



elements
www.elements.green

SOLEIL ÉLÉMENTS 10

PROJET DE CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE FLOTTANTE DE CHEVENON

Version avec pièces manquantes – Complétée avec les études PPRi & ICPE exigées

ANNEXE 8 DE L'ÉTUDE D'IMPACT
-
ÉTUDE D'ANCRAGE

Commune de Chevenon (58)

Rapport n°R21065405-EI

Mai 2022

SOMMAIRE :

- 1. Etude d'ancrage 2022 (mise-à-jour)**





Design d'ancrage préliminaire



CIEL & TERRE INTERNATIONAL

100 rue Harrison
59262 SAINGHAIN-EN-MELANTOIS, France

+33 (0)3.20.01.05.65

www.ciel-et-terre.net

INTRODUCTION

Le document qui suit décrit le design d'ancrage pour la centrale flottante Hydrelia® du projet WFR082, basé sur, et seulement sur, les informations techniques fournies par le client.

Le design d'ancrage est considéré comme finalisé seulement lorsqu'il a été validé après une étude positioning, c'est-à-dire après avoir reçu et analysé les positions exactes des points d'ancrage et les longueurs des lignes installées. Les différentes étapes du design d'ancrage sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Etapes du design d'ancrage	Description	Statut
Préliminaire	Position approximative des ancrés Longueur approximative des lignes d'ancrage Position approximative des barres d'ancrage	X
Détaillé	Position théorique des ancrés Longueur théorique des lignes d'ancrage Position théorique des barres d'ancrage	
Positioning	<u>Positionnement des points d'ancrage :</u> Position exacte des ancrés Longueur réelle des lignes d'ancrage Position théorique des barres d'ancrage	

Localisation	CHEVENON, NIEVRE, France
Référence projet	WFR082
Référence design	V1indD
Ecrit par	JH
4 novembre 2021	
CONFIDENTIEL	

TABLE DES MATIERES

1 	Caractéristiques du réservoir	7
2 	Efforts environnementaux.....	8
2.1.	Repère.....	8
2.2.	Efforts de vent.....	9
2.2.1.	Méthode de calcul	9
2.2.2.	Pression dynamique de vent	11
2.2.3.	Effort de vent.....	11
2.3.	Efforts de vague.....	14
2.3.1.	Méthode de calcul	14
2.3.2.	Modèle de génération de vagues.....	16
2.3.3.	Efforts de vague	16
2.4.	Efforts de courant	19
2.4.1.	Méthode de calcul	19
2.4.2.	Efforts de courant	20
3 	Enveloppe de charge.....	23
3.1.	Combinaison des efforts.....	23
3.2.	Efforts par côté.....	26
4 	Méthode d'ancrage.....	28
4.1	Design de l'îlot.....	28
4.2	Description du système d'ancrage.....	29
4.2.1.	Introduction.....	29
4.2.2.	Scénarios de design.....	30
4.2.3.	Barre d'ancrage.....	31
4.2.4.	Lignes d'ancrage.....	32
5 	Calcul d'ancrage.....	33
5.1	Calcul statique	33

5.2	Calcul quasi-statique.....	35
5.2.1.	Introduction.....	35
5.3	Management des efforts verticaux.....	36
5.3.1.	Introduction.....	36
6 	Résultats	38
6.1	Hypothèses.....	38
6.2	Résultats principaux.....	39
6.3	Nomenclature.....	41
6.4	Mouvements de l'îlot.....	42

FIGURES

Figure 1 : Repère de référence (x,y,z).....	8
Figure 2 : Test en soufflerie sur une configuration Hydrelío® réduite.....	9
Figure 3 : Direction de vent angulaire	10
Figure 4 : Diagramme des efforts de vent (Résultante horizontale Fxy)	13
Figure 5 : Diagramme des efforts de vagues (Résultante horizontale Fxy)	18
Figure 6 : Diagramme des efforts de courant (Résultante horizontale Fxy).....	22
Figure 7 : Diagramme des efforts environnementaux (Résultante horizontale Fxy)	25
Figure 8 : Diagramme de considération des efforts par côté.....	26
Figure 9 : Efforts environnementaux par côté	27
Figure 10 : Exemple d'ancrage en berge.....	29
Figure 11 : Exemple d'ancrage au fond	29
Figure 12 : Exemple d'un ancrage en berge à niveau d'eau haut et bas.....	30
Figure 13 : Exemple d'un ancrage au fond à niveau d'eau haut et bas	30
Figure 14 : barre d'ancrage	31
Figure 15 : Cas accidentel avec des lignes élastiques.....	31
Figure 16 : Schéma d'un ancrage en berge.....	33
Figure 17 : Schéma d'un ancrage au fond.....	33
Figure 18 : Lignes d'amarrage caténares	35
Figure 19 : Repère de référence (x, y, z).....	36
Figure 20 : Schéma des efforts verticaux appliqués dans le cas d'un ancrage en berge.....	37
Figure 21 : Schéma des efforts verticaux appliqués dans le cas d'un ancrage au fond	37
Figure 22 : Schéma du système d'ancrage usuel pour CHEVENON	41
Figure 23 : Schéma des mouvements de l'îlot	42

TABLES

Tableau 1 : Données sur le réservoir	7
Tableau 2 : Efforts de vent par direction	12
Tableau 3 : Effort de vague par direction.....	17
Tableau 4 : Vitesse maximale de courant	20
Tableau 5 : Vitesse maximale de courant (référentiel C&T)	20
Tableau 6 : Effort de courant par direction	21
Tableau 7 : Efforts environnementaux par direction	24
Tableau 8 : Considération des efforts par côté	26
Tableau 9 : Cas intact et cas accidentel.....	32
Tableau 10 : Formules utilisées dans le calcul d'ancrage statique.....	34
Tableau 11 : Hypothèses d'ancrage	38
Tableau 12 : Résultats des calculs d'ancrage	39
Tableau 13: Nomenclature du système d'ancrage.....	41
Tableau 14 : Mouvements maximums de l'îlot.....	42

1 CARACTERISTIQUES DU RESERVOIR

Le tableau 1 résume les informations fournies par le client.

Le client a également fourni une topographie des berges du réservoir.

Toutes les coordonnées mentionnées dans ce document font référence au système de coordonnées utilisé pour les relevés topographiques, c'est-à-dire le système Lambert93.

Toutes les élévations indiquées dans ce document sont relatives au système NGF.

Tableau 1 : Données sur le réservoir

WFR082_CHEVENON	
Localisation	CHEVENON, NIEVRE, France
Coordonnées GPS	716878.1 ; 6649833.5
Conditions de mesure	Par le client
Eau douce / salée	Eau douce
Niveau des berges	176 m NGF
Niveau d'eau maximum (HWL)	180.47 m NGF
Niveau d'eau minimum (LWL)	171 m NGF
Variation de niveau (m)	9.47 m
Point le plus bas du réservoir (LG)	165 m NGF
Profondeur maximum (m)	15.47 m
Vitesse d'écoulement et direction	cf 2.4. Efforts de courant

*Une bathymétrie sera nécessaire pour l'étude détaillée.

