{L}{n}$	Distance de discrétisation
$\gamma_{\text{eau}} = 10200$ N/m^3	Poids volumique de l'eau
$b = 7$ m	Largeur de la poutre
$k = \gamma_{\text{eau}}\, b$	Raideur de la fondation élastique
$EI = 3.39 \times 10^{14}$ N $\cdot$ m^2	Rigidité flexionnelle

Charges appliquées

Charge répartie initiale On introduit une charge répartie initiale uniforme, notée p_0, de valeur

$$p_0 \;=\; -2648{,}775 \times 10^3 \quad (\text{N/m})\,.$$

Sur chaque cellule i de largeur Δx, ceci correspond à une contribution de

$$p_0\,\Delta x \quad (\text{N})\,.$$

On note la répartition discrète initiale :

$$p_i^{(0)} = p_0\,, \qquad i = 0, \ldots, n.$$

Charges ponctuelles périodiques En plus, on place tous les 15 m une charge ponctuelle de même valeur

$$P_{\text{point}} \;=\; -2 \times 2{,}3 \times 10^5 = -4{,}6 \times 10^5 \quad (\text{N}).$$

Les positions des charges ponctuelles sont donc

$$x_{\text{ponc},\,m} = 15\,m, \quad m = 0, 1, 2, \ldots, \left\lfloor \frac{L}{15} \right\rfloor,$$

soit $x = 0$, 15, 30, 45, $\ldots$, 120 (inclus). Pour chaque position

$$x_{\text{ponc},\,m},$$

on calcule l'indice de nœud

$$j_m = \left\lfloor \frac{x_{\text{ponc},\,m}}{L}\, n \right\rfloor,$$

et l'on ajoute à la répartition p_i la valeur ponctuelle équivalente :

$$p_{j_m} \mathrel{+}= \frac{P_{\text{point}}}{\Delta x}\,.$$

Résumé de la répartition de charges initiale Au final, si l'on note p_i la valeur de la charge répartie à l'itération initiale (avant vague) au nœud i, on a :

$$p_i = p_0 + \sum_{m=0}^{\left\lfloor \frac{L}{15} \right\rfloor} \frac{P_{\text{point}}}{\Delta x}\,\delta_{i,\,j_m}\,,$$

où $\delta_{i,j}$ est le symbole de Kronecker.

Modélisation de la vague

On superpose à la charge précédente l'effet d'une élévation de niveau d'eau due à une vague sinusoïdale. Les paramètres de la vague sont :

$$A = 2 \quad \text{(m) : amplitude,} \tag{4.20}$$

$$\lambda = 78 \quad \text{(m) : longueur d'onde,} \tag{4.21}$$

$$k_{\text{wave}} = \frac{2\pi}{\lambda}, \tag{4.22}$$

$$T = 7 \quad \text{(s) : période,} \tag{4.23}$$

$$v_{\text{wave}} = \frac{\lambda}{T}, \quad \text{vitesse de propagation,} \tag{4.24}$$

$$\omega = k_{\text{wave}}\, v_{\text{wave}} \;=\; \frac{2\pi}{\lambda}\,\frac{\lambda}{T} \;=\; \frac{2\pi}{T}. \tag{4.25}$$

Le sommet supérieur de la poutre est à

$$z_{\text{top}} = 8 \quad \text{(m)},$$

et le bas de la poutre est à

$$z_{\text{bas}} = z_{\text{top}} - 52{,}29 = 8 - 52{,}29 = -44{,}29 \quad \text{(m)}.$$

Pour un instant t donné, la hauteur d'eau au-dessus de l'abscisse x est

$$z_{\text{eau}}(x, t) = A\,\sin\big(k_{\text{wave}}\,x - \omega\,t\big)\,.$$

On ne retient que la partie de l'eau qui dépasse le bas de la poutre :

$$\Delta z(x, t) = \max\big(z_{\text{eau}}(x, t) - z_{\text{bas}},\, 0\big).$$

La pression exercée par cette colonne d'eau additionnelle, sur la largeur b, vaut alors

$$\Delta F(x, t) = \gamma_{\text{eau}}\,\Delta z(x, t)\; b \quad \big[\text{en (N/m)}\big].$$

Pour obtenir, au niveau discret, une charge équivalente uniforme sur chaque cellule Δx, on met

$$p_i^{\text{vague}}(t) = \Delta F(x_i, t)\,\Delta x.$$

La charge totale appliquée au nœud i à l'instant t devient alors

$$p_i^{\text{tot}}(t) = p_i \;+\; \underbrace{\Delta F(x_i, t)\,\Delta x}_{\text{contribution de la vague}}\quad.$$

Équation de la poutre sur fondation de Winkler

La poutre est modélisée par l'équation différentielle (1D) d'équilibre statique sur fondation élastique (modèle de Winkler) :

$$EI\,\frac{\mathrm{d}^4 v}{\mathrm{d}x^4}(x, t) \;+\; k\,v(x, t) \;=\; p^{\text{tot}}(x, t)\,, \tag{4.26}$$

où :

- $v(x, t)$ désigne le déplacement vertical (vers le bas) de la fibre neutre de la poutre en abscisse x et instant t.
- EI est la rigidité à la flexion (constante le long de la poutre).
- k est la raideur de la fondation de Winkler (pression linéaire proportionnelle au déplacement v).

— $p^{\text{tot}}(x,t)$ est la charge répartie totale (avec la vague incluse).

Dans la discrétisation en n segments égaux, on recherche les valeurs $v_i(t)$ qui satisfont, pour chaque nœud i, une version discrète de (4.26). Le code "SSDpy.winkler.BeamElasticFoundation" se charge de résoudre numériquement ce problème (par un schéma aux différences finies ou un élément fini équivalent), en renvoyant :

$$\big\{v_i(t)\big\}_{i=0,\dots,n}, \quad \big\{M_i(t)\big\}_{i=0,\dots,n},$$

où $M_i(t)$ est le moment fléchissant (local) au nœud i. On suppose ici que la poutre est encastrée aux deux extrémités, de sorte que

$$v(0,t) = v(L,t) = 0, \quad \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}(0,t) = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}(L,t) = 0.$$

Calcul (boucle temporelle)

On considère une série d'instants de capture :

$$t \in \{0,\ 1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5\} \quad \text{(en secondes)}.$$

Pour chaque instant t, on effectue les opérations suivantes :

1. Calcul de la vague :

$$z_{\text{eau},\,i}(t) = A\,\sin\big(k_{\text{wave}}\,x_i - \omega\,t\big), \quad i = 0, 1, \dots, n.$$

2. Détermination de la colonne d'eau agissant sur la poutre :

$$\Delta z_i(t) = \max\big(z_{\text{eau},\,i}(t) - z_{\text{bas}},\ 0\big), \qquad \Delta F_i(t) = \gamma_{\text{eau}}\,\Delta z_i(t)\,b.$$

3. Assemblage de la charge totale sur le nœud i :

$$p_i^{\text{tot}}(t) = p_i + \Delta F_i(t)\,\Delta x.$$

4. Résolution du problème de la poutre sur fondation élastique :

$$EI\,\frac{\mathrm{d}^4 v}{\mathrm{d}x^4}(x,t) + k\,v(x,t) = p^{\text{tot}}(x,t).$$

   Numériquement (via SSDpy), on obtient la solution discrète $\{v_i(t)\}$ et les moments $\{M_i(t)\}$.

5. Recentrage du déplacement :

$$\bar{v}(t) \;=\; \frac{1}{n+1}\sum_{i=0}^{n} v_i(t), \quad v_i^{(\text{centr})}(t) = v_i(t) \;-\; \bar{v}(t).$$

   Ceci garantit que la moyenne des déplacements est nulle, pour mieux visualiser les formes propres.

6. Calcul des valeurs extrêmes :

$$v_{\min}(t) = \min_{0\le i\le n}\big[v_i^{(\text{centr})}(t)\big], \quad v_{\max}(t) = \max_{0\le i\le n}\big[v_i^{(\text{centr})}(t)\big],$$

$$M_{\min}(t) = \min_{0\le i\le n} M_i(t), \quad M_{\max}(t) = \max_{0\le i\le n} M_i(t).$$

7. Génération des graphique :
   — Profil de la surface de la vague : $x \mapsto z_{\text{eau}}(x,t)$.
   — Déplacement de la poutre : $x \mapsto v_i^{(\text{centr})}(t)$.

— Moment fléchissant : $x \mapsto M_i(t)$.