2| EFFORTS ENVIRONNEMENTAUX

2.1. Repère

La figure suivante montre le repère de référence utilisé par Ciel & Terre.

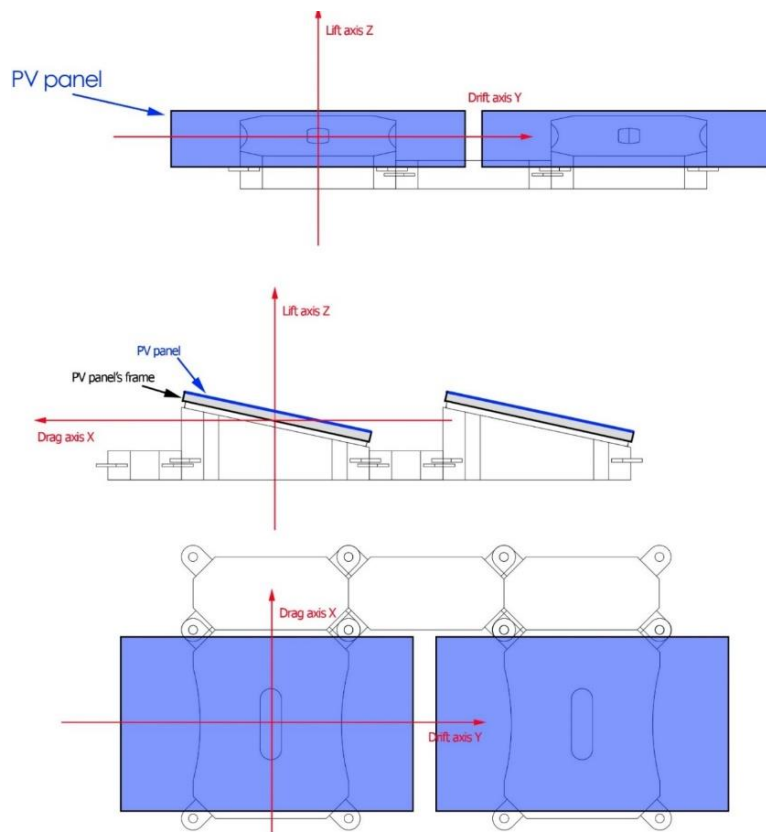


Figure 1 : Repère de référence (x,y,z)

Notes :

- F_x et F_y sont considérés dans le calcul des efforts horizontaux appliqués à la centrale.
- F_z est uniquement considéré localement, sur l'extra-ring, pour vérifier l'équilibre avec la flottabilité et le poids des flotteurs.

2.2. Efforts de vent

2.2.1. Méthode de calcul

Les efforts de vent sur un îlot Hydrelío® sont calculés par Ciel & Terre grâce à des coefficients aérodynamiques – sur les axes x , y et z comme définis ci-dessus – obtenus avec un modèle CFD (Computational Fluid Dynamics = Mécanique des Fluides Numérique) corrélé avec des essais en soufflerie.

Les efforts de vent qui s'appliquent à un flotteur sont :

$$\text{L'effort de traînée :} \quad F_x = \frac{1}{2} \rho v^2 C_x \text{ or } F_x = q_{design} C_x$$

$$\text{L'effort de dérive :} \quad F_y = \frac{1}{2} \rho v^2 C_y \text{ or } F_y = q_{design} C_y$$

$$\text{L'effort de portance :} \quad F_z = \frac{1}{2} \rho v^2 C_z \text{ or } F_z = q_{design} C_z$$

Où :

C_x, C_y, C_z = respectivement coefficients de traînée, de dérive et de portance, issus des tests en soufflerie et des CFD

F_x, F_y, F_z = respectivement efforts de traînée, de dérive et de portance

ρ = masse volumique du fluide (air)

$v = v_{design}$ = vitesse d'écoulement du fluide

q_{design} = pression dynamique du fluide (déterminée dans la section suivante)

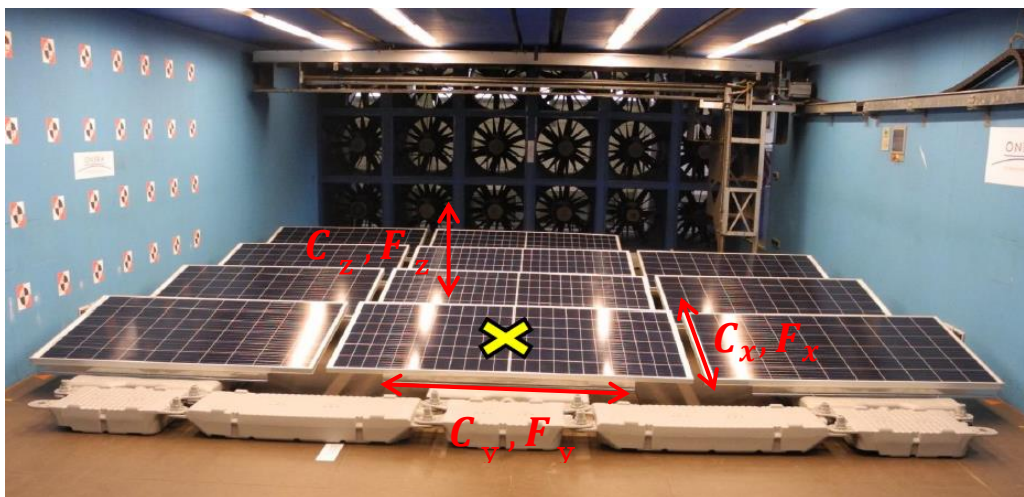


Figure 2 : Test en soufflerie sur une configuration Hydrelío® réduite

Les coefficients aérodynamiques dépendent de :

- La direction (x, y ou z)
- La direction de vent (0° , 20° , 40° , ...comme défini ci-dessous)
- La position du panneau dans la matrice représentée par l'ensemble des flotteurs (dans un coin, sur l'avant, sur l'arrière, dans le centre de l'îlot...)

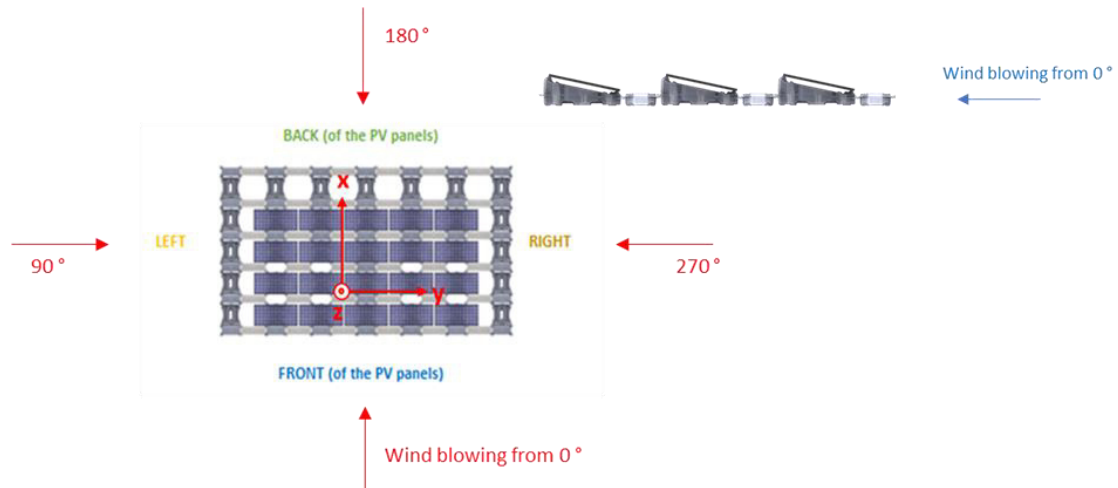


Figure 3 : Direction de vent angulaire

Ainsi, pour une direction de vent donnée θ , l'effort sur la centrale flottante F_θ est :

$$F_\theta = \frac{1}{2} \rho v^2 \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n C_{x,i,\theta} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n C_{y,i,\theta} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n C_{z,i,\theta} \right)^2}$$

$$\vec{F}_\theta = \vec{F}_x + \vec{F}_y + \vec{F}_z$$

Où i représente la position du panneau dans la matrice (= configuration).

2.2.2. Pression dynamique de vent

Le calcul de la pression dynamique du vent est basé sur la norme de construction du pays.

Une note de calcul détaillé est fournie en annexe 1 « Note de calcul de la pression dynamique ».

2.2.3. Effort de vent

Ci-dessous les efforts de vent en fonction des directions de vent :

Tableau 2 : Efforts de vent par direction

Ilot 1-1					Ilot 1-2				
Wind direction	Wind pressure	F _x	F _y	F _{horizontal}	Wind direction	Wind pressure	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	500.60 N/m ²	111.82 kN	0.01 kN	111.82 kN	0°	500.60 N/m ²	407.80 kN	-0.02 kN	407.80 kN
20°	500.60 N/m ²	111.82 kN	32.79 kN	116.52 kN	20°	500.60 N/m ²	407.80 kN	130.00 kN	428.02 kN
40°	500.60 N/m ²	69.63 kN	32.79 kN	76.96 kN	40°	500.60 N/m ²	259.11 kN	130.00 kN	289.89 kN
60°	500.60 N/m ²	69.63 kN	40.99 kN	80.80 kN	60°	500.60 N/m ²	259.11 kN	160.53 kN	304.80 kN
80°	500.60 N/m ²	69.63 kN	40.99 kN	80.80 kN	80°	500.60 N/m ²	259.11 kN	160.53 kN	304.80 kN
90°	500.60 N/m ²	0.64 kN	40.99 kN	41.00 kN	90°	500.60 N/m ²	3.02 kN	160.53 kN	160.56 kN
100°	500.60 N/m ²	-111.23 kN	40.99 kN	118.55 kN	100°	500.60 N/m ²	-401.53 kN	160.53 kN	432.43 kN
120°	500.60 N/m ²	-111.23 kN	40.99 kN	118.55 kN	120°	500.60 N/m ²	-401.53 kN	160.53 kN	432.43 kN
140°	500.60 N/m ²	-111.23 kN	40.01 kN	118.21 kN	140°	500.60 N/m ²	-401.53 kN	152.15 kN	429.39 kN
160°	500.60 N/m ²	-226.65 kN	40.01 kN	230.16 kN	160°	500.60 N/m ²	-745.52 kN	152.15 kN	760.89 kN
180°	500.60 N/m ²	-226.65 kN	0.04 kN	226.65 kN	180°	500.60 N/m ²	-745.52 kN	0.17 kN	745.52 kN
200°	500.60 N/m ²	-226.65 kN	-40.01 kN	230.16 kN	200°	500.60 N/m ²	-745.52 kN	-152.15 kN	760.89 kN
220°	500.60 N/m ²	-111.23 kN	-40.01 kN	118.21 kN	220°	500.60 N/m ²	-401.53 kN	-152.15 kN	429.39 kN
240°	500.60 N/m ²	-111.23 kN	-40.01 kN	118.21 kN	240°	500.60 N/m ²	-401.53 kN	-152.15 kN	429.39 kN
260°	245.29 N/m ²	-111.23 kN	-40.01 kN	118.21 kN	260°	245.29 N/m ²	-401.53 kN	-152.15 kN	429.39 kN
270°	245.29 N/m ²	0.31 kN	-20.09 kN	20.09 kN	270°	245.29 N/m ²	1.48 kN	-78.66 kN	78.67 kN
280°	245.29 N/m ²	34.12 kN	-20.09 kN	39.59 kN	280°	245.29 N/m ²	126.96 kN	-78.66 kN	149.35 kN
300°	245.29 N/m ²	34.12 kN	-20.09 kN	39.59 kN	300°	245.29 N/m ²	126.96 kN	-78.66 kN	149.35 kN
320°	245.29 N/m ²	34.12 kN	-16.07 kN	37.71 kN	320°	245.29 N/m ²	126.96 kN	-63.70 kN	142.05 kN
340°	245.29 N/m ²	111.82 kN	-16.07 kN	112.96 kN	340°	245.29 N/m ²	407.80 kN	-63.70 kN	412.75 kN