8. Sauvegarde des figures et affichage des valeurs extrêmes.

Affichage des valeurs minimales et maximales pendant la simulation :
Pour chaque instant t, on imprime en console :

$$t = t(\text{s}) \ : \quad \begin{cases} \text{Déplacement min} = v_{\min}(t) \quad (\text{m}), \quad \text{Déplacement max} = v_{\max}(t) \quad (\text{m}), \\ \text{Moment min} = M_{\min}(t) \quad (\text{N m}), \quad \text{Moment max} = M_{\max}(t) \quad (\text{N m}). \end{cases}$$

Résultats

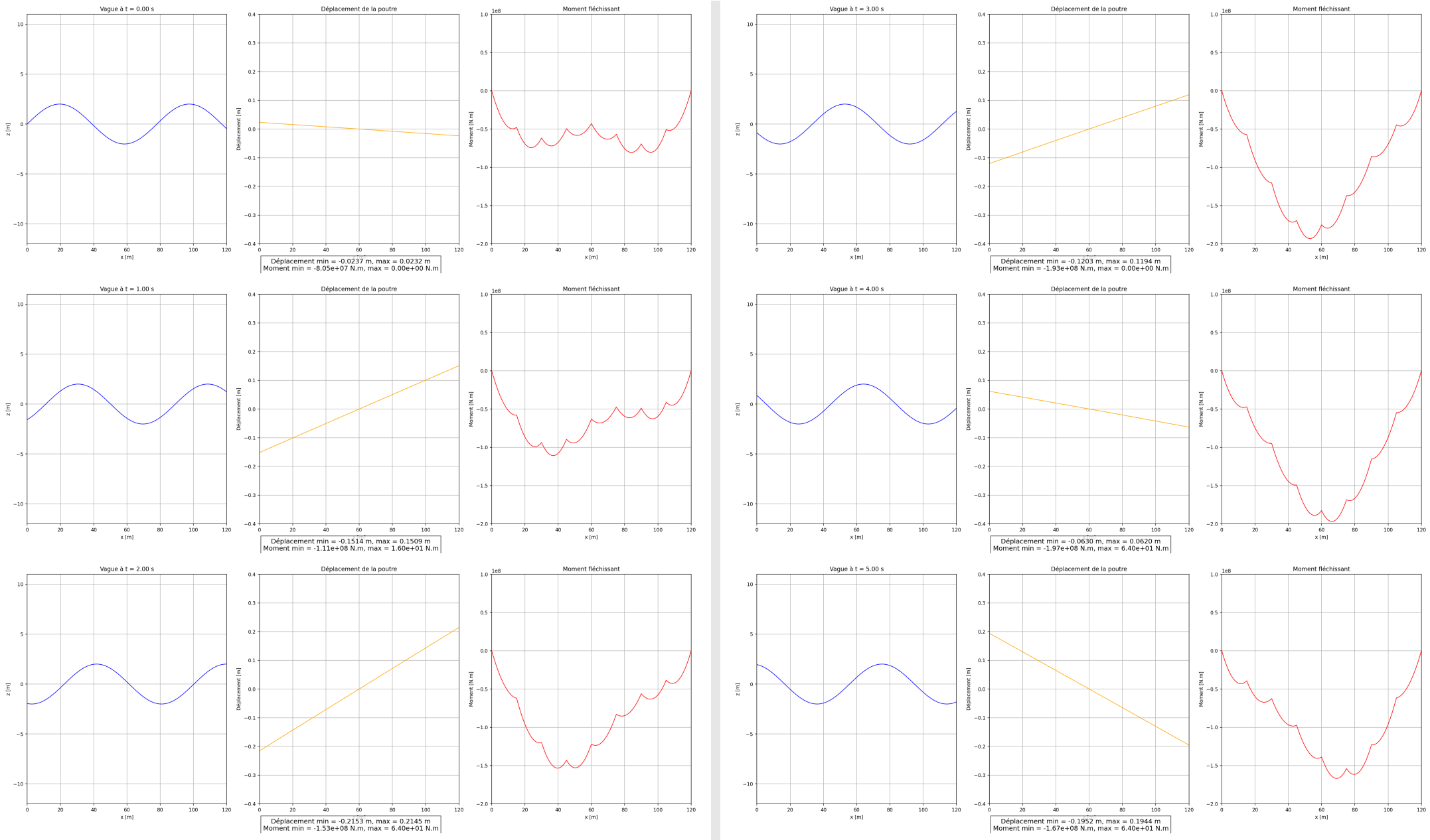


Figure 4.6 – Poutre en béton sur vague de 4m

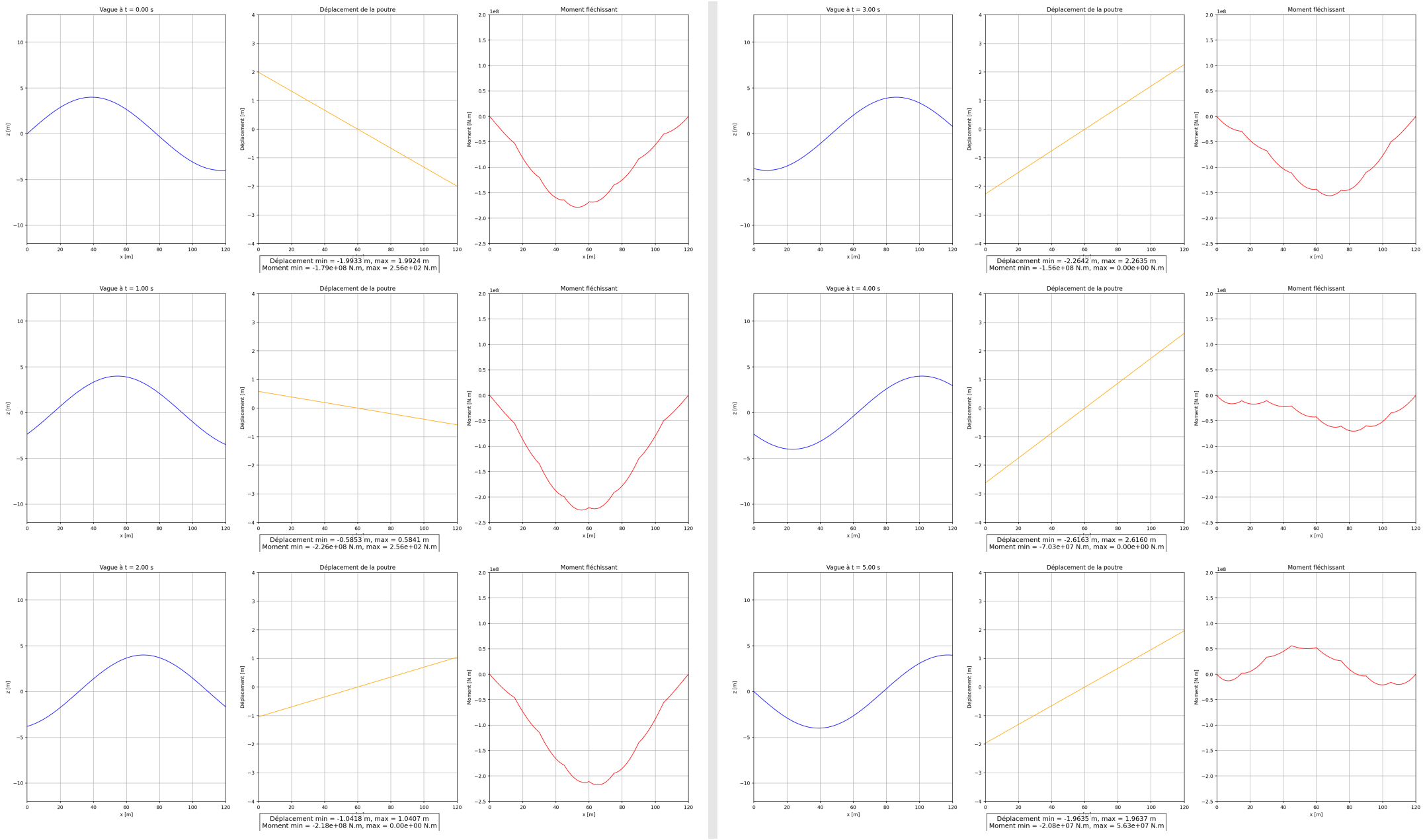


Figure 4.7 – Poutre en béton sur vague de 8 m

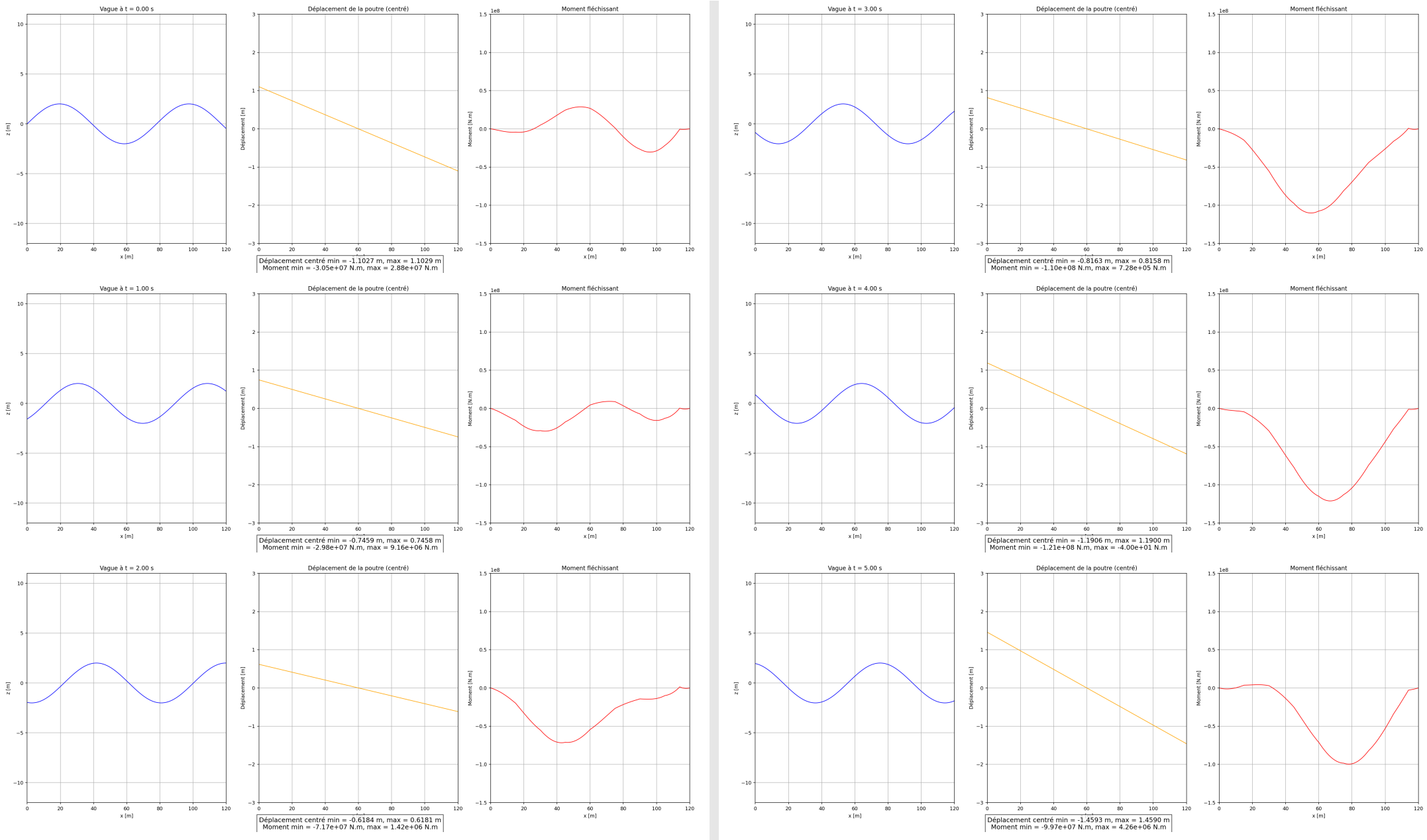


Figure 4.8 – Poutre en béton avec charge ponctuelle sur l'extrémité

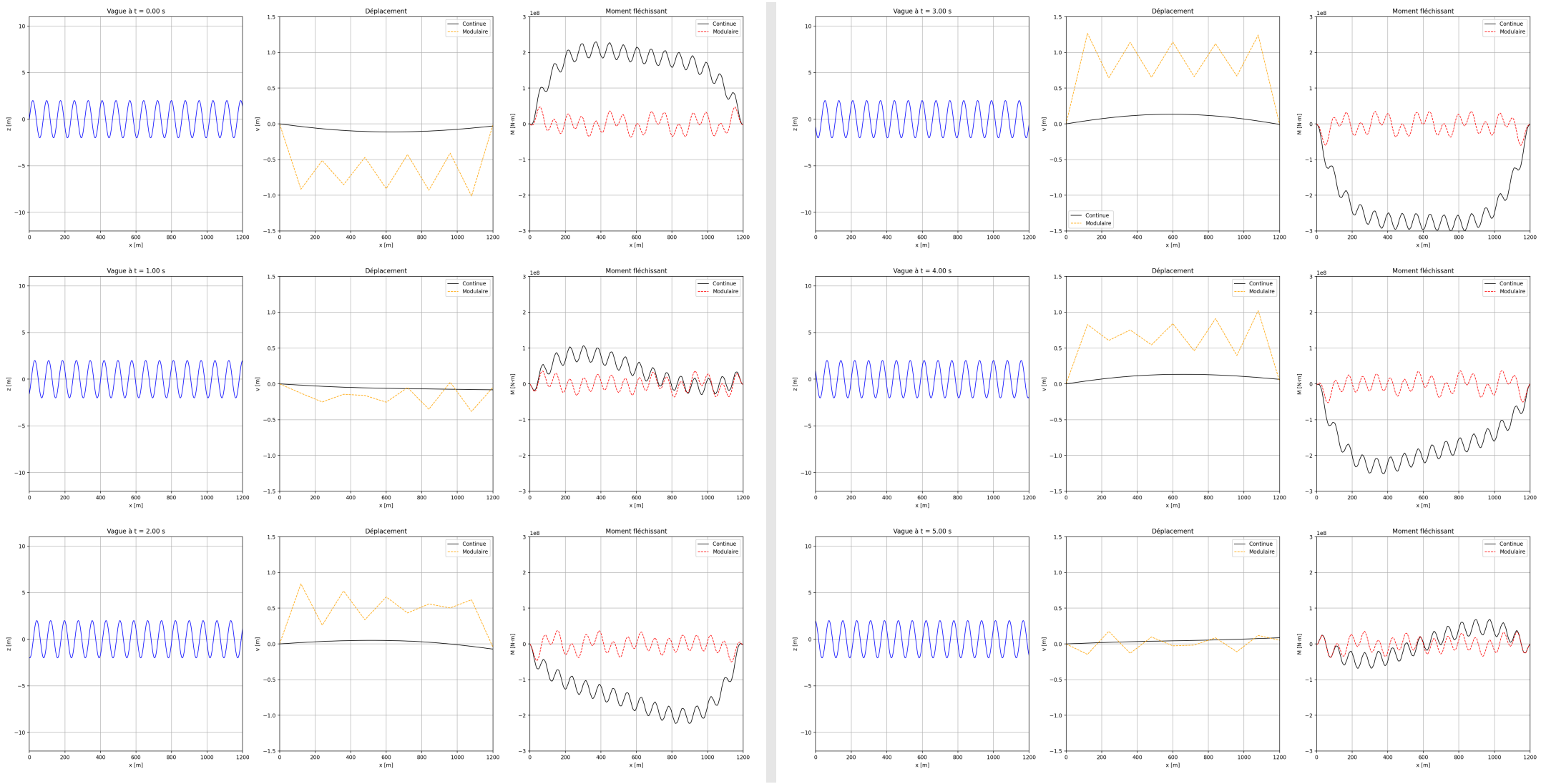


Figure 4.9 – Ville de 10 000 habitants

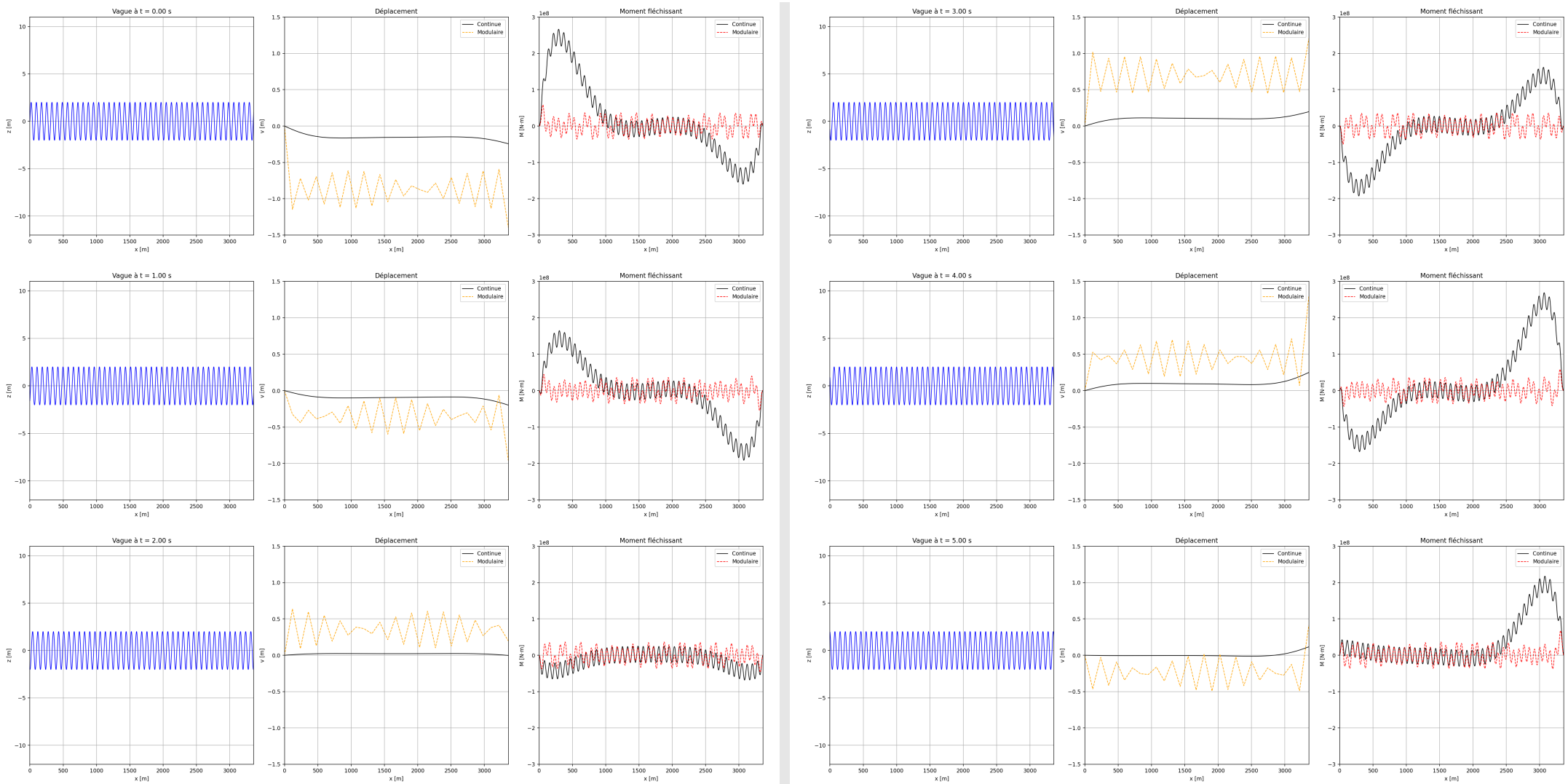


Figure 4.10 – Ville de 60 000 habitants

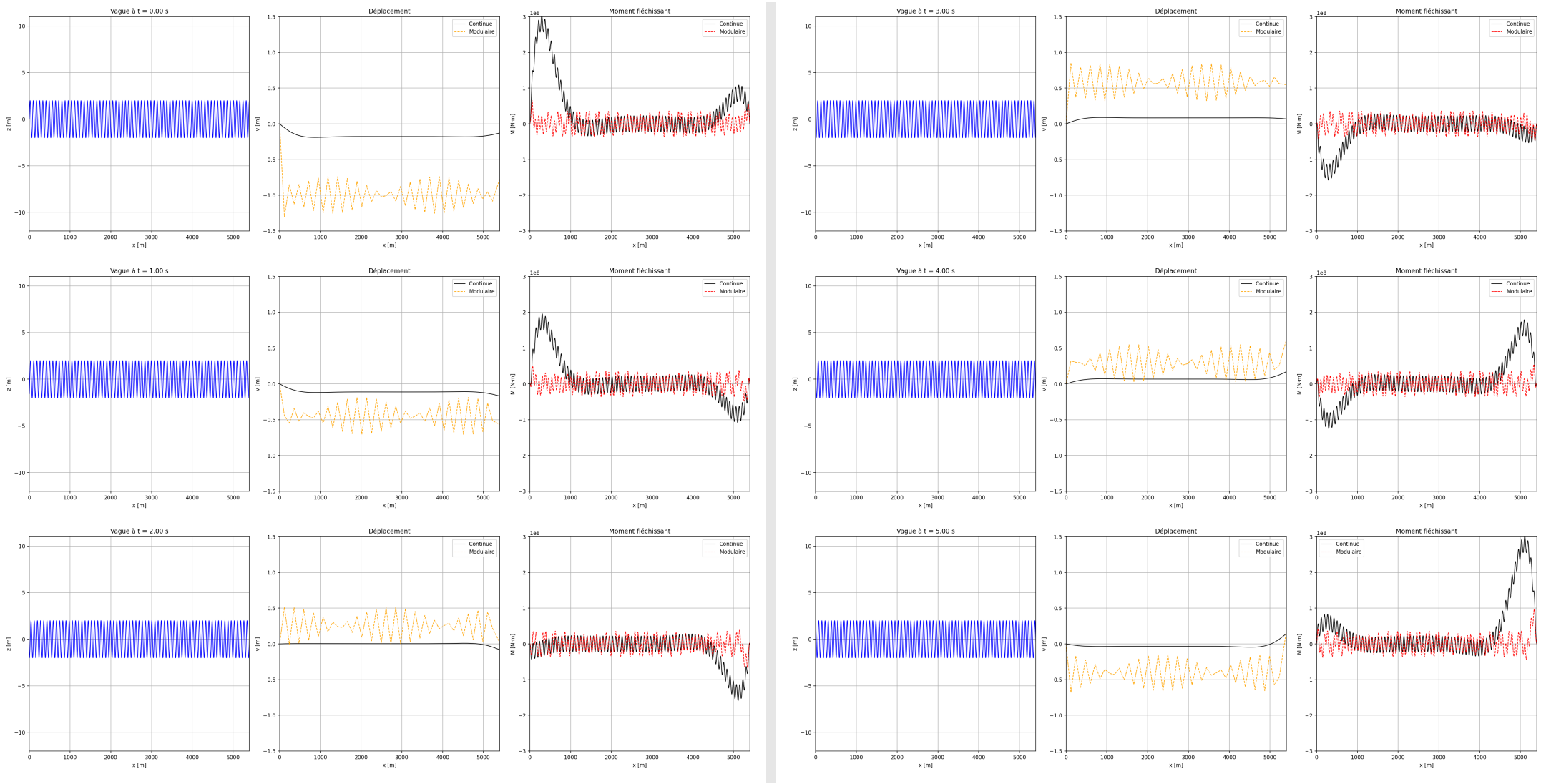


Figure 4.11 – Ville d'un million d'habitants

4.5.6 Calcul du Moment de résistance (M_{Rd}) de la poutre en béton allégé

2. Propriétés des matériaux

$$
\begin{aligned}
&f_{ck} = 45 \text{ MPa}, && f_{cm} = f_{ck} + 8,\\
&E_b = 22\,000 \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \text{ MPa}, && f_{ctm} = 0{,}33\sqrt{f_{cm}} \text{ MPa},\\
&f_{yk} = 500 \text{ MPa}, && E_s = 200\,000 \text{ MPa},
\end{aligned}
$$

3. Géométrie de la poutre en I

$$
\begin{aligned}
&h = 5{,}2 \cdot 10^4 \text{ mm}, && b_f = 7\,000 \text{ mm},\\
&t_f = 350 \text{ mm}, && t_w = 700 \text{ mm},\\
&L = 1{,}2cdot10^5 \text{ mm}.