Ilot 1-3					Ilot 1-4				
Wind direction	Wind pressure	F _x	F _y	F _{horizontal}	Wind direction	Wind pressure	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	500.60 N/m ²	396.37 kN	-0.02 kN	396.37 kN	0°	500.60 N/m ²	102.60 kN	0.00 kN	102.60 kN
20°	500.60 N/m ²	396.37 kN	126.27 kN	416.00 kN	20°	500.60 N/m ²	102.60 kN	34.58 kN	108.27 kN
40°	500.60 N/m ²	251.96 kN	126.27 kN	281.82 kN	40°	500.60 N/m ²	69.68 kN	34.58 kN	77.79 kN
60°	500.60 N/m ²	251.96 kN	155.99 kN	296.34 kN	60°	500.60 N/m ²	69.68 kN	43.74 kN	82.27 kN
80°	500.60 N/m ²	251.96 kN	155.99 kN	296.34 kN	80°	500.60 N/m ²	69.68 kN	43.74 kN	82.27 kN
90°	500.60 N/m ²	2.90 kN	155.99 kN	156.02 kN	90°	500.60 N/m ²	0.29 kN	43.74 kN	43.74 kN
100°	500.60 N/m ²	-390.74 kN	155.99 kN	420.73 kN	100°	500.60 N/m ²	-109.91 kN	43.74 kN	118.29 kN
120°	500.60 N/m ²	-390.74 kN	155.99 kN	420.73 kN	120°	500.60 N/m ²	-109.91 kN	43.74 kN	118.29 kN
140°	500.60 N/m ²	-390.74 kN	147.92 kN	417.81 kN	140°	500.60 N/m ²	-109.91 kN	41.44 kN	117.46 kN
160°	500.60 N/m ²	-726.21 kN	147.92 kN	741.12 kN	160°	500.60 N/m ²	-192.18 kN	41.44 kN	196.60 kN
180°	500.60 N/m ²	-726.21 kN	0.16 kN	726.21 kN	180°	500.60 N/m ²	-192.18 kN	0.04 kN	192.18 kN
200°	500.60 N/m ²	-726.21 kN	-147.92 kN	741.12 kN	200°	500.60 N/m ²	-192.18 kN	-41.44 kN	196.60 kN
220°	500.60 N/m ²	-390.74 kN	-147.92 kN	417.81 kN	220°	500.60 N/m ²	-109.91 kN	-41.44 kN	117.46 kN
240°	500.60 N/m ²	-390.74 kN	-147.92 kN	417.81 kN	240°	500.60 N/m ²	-109.91 kN	-41.44 kN	117.46 kN
260°	245.29 N/m ²	-390.74 kN	-147.92 kN	417.81 kN	260°	245.29 N/m ²	-109.91 kN	-41.44 kN	117.46 kN
270°	245.29 N/m ²	1.42 kN	-76.44 kN	76.45 kN	270°	245.29 N/m ²	0.14 kN	-21.43 kN	21.43 kN
280°	245.29 N/m ²	123.46 kN	-76.44 kN	145.20 kN	280°	245.29 N/m ²	34.14 kN	-21.43 kN	40.31 kN
300°	245.29 N/m ²	123.46 kN	-76.44 kN	145.20 kN	300°	245.29 N/m ²	34.14 kN	-21.43 kN	40.31 kN
320°	245.29 N/m ²	123.46 kN	-61.87 kN	138.09 kN	320°	245.29 N/m ²	34.14 kN	-16.94 kN	38.12 kN
340°	245.29 N/m ²	396.37 kN	-61.87 kN	401.17 kN	340°	245.29 N/m ²	102.60 kN	-16.94 kN	103.99 kN

Ilot 1-5					Ilot 2-1				
Wind direction	Wind pressure	F _x	F _y	F _{horizontal}	Wind direction	Wind pressure	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	500.60 N/m ²	359.23 kN	-0.02 kN	359.23 kN	0°	500.60 N/m ²	218.27 kN	0.00 kN	218.27 kN
20°	500.60 N/m ²	359.23 kN	113.76 kN	376.81 kN	20°	500.60 N/m ²	218.27 kN	67.02 kN	228.33 kN
40°	500.60 N/m ²	228.03 kN	113.76 kN	254.83 kN	40°	500.60 N/m ²	137.22 kN	67.02 kN	152.72 kN
60°	500.60 N/m ²	228.03 kN	140.67 kN	267.93 kN	60°	500.60 N/m ²	137.22 kN	83.15 kN	160.45 kN
80°	500.60 N/m ²	228.03 kN	140.67 kN	267.93 kN	80°	500.60 N/m ²	137.22 kN	83.15 kN	160.45 kN
90°	500.60 N/m ²	2.58 kN	140.67 kN	140.70 kN	90°	500.60 N/m ²	1.47 kN	83.15 kN	83.16 kN
100°	500.60 N/m ²	-354.44 kN	140.67 kN	381.34 kN	100°	500.60 N/m ²	-215.43 kN	83.15 kN	230.92 kN
120°	500.60 N/m ²	-354.44 kN	140.67 kN	381.34 kN	120°	500.60 N/m ²	-215.43 kN	83.15 kN	230.92 kN
140°	500.60 N/m ²	-354.44 kN	133.67 kN	378.81 kN	140°	500.60 N/m ²	-215.43 kN	79.81 kN	229.74 kN
160°	500.60 N/m ²	-663.45 kN	133.67 kN	676.78 kN	160°	500.60 N/m ²	-417.88 kN	79.81 kN	425.43 kN
180°	500.60 N/m ²	-663.45 kN	0.14 kN	663.45 kN	180°	500.60 N/m ²	-417.88 kN	0.08 kN	417.88 kN
200°	500.60 N/m ²	-663.45 kN	-133.67 kN	676.78 kN	200°	500.60 N/m ²	-417.88 kN	-79.81 kN	425.43 kN
220°	500.60 N/m ²	-354.44 kN	-133.67 kN	378.81 kN	220°	500.60 N/m ²	-215.43 kN	-79.81 kN	229.74 kN
240°	500.60 N/m ²	-354.44 kN	-133.67 kN	378.81 kN	240°	500.60 N/m ²	-215.43 kN	-79.81 kN	229.74 kN
260°	245.29 N/m ²	-354.44 kN	-133.67 kN	378.81 kN	260°	245.29 N/m ²	-215.43 kN	-79.81 kN	229.74 kN
270°	245.29 N/m ²	1.26 kN	-68.93 kN	68.94 kN	270°	245.29 N/m ²	0.72 kN	-40.74 kN	40.75 kN
280°	245.29 N/m ²	111.73 kN	-68.93 kN	131.29 kN	280°	245.29 N/m ²	67.24 kN	-40.74 kN	78.62 kN
300°	245.29 N/m ²	111.73 kN	-68.93 kN	131.29 kN	300°	245.29 N/m ²	67.24 kN	-40.74 kN	78.62 kN
320°	245.29 N/m ²	111.73 kN	-55.74 kN	124.87 kN	320°	245.29 N/m ²	67.24 kN	-32.84 kN	74.83 kN
340°	245.29 N/m ²	359.23 kN	-55.74 kN	363.53 kN	340°	245.29 N/m ²	218.27 kN	-32.84 kN	220.73 kN

Ilot 2-2				
Wind direction	Wind pressure	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	500.60 N/m ²	699.77 kN	-0.03 kN	699.77 kN
20°	500.60 N/m ²	699.77 kN	217.78 kN	732.88 kN
40°	500.60 N/m ²	435.68 kN	217.78 kN	487.08 kN
60°	500.60 N/m ²	435.68 kN	267.43 kN	511.21 kN
80°	500.60 N/m ²	435.68 kN	267.43 kN	511.21 kN
90°	500.60 N/m ²	5.88 kN	267.43 kN	267.49 kN
100°	500.60 N/m ²	-674.09 kN	267.43 kN	725.20 kN
120°	500.60 N/m ²	-674.09 kN	267.43 kN	725.20 kN
140°	500.60 N/m ²	-674.09 kN	254.32 kN	720.47 kN
160°	500.60 N/m ²	-1,286.58 kN	254.32 kN	1,311.48 kN
180°	500.60 N/m ²	-1,286.58 kN	0.28 kN	1,286.58 kN
200°	500.60 N/m ²	-1,286.58 kN	-254.32 kN	1,311.48 kN
220°	500.60 N/m ²	-674.09 kN	-254.32 kN	720.47 kN
240°	500.60 N/m ²	-674.09 kN	-254.32 kN	720.47 kN
260°	245.29 N/m ²	-674.09 kN	-254.32 kN	720.47 kN
270°	245.29 N/m ²	2.88 kN	-131.04 kN	131.07 kN
280°	245.29 N/m ²	213.49 kN	-131.04 kN	250.49 kN
300°	245.29 N/m ²	213.49 kN	-131.04 kN	250.49 kN
320°	245.29 N/m ²	213.49 kN	-106.71 kN	238.67 kN
340°	245.29 N/m ²	699.77 kN	-106.71 kN	707.86 kN

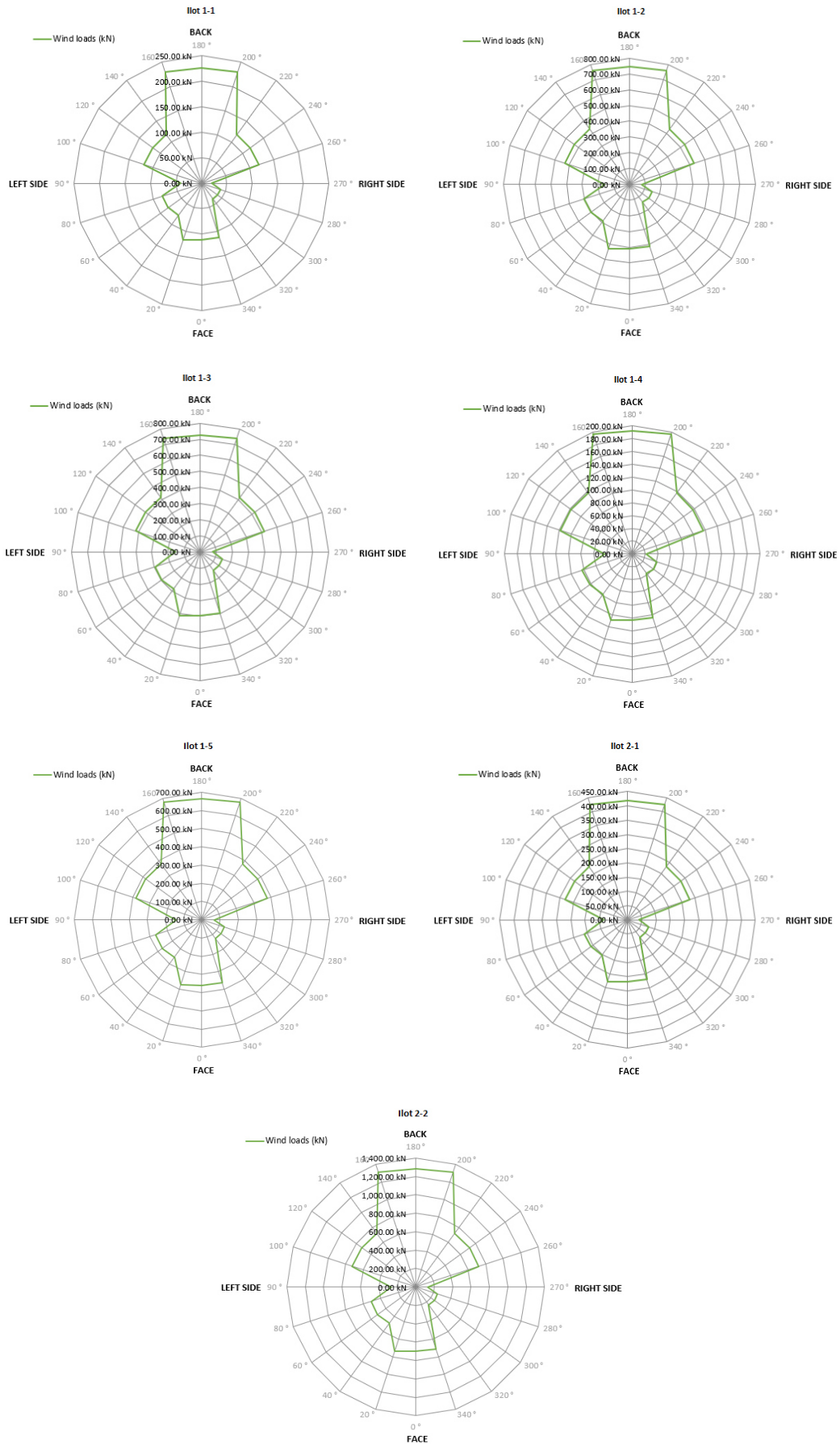


Figure 4 : Diagramme des efforts de vent (Résultante horizontale $|F_{xy}|$)

2.3. Efforts de vague

2.3.1. Méthode de calcul

Une houle régulière de période T génère des charges sur le système flottant de même période (charges alternées). Cependant, comme les efforts de pression incluent un terme proportionnel à la vitesse de l'onde au carré, des charges constantes sont également générées en raison de la vitesse de l'onde.

La charge alternée, nécessite des calculs complexes incluant la masse et l'inertie de la centrale flottante, ainsi que la rigidité du système d'ancrage. Selon la longueur d'onde, l'îlot suivra les oscillations des vagues et se déplacera presque uniquement verticalement autour de sa position d'équilibre.

Concernant la charge constante, son expression générale est donnée par la formule de H Maruo. Elle s'applique sur un système bidimensionnel en profondeur infinie et pour une incidence normale (direction d'onde non parallèle à l'objet). Cette expression a été complétée par M.S Longuet-Higgins pour une profondeur finie et une incidence normale.

La formule de Maruo est la suivante :

$$\bar{F}_y = \frac{1}{16} \rho g [H_I^2 + H_R^2 - H_T^2] \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] |\sin \beta| \sin \beta$$

Où :

F_y = effort de dérive constant généré par les vagues ("efforts de vague")

ρ = masse volumique de l'eau = 1 000 kg/m³

g = accélération de la pesanteur = 9,81 m/s²

H_I = hauteur de vague incidente = hauteur de vague significative

H_R = hauteur de vague réfractée

H_T = hauteur de vague transmise

k = nombre d'onde, $k = 2\pi/\lambda$

h = Profondeur d'eau moyenne

β = angle d'incidence entre la direction des vagues et la centrale flottante

Les fetchs sont calculés pour les mêmes directions que celles du calcul des efforts de vent, il est donc considéré que la direction de la vague est identique à la direction du vent.