\end{aligned}
$$

4. Ferraillage

$$e = 50 \text{ mm}, \phi \ = 30 \text{ mm},$$

Section des barres :

$$A_{\text{barre}} = \pi\left(\tfrac{\phi}{2}\right)^2, \quad A_{s_i} = n_i\, A_{\text{barre}}, \quad n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 40.$$

5. Charges et moment sollicité

$$M_{Ed,\text{ELU}} = 2{,}24 \times 10^1 1 \text{ N mm}.$$

6. Définition de la fonction $N(x)$

On cherche x tel que :

$$N(x) = \sum_{i=1}^{4} F_i \ - \ F_c(x) \ = \ 0.$$

— Déformation maximale du béton : $\varepsilon_c = -3{,}5 \times 10^{-3}$.

— Positions des barres (depuis la face inférieure) :

$$
\begin{aligned}
&y_1 = h - \left(e + \tfrac{\phi}{2}\right), && y_2 = h - \left(e + \phi + 190 + \tfrac{\phi}{2}\right),\\
&y_3 = e + \tfrac{\phi}{2}, && y_4 = e + \phi + 190 + \tfrac{\phi}{2}.
\end{aligned}
$$

— Loi de déformation :

$$\varepsilon(y) = \varepsilon_c + \left(-\varepsilon_c\right)\frac{y}{x}.$$

— Comportement de l'acier (limité ±500MPa) :

$$\sigma(\varepsilon) = \max\big(\min(\varepsilon\, E_s,\ 500),\ -500\big).$$

— Efforts dans chaque nappe :

$$F_i = \sigma\big(\varepsilon(y_i)\big)\, A_{s_i}, \quad i = 1 \ldots 4.$$

— Effort de compression du béton :

$$F_c(x) = \begin{cases} b_f\, x\, 0{,}8\, f_{ck}, & x \le t_f, \\ b_f\, t_f\, 0{,}8\, f_{ck} + t_w\,(x - t_f)\, 0{,}8\, f_{ck}, & x > t_f. \end{cases}$$

7. Recherche de la racine

La racine est calculée sur $[10,\ h-10]$ pour obtenir x_{sol}.

8. Calculs finaux

Avec $x = x_{\text{sol}} = 129,3mm$:

$$\text{Centre de gravité béton } y_c = \begin{cases} \frac{x}{2}, & x \le t_f, \\ \dfrac{b_f\, t_f \cdot \frac{t_f}{2} + t_w\,(x - t_f) \cdot \left(t_f + \frac{x - t_f}{2}\right)}{b_f\, t_f + t_w\,(x - t_f)}, & x > t_f, \end{cases}$$

$$D_i = \text{distance de la nappe } i \text{ au CG inférieur},$$

$$M_u = \sum_{i=1}^{4} F_i\, D_i \ - \ F_c\,(h - y_c),$$

$$\text{Ratio} = \frac{M_u}{M_{Ed,\text{ELU}}},$$

$$N_{\text{final}} = \sum_{i=1}^{4} F_i \ - \ F_c,$$

$$\rho_{min} = \frac{4 \cdot A_{s_i}}{A_n} = 0,27\% > 0,2\%.$$

4.6 Étude structurelle de la poutre en béton allégé

4.6.1 Définition des dimensions de la poutre

1. Charges permanentes

- **Poids des bâtiments**
  Le poids des bâtiments est le même que pour les caissons,

$$Q_{\text{bâtiment}} = q_{\text{bâtiment}} \cdot A_{\text{sol}} \cdot 7 \cdot g \approx 78,4 \cdot 10^4 \text{ kN}.$$

- **Poids de la poutre**
  Afin de connaître le volume par lequel multiplier la masse volumique du béton avec polystyrène expansé ($1700 kg/m^3$), il est nécessaire de procéder par itération car les dimensions du caisson sont influencées par le volume immergé nécessaire à la poussée d'Archimède. La poussée d'Archimède qui est elle-même influencée par les charges s'appliquant car le but est de les contrebalancer. Après itérations la hauteur totale des poutres : Pareil que pour le caisson, après itérations la hauteur totale des poutres est : $h_{\text{tot,poutre}} = 21,2$ m dont $h_{\text{immergée}} = 29,2$ m, $l_{poutre} = 7$ m,

- **Volume des murs verticaux de la poutre principale**

$$V_{\text{murs,verticaux,poutre}} = 2 \cdot a_{\text{grillage,poutres}} \cdot h_{\text{tot,poutre}} \cdot e_{\text{poutre}}$$

- **Volume des faces horizontales de la poutre principale**

$$V_{\text{faces,horizontales,poutre}} = 2 \cdot \left(l_{\text{poutre}} - 2\, e_{\text{poutre}}\right) \cdot a_{\text{grillage,poutres}} \cdot e_{\text{poutre}}$$

- **Volume interne pour les diaphragmes de la poutre principale**

$$V_{\text{interne,poutre,princ}} = 0{,}1 \cdot a_{\text{grillage,poutres}} \cdot h_{\text{tot,poutre}} \cdot e_{\text{poutre}} = 2{,}452 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

- **Volume externe de la poutre principale**

$$V_{\text{externe,poutre,princ}} = V_{\text{murs,verticaux,poutre}} + V_{\text{faces,horizontales,poutre}} = 2{,}982 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

- **Volumétrie des poutres secondaires**
  Pour une longueur de 7,125 m (distance extrémité–poutre principale) :

$$V_{\text{interne,poutre,secondaire}} = 145{,}6 \text{ m}^3, \quad V_{\text{externe,poutre,secondaire}} = 177{,}1 \text{ m}^3$$

- **Charge totale due aux poutres**
  En notant q_{bton} la charge volumique du béton, on obtient :

$$\begin{aligned} Q_{\text{poutres}} = q_{\text{bton}} \cdot \Big(& (V_{\text{interne,poutre,princ}} + V_{\text{externe,poutre,princ}}) \times 8 \\ & + 7 \times 7 \times (V_{\text{interne,poutre,secondaire}} + V_{\text{externe,poutre,secondaire}}) \Big) \\ \approx 1{,}008 \cdot 10^6 \text{ kN} & \end{aligned}$$

- **Poids de la dalle plateforme**
  Avec $A_{\text{plateforme,grillage,poutres}}$ l'emprise et e_{dalle} l'épaisseur :

$$Q_{\text{dalle}} = q_{\text{bton}} \cdot A_{\text{plateforme,grillage,poutres}} \cdot e_{\text{dalle}} = 9{,}792 \cdot 10^4 \text{ kN}$$

- **Charges permanentes**

$$q_{\text{permanentes}} = Q_{\text{btiment}} + Q_{\text{poutres}} + Q_{\text{dalle}} = 1{,}184 \cdot 10^6 \text{ kN}$$

2. Charges variables

- **Usage public (commerces de détail, plateforme RDC destinée à un usage publique ne présentant pas d'obstacle à la circulation de personnes)**
  Selon CEN (2002), il est pris $q_{\text{public}} = 5$ kN/m^2. La force correspondante vaut

$$Q_{\text{public}} = q_{\text{public}} \cdot A_{\text{plateforme}} \cdot g \approx 7{,}2 \cdot 10^4 \text{ kN}.$$

- **Exploitation résidentielle**
  D'après CEN (2002), $q_{\text{résidentielle}} = 2$ kN/m^2. Soit

$$Q_{\text{résidentielle}} = A_{\text{sol}} \cdot (n_{\text{étages}} - 1) \cdot q_{\text{résidentielle}} \approx 1{,}2 \cdot 10^5 \text{ kN}.$$

- **Stockage**
  On retient $q_{\text{stockage}} = 7{,}5$ kN/m^2, appliqué sur 25 % de la plateforme :

$$Q_{\text{stockage}} = q_{\text{stockage}} \cdot A_{\text{plateforme}} \cdot 0{,}25 \approx 2{,}7 \cdot 10^4 \text{ kN}.$$

- **Neige**
  La charge de la neige est prise sur toute la superfici de la plateforme. Avec $q_{\text{neige}} = 0{,}5$ kN/m^2, on obtient

$$Q_{\text{neige}} = q_{\text{neige}} \times A_{\text{plateforme}} \approx 7\,200 \text{ kN}.$$

4.6.1.1 3. Cas de charges

Tableau 4.6 – Coefficient de combinaison (CEN, 2002).

Action	$\Psi 0$	Ψ_1	Ψ_2
Exploitation résidentielle	0,7	0,5	0,3
Aire de shopping	0,7	0,7	0,6
Espace de stockage	1	0,9	0,8
Neige	0,5	0,2	0

Le cas le plus défavorable est le cas 1 avec une force totale $P_{totale,poutre} = 1,9 \cdot 10^6 kN$ (Tableau 4.7)

Tableau 4.7 – Cas de charges sur le caisson.

Cas de charge	Charges permanentes ($q_{\text{permanentes}}$)	Exploitation résidentielle ($q_{\text{résidentielle}}$)	Aire de shopping (q_{public})	Espace de stockage (q_{stockage})	Neige (q_{snow})	Valeur (kN)
Cas 1	1,35	1,5	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,9 \cdot 10^6$
Cas 2	1,35	$1,5 \cdot \Psi_0$	1,5	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,878 \cdot 10^6$
Cas 3	1,35	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	1,5	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,852 \cdot 10^6$
Cas 4	1,35	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	$1,5 \cdot \Psi_0$	1,5	$1,846 \cdot 10^6$

4. Dimensionnement

Pour assurer la flottabilité de la structure, il est nécessaire que la poussée d'Archimède soit égale à la force totale (la plus défavorable) appliquée sur la plateforme :

$$P_{\text{totale, poutre}} = P_{totale,poutre} = 1,9 \cdot 10^6 \text{ kN}.$$

Il faut donc déterminer le volume d'eau déplacé permettant d'équilibrer cette force. La surface de la plateforme étant fixée, c'est la hauteur de plateforme immergée (le tirant d'eau) qui doit être ajustée. Cela implique l'utilisation d'une boucle de calcul itérative pour déterminer cette hauteur, car elle influence les dimensions du caisson, son poids, et donc les cas de charge.
Le volume immergé est calculé comme suit :

$$V_{\text{immergé, poutre}} = \frac{P_{\text{totale, poutre}}}{\rho_{\text{eau}}} = 1,895 \cdot 10^5 \text{ m}^3, \qquad \text{(Volume immergé du caisson)}$$

avec $\rho_{\text{eau}} = 10{,}25$ kN/m^3.
La hauteur immergée de la plateforme est alors :

$$H_{\text{immergé, poutre}} = \frac{V_{\text{immergé, poutre}}}{A_{\text{plateforme, grillage, poutres}}} = 21{,}2 \text{ m}, \qquad \text{(Hauteur immergée)}$$

où $A_{\text{plateforme, grillage, poutres}}$ est la surface projetée horizontale de la plateforme.

4.6.2 Vérification de flottabilité

Comme vu section 1.9.5, la stabilité de la plateforme se contrôle par la position relative du centre de gravité G et du métacentre M. On choisit pour origine du calcul le point le plus bas de la structure, noté $K = (0; 0)$.

Calcul de $\overline{KG}$

La distance verticale $\overline{KG}$ se calcule par moyenne pondérée des forces et de leurs hauteurs :

$$\overline{KG} = \frac{\sum_i (F_i \cdot z_i)}{P_{\text{totale}}} = 15{,}47 \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \text{Position du centre de gravité} \tag{4.27}$$

où F_i est la force de l'élément i et z_i sa distance verticale depuis K.

Position du centre de flottaison B

Le centre de flottaison se situe à mi-hauteur immergée :

$$\overline{KB} = \frac{H_{\text{immerge}}}{2} = 10{,}6 \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \text{Position du centre de flottaison} \tag{4.28}$$

Bras métacentrique $\overline{BM}$

Le bras métacentrique s'obtient à partir de l'inertie polaire I de la surface de flottaison et du volume immergé :

$$\overline{BM} = \frac{I}{V_{\text{immerg}}} = \frac{I_x + I_y}{V_{\text{immerg}}} = 83{,}83 \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \text{Bras métacentrique} \tag{4.29}$$

Calcul de l'inertie I

$$I_{f,\text{cent}} = \frac{a_{\text{poutre}}\, l_{\text{poutre}}^3 - a_{\text{poutre}}\, (l_{\text{poutre}} - 2\, e_{\text{poutre}})^3}{12} = 929{,}5 \text{ m}^4 \quad \longrightarrow \quad \text{Inertie polaire du caisson} \tag{4.30}$$

$$I_x = I_y = \sum_{i=1}^{8} I_{f,\text{mid},i} = 7,945 \cdot 10^6 \text{ m}^4 \quad \longrightarrow \quad \text{Inertie totale (axe } x \text{ ou } y\text{)} \tag{4.31}$$

Tableau 4.8 – Calcul de chaque $I_{f,\text{mid},i}$

Poutre i	$d_{\text{axe},i}$ (m)	$l_{\text{poutre}}\, a_{\text{grillage,poutres}}\, d_{\text{axe},i}^2$ (m^4)	$I_{f,\text{mid},i}$ (m^4)
1	52,5	2 315 250	2 316 179,53
2	37,5	1 181 250	1 182 179,53
3	22,5	425 250	426 179,53
4	7,5	47 250	48 179,53
5	7,5	47 250	48 179,53
6	22,5	425 250	426 179,53
7	37,5	1 181 250	1 182 179,53
8	52,5	2 315 250	2 316 179,53

Volume immergé

$$V_{\text{immerg}} = 1,89 \cdot 10^5 \text{ m}^3 \quad \longrightarrow \quad \text{Volume immergé du caisson} \tag{4.32}$$

Position du métacentre M et marge $\overline{GM}$

$$\overline{KM} = \overline{KB} + \overline{BM} = 10{,}6 + 83{,}83 = 94{,}43 \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \text{Position du métacentre} \tag{4.33}$$

$$\overline{GM} = \overline{KM} - \overline{KG} = 94{,}43 - 15{,}47 = 78{,}96 \text{ m} > 0 \quad \longrightarrow \quad \text{Marge métacentrique} \tag{4.34}$$

Un $\overline{GM} > 0$ garantit la stabilité initiale.