De plus, en raison de la conservation de l'énergie :

$$H_I^2 = H_R^2 + H_T^2 + H_D^2$$

Où :

H_I = hauteur de vague significative

H_R = hauteur de vague réfractée

H_T = hauteur de vague transmise

H_D = hauteur de vague dissipée

D'après l'expérience de CTI, il est supposé qu'un tiers de l'énergie est réfracté, un tiers est dissipé et un tiers est transmis, ce qui signifie que :

$$H_R = H_T = H_D$$

Avec cette hypothèse, la formule de Maruo est simplifiée comme suit :

$$\bar{F}_y = \frac{1}{16} \rho g H_I^2 \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] |\sin \beta| \sin \beta$$

Selon les conditions de profondeur (eaux profondes / eaux de transition / eaux peu profondes), la formule peut également être simplifiée.

Pour les **eaux profondes**, elle devient :

$$\bar{F}_y = \frac{1}{16} \rho g H_I^2 |\sin \beta| \sin \beta$$

En considérant maintenant un système à 3 dimensions, l'expression peut s'écrire :

$$\bar{F}_x = \frac{1}{16} \rho g H_I^2 |\cos \beta| \cos \beta \times L$$

$$\bar{F}_y = \frac{1}{16} \rho g H_I^2 |\sin \beta| \sin \beta \times L$$

Où :

F_y = effort de dérive constant généré par les vagues ("effort de vague")

ρ = masse volumique = 1 000 kg/m³

g = accélération de la pesanteur = 9,81 m/s²

H_I = hauteur de vague incidente = hauteur de vague significative

β = angle d'incidence

L = dimension de la centrale perpendiculairement à la direction de la vague

2.3.2. Modèle de génération de vagues

Le modèle prédictif de vague de CTI est basé sur le modèle prédictif suivant : Coastal Engineering Manual (CEM).

Une note de calcul détaillé est fournie en annexe 2 « Note de calcul sur la génération des vagues ». La note présente la méthode appliquée à l'ilot 1-1.

2.3.3. Efforts de vague

Ci-dessous les efforts de vague en fonction des directions de vent :

Tableau 3 : Effort de vague par direction

Ilot 1-1					Ilot 1-2				
Wind direction	Wave height	F _x	F _y	F _{horizontal}	Wind direction	Wave height	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	0.09 m	0.65 kN	0.00 kN	0.65 kN	0°	0.09 m	0.97 kN	0.00 kN	0.97 kN
20°	0.10 m	0.90 kN	0.33 kN	0.96 kN	20°	0.10 m	1.54 kN	0.56 kN	1.64 kN
40°	0.11 m	0.82 kN	0.69 kN	1.07 kN	40°	0.11 m	1.56 kN	1.31 kN	2.04 kN
60°	0.12 m	0.53 kN	0.91 kN	1.05 kN	60°	0.12 m	1.11 kN	1.92 kN	2.22 kN
80°	0.10 m	0.11 kN	0.63 kN	0.64 kN	80°	0.10 m	0.27 kN	1.52 kN	1.55 kN
90°	0.10 m	0.00 kN	0.44 kN	0.44 kN	90°	0.10 m	0.00 kN	1.20 kN	1.20 kN
100°	0.17 m	-0.90 kN	1.69 kN	1.72 kN	100°	0.17 m	-0.72 kN	4.10 kN	4.17 kN
120°	0.23 m	-2.14 kN	3.24 kN	4.28 kN	120°	0.23 m	-4.51 kN	7.81 kN	9.01 kN
140°	0.24 m	-3.87 kN	3.24 kN	5.05 kN	140°	0.24 m	-7.35 kN	6.17 kN	9.59 kN
160°	0.24 m	-4.71 kN	1.72 kN	5.02 kN	160°	0.24 m	-8.09 kN	2.94 kN	8.61 kN
180°	0.23 m	-4.00 kN	0.00 kN	4.00 kN	180°	0.23 m	-6.01 kN	0.00 kN	6.01 kN
200°	0.23 m	-4.31 kN	-1.57 kN	4.58 kN	200°	0.23 m	-7.39 kN	-2.69 kN	7.86 kN
220°	0.24 m	-4.03 kN	-3.38 kN	5.26 kN	220°	0.24 m	-7.67 kN	-6.43 kN	10.01 kN
240°	0.23 m	-2.14 kN	-3.70 kN	4.28 kN	240°	0.23 m	-4.51 kN	-7.81 kN	9.01 kN
260°	0.15 m	-0.23 kN	-1.31 kN	1.33 kN	260°	0.15 m	-0.56 kN	-3.17 kN	3.22 kN
270°	0.08 m	0.00 kN	-0.28 kN	0.28 kN	270°	0.08 m	0.00 kN	-0.75 kN	0.75 kN
280°	0.09 m	0.08 kN	-0.47 kN	0.48 kN	280°	0.09 m	0.20 kN	-1.15 kN	1.16 kN
300°	0.10 m	0.41 kN	-0.71 kN	0.81 kN	300°	0.10 m	0.86 kN	-1.49 kN	1.72 kN
320°	0.10 m	0.74 kN	-0.62 kN	0.97 kN	320°	0.10 m	1.41 kN	-1.18 kN	1.84 kN
340°	0.11 m	0.95 kN	-0.35 kN	1.01 kN	340°	0.11 m	1.63 kN	-0.59 kN	1.74 kN