Vérification supplémentaire

$$\overline{KG} - \overline{KB} = 15{,}47 - 10{,}6 = 4{,}873 \text{ m} > 0 \quad \longrightarrow \quad \text{Le centre de gravité reste au dessus du centre de flottaison} \tag{4.35}$$

4.6.3 Modélisation numérique

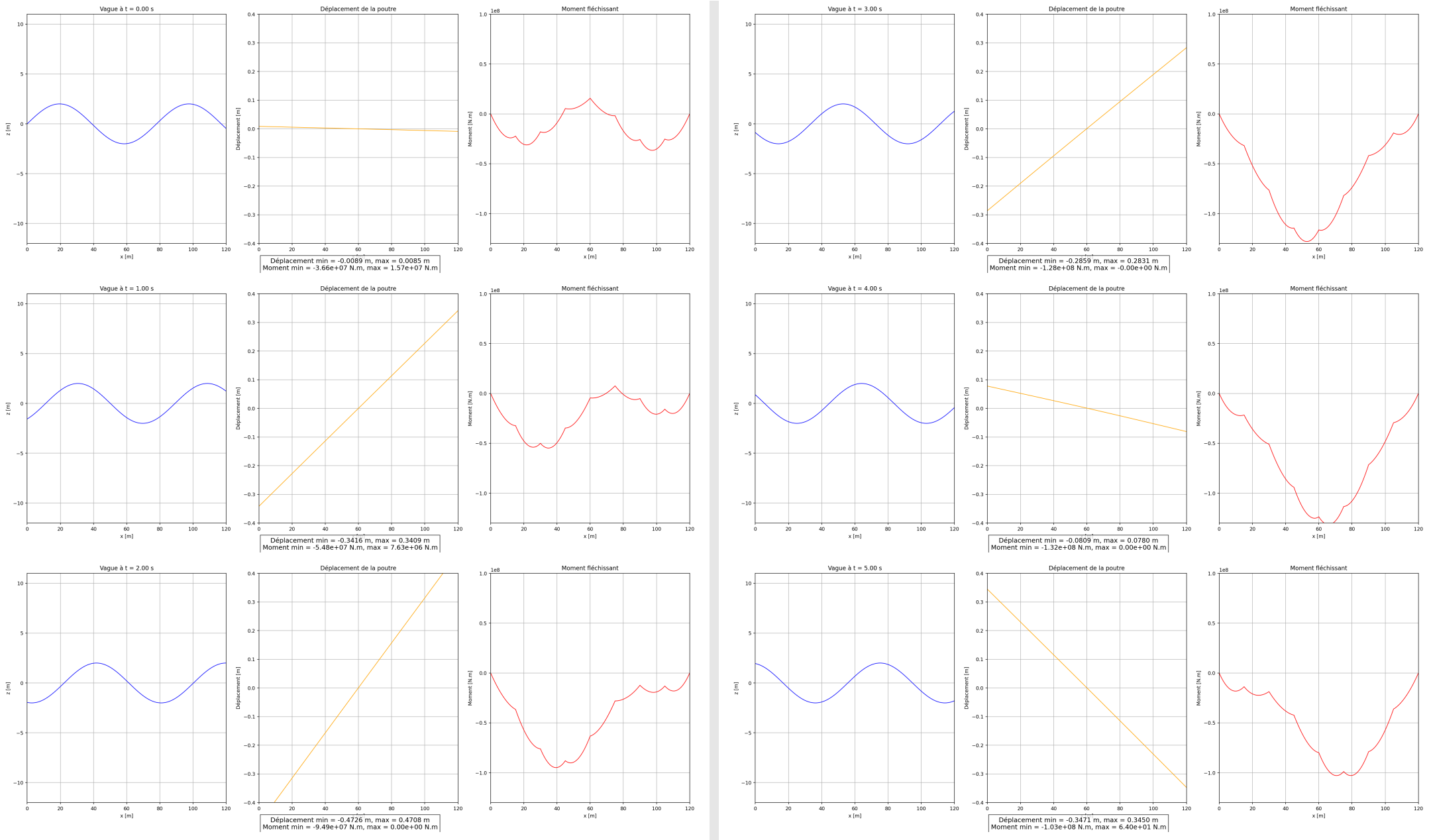


Figure 4.12 – Poutre en béton alléger (polystyrène expansé) en conditions de faible houle

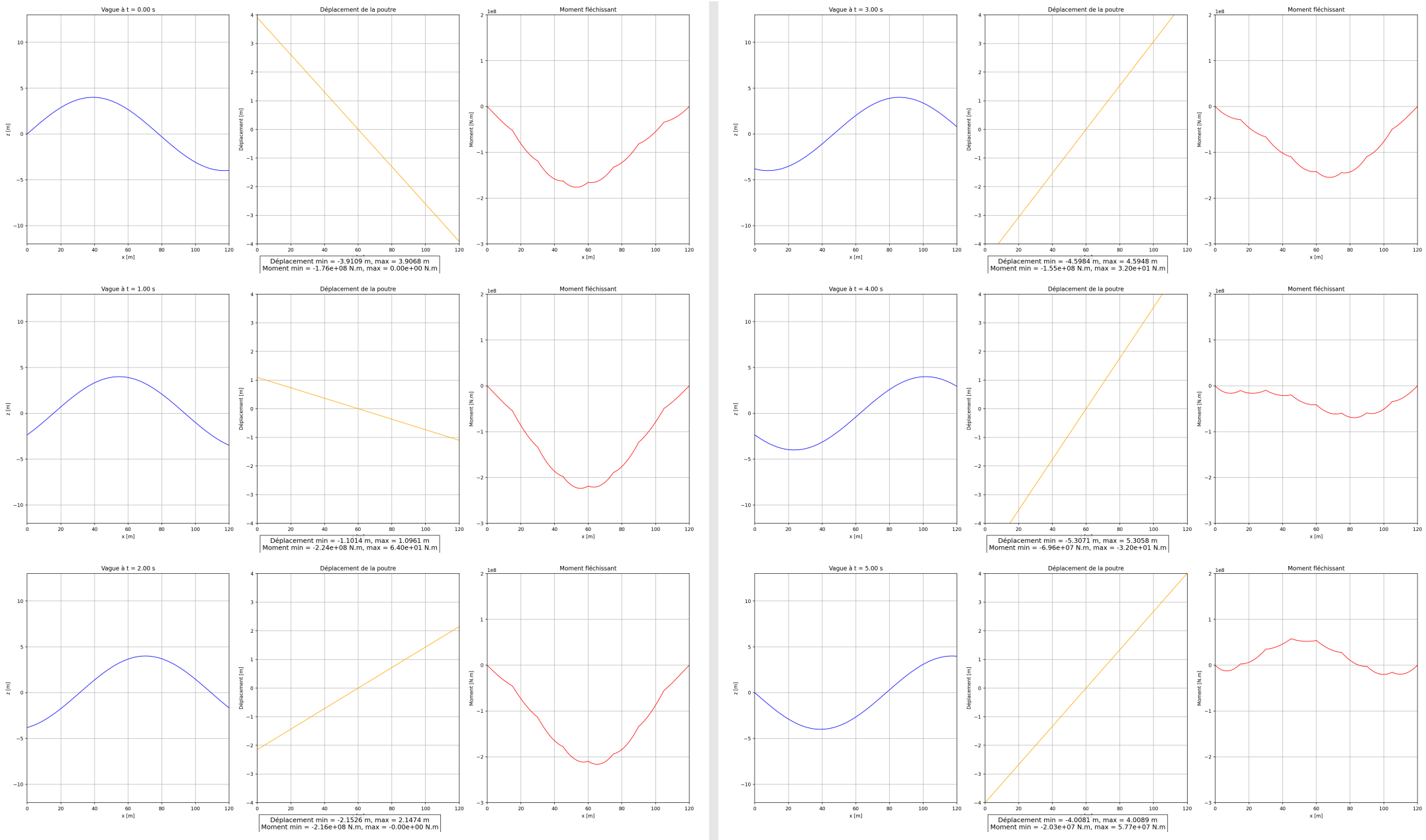


Figure 4.13 – Modélisation poutre sur vague de 8 m

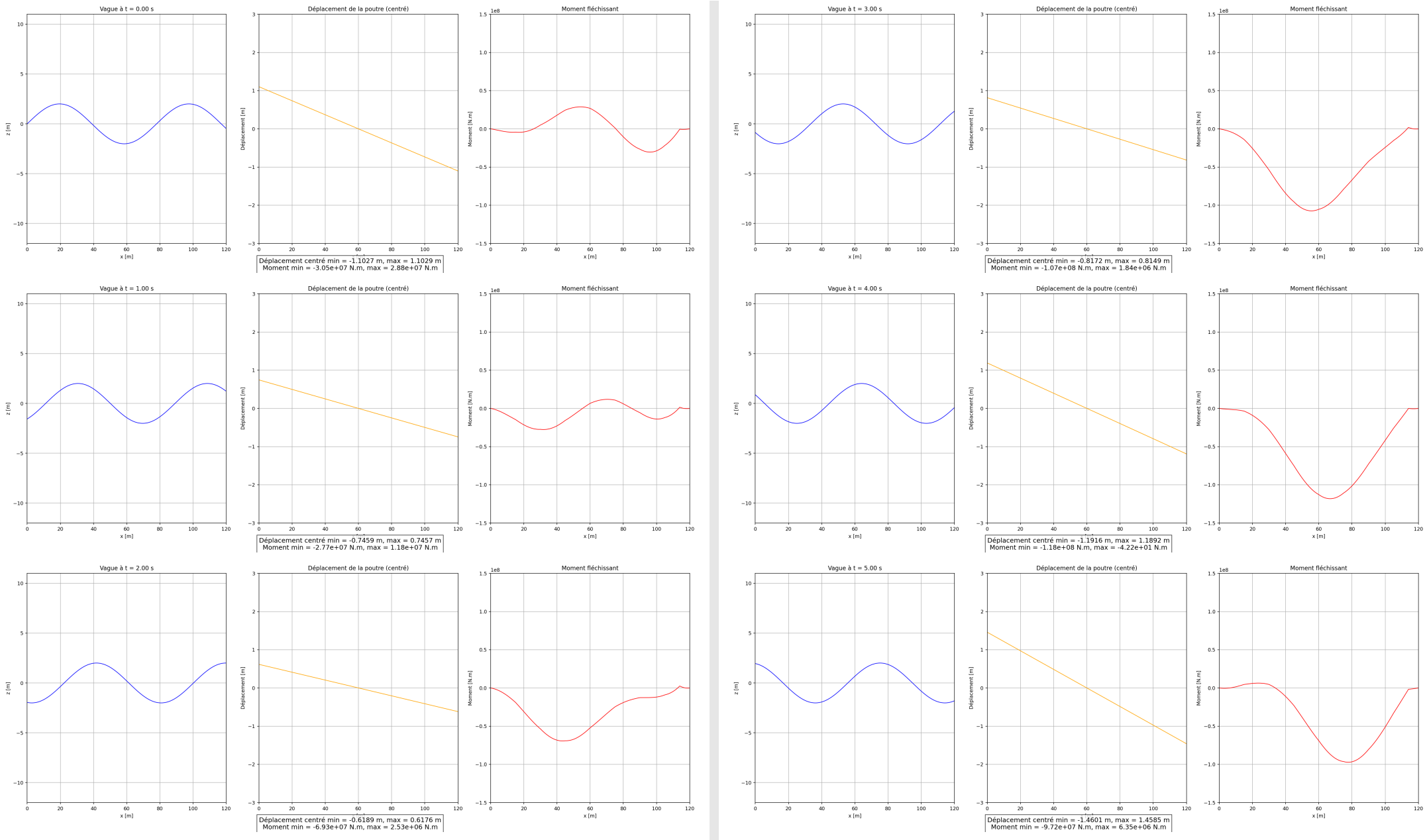


Figure 4.14 – Poutre en béton allégé avec charge ponctuelle sur l'extrémité

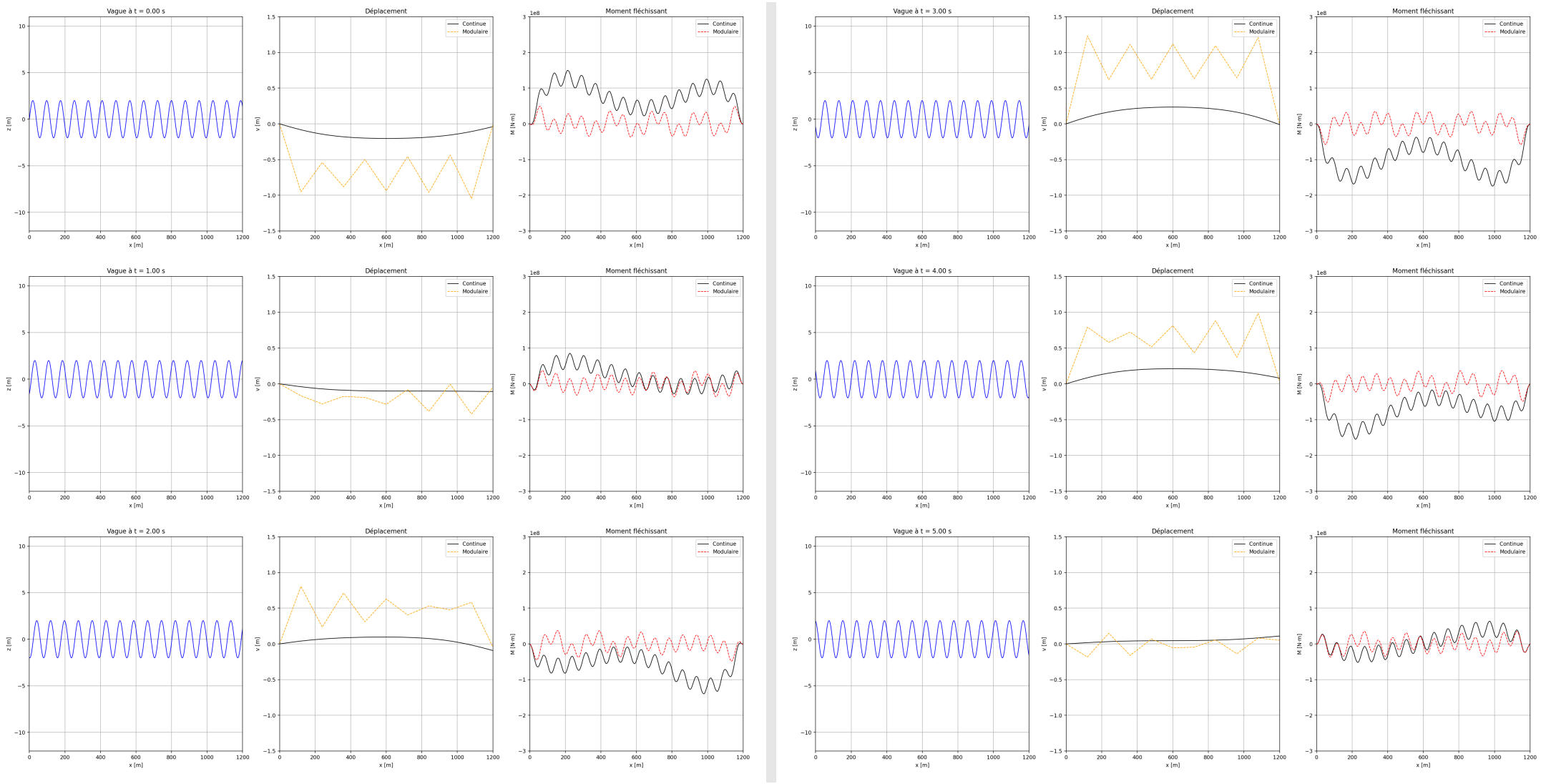


Figure 4.15 – Ville de 10 000 habitants

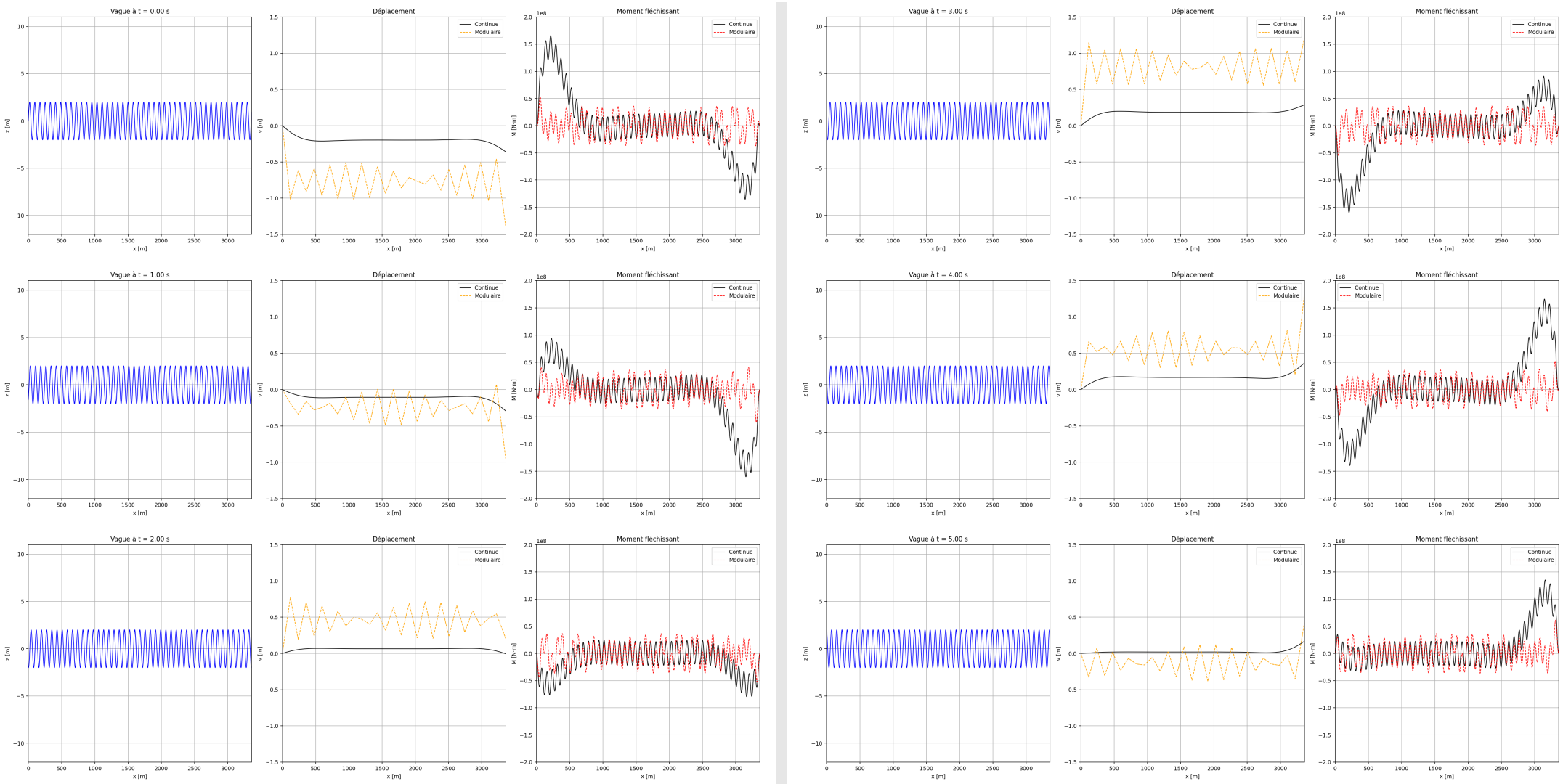


Figure 4.16 – Ville de 60 000 habitants

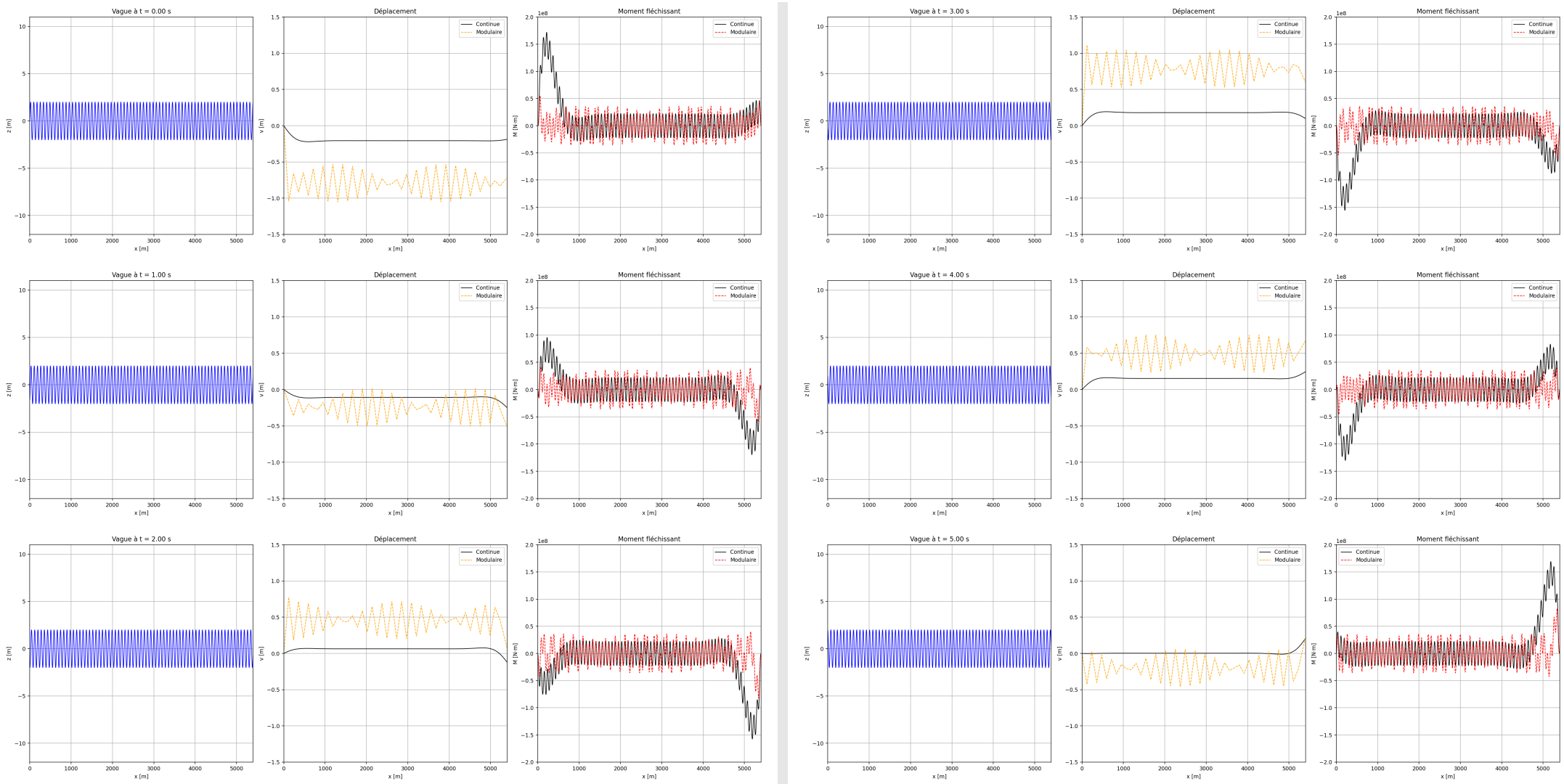


Figure 4.17 – Ville d'un million d'habitants

4.6.4 Calcul du Moment de résistance (M_{Rd}) de la poutre en béton allégé

2. Propriétés des matériaux

$$\begin{aligned} &f_{ck} = 20 \text{ MPa}, && f_{cm} = f_{ck} + 8, \\ &E_b = 22\,000 \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \text{ MPa}, && f_{ctm} = 0{,}33\sqrt{f_{cm}} \text{ MPa}, \\ &f_{yk} = 500 \text{ MPa}, && E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}, \end{aligned}$$

3. Géométrie de la poutre en I

$$\begin{aligned} &h = 2{,}9 \cdot 10^4 \text{ mm}, && b_f = 7\,000 \text{ mm}, \\ &t_f = 350 \text{ mm}, && t_w = 700 \text{ mm}, \\ &L = 1{,}2 \cdot 10^5 \text{ mm}. \end{aligned}$$

4. Ferraillage

$$e = 50 \text{ mm}, \phi \quad = 25 \text{ mm},$$

Section des barres :

$$A_{\text{barre}} = \pi\left(\tfrac{\phi}{2}\right)^2, \quad A_{s_i} = n_i\, A_{\text{barre}}, \quad n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 40.$$

5. Charges et moment sollicité

$$M_{Ed,\text{ELU}} = 2{,}24 \times 10^{11} \text{ N mm}.$$

6. Définition de la fonction $N(x)$

On cherche x tel que :

$$N(x) = \sum_{i=1}^{4} F_i \;-\; F_c(x) \;=\; 0.$$