Ilot 1-3					Ilot 1-4				
Wind direction	Wave height	F _x	F _y	F _{horizontal}	Wind direction	Wave height	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	0.10 m	1.11 kN	0.00 kN	1.11 kN	0°	0.11 m	0.47 kN	0.00 kN	0.47 kN
20°	0.11 m	1.73 kN	0.63 kN	1.84 kN	20°	0.19 m	2.26 kN	0.82 kN	2.41 kN
40°	0.12 m	1.91 kN	1.60 kN	2.49 kN	40°	0.22 m	3.33 kN	2.79 kN	4.34 kN
60°	0.14 m	1.56 kN	2.71 kN	3.13 kN	60°	0.18 m	1.60 kN	2.77 kN	3.20 kN
80°	0.15 m	0.57 kN	3.26 kN	3.31 kN	80°	0.16 m	0.44 kN	2.51 kN	2.55 kN
90°	0.09 m	0.00 kN	1.05 kN	1.05 kN	90°	0.13 m	0.00 kN	1.61 kN	1.61 kN
100°	0.10 m	-0.27 kN	1.53 kN	1.55 kN	100°	0.15 m	-0.39 kN	2.22 kN	2.26 kN
120°	0.14 m	-1.68 kN	2.91 kN	3.36 kN	120°	0.20 m	-1.92 kN	3.33 kN	3.84 kN
140°	0.14 m	-2.62 kN	2.20 kN	3.42 kN	140°	0.23 m	-3.70 kN	3.11 kN	4.83 kN
160°	0.11 m	-1.73 kN	0.63 kN	1.84 kN	160°	0.23 m	-3.47 kN	1.26 kN	3.69 kN
180°	0.09 m	-0.97 kN	0.00 kN	0.97 kN	180°	0.17 m	-1.13 kN	0.00 kN	1.13 kN
200°	0.10 m	-1.37 kN	-0.50 kN	1.46 kN	200°	0.13 m	-1.11 kN	-0.40 kN	1.18 kN
220°	0.12 m	-1.73 kN	-1.46 kN	2.26 kN	220°	0.13 m	-1.19 kN	-1.00 kN	1.55 kN
240°	0.11 m	-1.00 kN	-1.74 kN	2.01 kN	240°	0.12 m	-0.73 kN	-1.26 kN	1.46 kN
260°	0.08 m	-0.15 kN	-0.85 kN	0.86 kN	260°	0.08 m	-0.11 kN	-0.64 kN	0.65 kN
270°	0.08 m	0.00 kN	-0.84 kN	0.84 kN	270°	0.08 m	0.00 kN	-0.62 kN	0.62 kN
280°	0.07 m	0.13 kN	-0.75 kN	0.76 kN	280°	0.10 m	0.18 kN	-1.05 kN	1.06 kN
300°	0.09 m	0.68 kN	-1.17 kN	1.36 kN	300°	0.11 m	0.60 kN	-1.03 kN	1.19 kN
320°	0.10 m	1.34 kN	-1.13 kN	1.75 kN	320°	0.10 m	0.66 kN	-0.55 kN	0.86 kN
340°	0.12 m	2.10 kN	-0.76 kN	2.23 kN	340°	0.09 m	0.52 kN	-0.19 kN	0.55 kN

Ilot 1-5					Ilot 2-1				
Wind direction	Wave height	F _x	F _y	F _{horizontal}	Wind direction	Wave height	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	0.60 m	41.55 kN	0.00 kN	41.55 kN	0°	0.10 m	0.96 kN	0.00 kN	0.96 kN
20°	0.20 m	5.43 kN	1.97 kN	5.77 kN	20°	0.20 m	4.36 kN	1.59 kN	4.64 kN
40°	0.23 m	6.83 kN	5.73 kN	8.92 kN	40°	0.23 m	5.20 kN	4.37 kN	6.79 kN
60°	0.23 m	4.33 kN	7.50 kN	8.66 kN	60°	0.28 m	4.51 kN	7.82 kN	9.03 kN
80°	0.26 m	1.56 kN	8.86 kN	8.99 kN	80°	0.35 m	1.90 kN	10.80 kN	10.96 kN
90°	0.15 m	0.00 kN	2.70 kN	2.70 kN	90°	0.15 m	0.00 kN	1.73 kN	1.73 kN
100°	0.20 m	-0.91 kN	5.16 kN	5.23 kN	100°	0.23 m	-0.82 kN	4.66 kN	4.74 kN
120°	0.23 m	-4.33 kN	7.50 kN	8.66 kN	120°	0.23 m	-3.13 kN	5.42 kN	6.25 kN
140°	0.23 m	-6.83 kN	5.73 kN	8.92 kN	140°	0.23 m	-5.20 kN	4.37 kN	6.79 kN
160°	0.26 m	-9.32 kN	3.39 kN	9.92 kN	160°	0.24 m	-6.67 kN	2.43 kN	7.10 kN
180°	0.29 m	-9.94 kN	0.00 kN	9.94 kN	180°	0.25 m	-6.42 kN	0.00 kN	6.42 kN
200°	0.18 m	-4.52 kN	-1.65 kN	4.81 kN	200°	0.12 m	-1.66 kN	-0.60 kN	1.76 kN
220°	0.23 m	-6.83 kN	-5.73 kN	8.92 kN	220°	0.13 m	-1.67 kN	-1.40 kN	2.18 kN
240°	0.23 m	-4.33 kN	-7.50 kN	8.66 kN	240°	0.20 m	-2.23 kN	-3.86 kN	4.45 kN
260°	0.12 m	-0.36 kN	-2.03 kN	2.06 kN	260°	0.15 m	-0.36 kN	-2.02 kN	2.06 kN
270°	0.06 m	0.00 kN	-0.47 kN	0.47 kN	270°	0.10 m	0.00 kN	-0.82 kN	0.82 kN
280°	0.15 m	0.53 kN	-3.00 kN	3.05 kN	280°	0.12 m	0.22 kN	-1.27 kN	1.29 kN
300°	0.13 m	1.38 kN	-2.39 kN	2.76 kN	300°	0.17 m	1.59 kN	-2.75 kN	3.17 kN
320°	0.15 m	2.83 kN	-2.38 kN	3.70 kN	320°	0.18 m	3.12 kN	-2.62 kN	4.07 kN
340°	0.16 m	3.73 kN	-1.36 kN	3.96 kN	340°	0.24 m	6.36 kN	-2.32 kN	6.77 kN

Ilot 2-2				
Wind direction	Wave height	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	0.52 m	58.06 kN	0.00 kN	58.06 kN
20°	0.26 m	15.04 kN	5.47 kN	16.00 kN
40°	0.26 m	12.13 kN	10.18 kN	15.84 kN
60°	0.28 m	8.12 kN	14.06 kN	16.24 kN
80°	0.32 m	2.67 kN	15.13 kN	15.36 kN
90°	0.24 m	0.00 kN	6.84 kN	6.84 kN
100°	0.26 m	-1.74 kN	9.88 kN	10.04 kN
120°	0.27 m	-7.63 kN	13.21 kN	15.26 kN
140°	0.27 m	-13.45 kN	11.28 kN	17.55 kN
160°	0.26 m	-15.58 kN	5.67 kN	16.58 kN
180°	0.30 m	-19.80 kN	0.00 kN	19.80 kN
200°	0.32 m	-23.02 kN	-8.38 kN	24.49 kN
220°	0.28 m	-14.31 kN	-12.01 kN	18.68 kN
240°	0.20 m	-4.01 kN	-6.94 kN	8.01 kN
260°	0.18 m	-0.85 kN	-4.84 kN	4.91 kN
270°	0.13 m	0.00 kN	-2.00 kN	2.00 kN
280°	0.13 m	0.45 kN	-2.58 kN	2.62 kN
300°	0.18 m	3.37 kN	-5.84 kN	6.74 kN
320°	0.25 m	11.16 kN	-9.36 kN	14.56 kN
340°	0.28 m	17.96 kN	-6.54 kN	19.11 kN