— Déformation maximale du béton : $\varepsilon_c = -3{,}5 \times 10^{-3}$.

— Positions des barres (depuis la face inférieure) :

$$\begin{aligned} &y_1 = h - \left(e + \tfrac{\phi}{2}\right), && y_2 = h - \left(e + \phi + 200 + \tfrac{\phi}{2}\right), \\ &y_3 = e + \tfrac{\phi}{2}, && y_4 = e + \phi + 200 + \tfrac{\phi}{2}. \end{aligned}$$

— Loi de déformation :

$$\varepsilon(y) = \varepsilon_c + \left(-\varepsilon_c\right)\frac{y}{x}.$$

— Comportement de l'acier (limité ±500MPa) :

$$\sigma(\varepsilon) = \max\!\big(\min(\varepsilon\, E_s,\ 500),\ -500\big).$$

— Efforts dans chaque nappe :

$$F_i = \sigma\big(\varepsilon(y_i)\big)\, A_{s_i}, \quad i = 1 \ldots 4.$$

— Effort de compression du béton :

$$F_c(x) = \begin{cases} b_f\, x\, 0{,}8\, f_{ck}, & x \le t_f, \\ b_f\, t_f\, 0{,}8\, f_{ck} + t_w\,(x - t_f)\, 0{,}8\, f_{ck}, & x > t_f. \end{cases}$$

7. Recherche de la racine

On résout $N(x) = 0$ par la méthode de Brent sur $[10,\ h - 10]$ pour obtenir x_{sol}.

8. Calculs finaux

Avec $x = x_{\text{sol}}$:

$$\text{Centre de gravité béton } y_c = \begin{cases} \frac{x}{2}, & x \le t_f, \\ \dfrac{b_f\, t_f \cdot \frac{t_f}{2} + t_w\,(x - t_f) \cdot \left(t_f + \frac{x - t_f}{2}\right)}{b_f\, t_f + t_w\,(x - t_f)}, & x > t_f, \end{cases}$$

$$D_i = \text{distance de la nappe } i \text{ au CG inférieur},$$

$$M_u = \sum_{i=1}^{4} F_i\, D_i \ - \ F_c\,(h - y_c),$$

$$\text{Ratio} = \frac{M_u}{M_{Ed,\text{ELU}}},$$

$$N_{\text{final}} = \sum_{i=1}^{4} F_i \ - \ F_c, \rho_{min} \qquad = \frac{4 \cdot A_{s_i}}{A_n} = 0,3\% > 0,2\%.$$