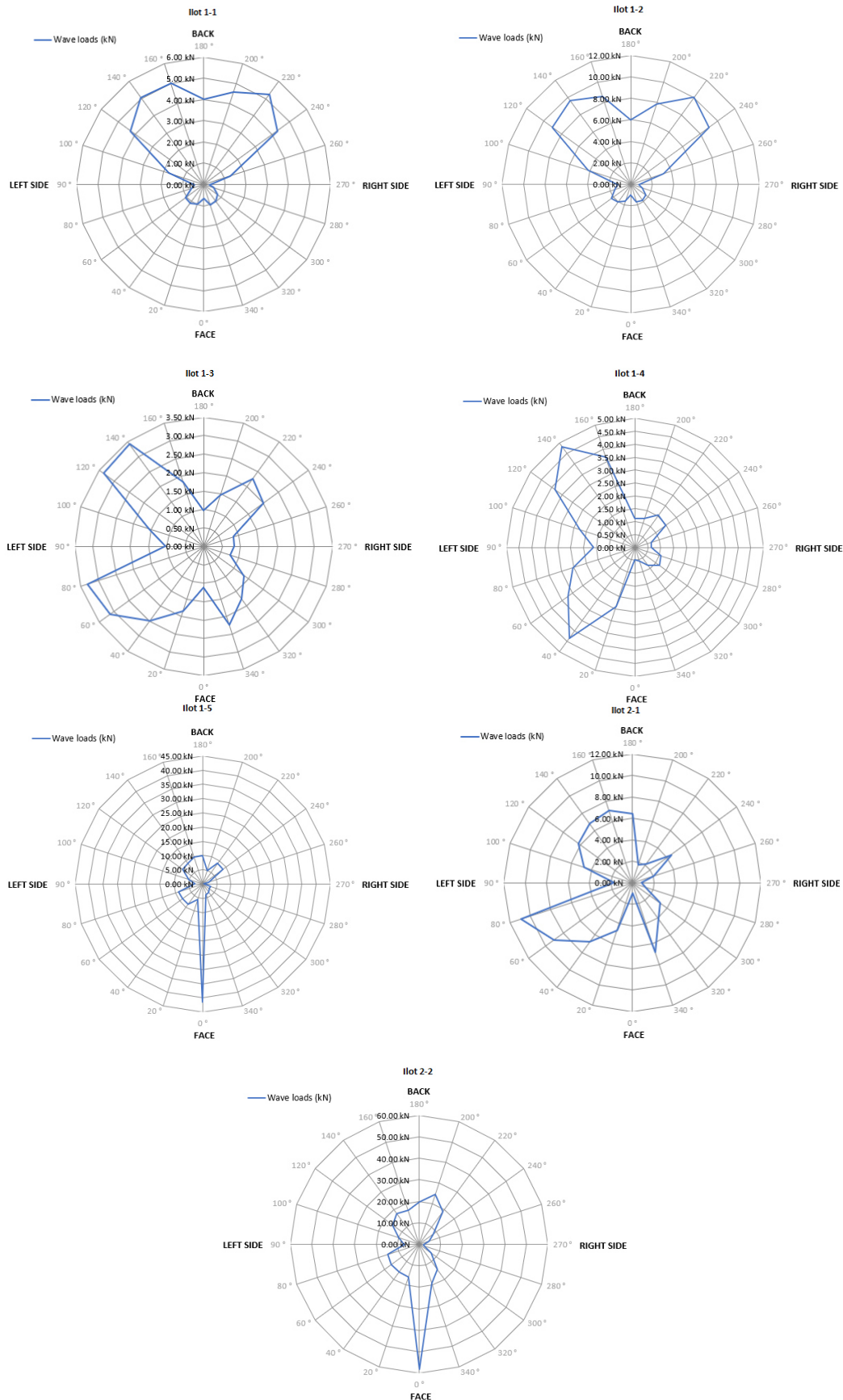


Figure 5 : Diagramme des efforts de vagues (Résultante horizontale | Fxy |)

2.4. Efforts de courant

2.4.1. Méthode de calcul

Les efforts hydrodynamiques dus au courant sont une combinaison de 2 composantes principales :

- L'effort de trainée généré par le courant passant sous l'îlot et frottant sur le dessous des flotteurs (surface parallèle au flux)
- L'effort de trainée généré par le courant touchant le bord de l'îlot, en particulier la partie des flotteurs sous l'eau (surface perpendiculaire au flux).

Mathématiquement, ces efforts peuvent être exprimés comme suit :

$$F_* = \frac{1}{2} \rho (C_n \cdot A_n + C_d \cdot A) v^2$$

Où :

F_* = effort de courant (en Newton) dans la direction de l'écoulement

ρ = masse volumique de l'eau = 1 000 kg/m³

C_n = coefficient hydrodynamique, pris égal à 3,72 pour être conservateur.

A_n = surface des flotteurs immergée dans l'eau, perpendiculaire au flux

C_d = coefficient de trainée, pris égal à 0,004.

A = surface de l'îlot

v = vitesse d'écoulement (m/s)

F_* peut être projeté sur les axes x et y, ce qui donne :

$$\begin{cases} F_x = \frac{1}{2} \rho (C_n \cdot \eta \cdot L + C_d \cdot A) v^2 \cos \beta \\ F_y = \frac{1}{2} \rho (C_n \cdot \eta \cdot L + C_d \cdot A) v^2 \sin \beta \end{cases}$$

Où :

L = projection de la centrale flottante sur le plan normal à la direction d'écoulement

η = tirant d'eau de la structure (m), en moyenne égal à 0,06 m

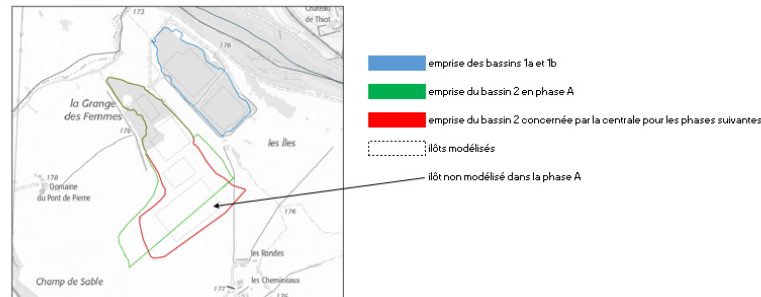
β = direction angulaire de l'écoulement

2.4.2. Efforts de courant

D'après les informations fournies par le client, il est possible dans certains cas exceptionnels d'inondation, d'observer du courant sur site. Une étude hydraulique a été menée et a conclu aux vitesses d'écoulement suivantes :

Tableau 4 : Vitesse maximale de courant

Vitesse maximale (m/s) à retenir selon les bassins, par tranche de 20° (0°=Nord ; 90°=Est) - Scénarios avec centrale et extensions																		
EMPRISE BASSIN	0à20	20à40	40à60	60à80	80à100	100à120	120à140	140à160	160à180	180à200	200à220	220à240	240à260	260à280	280à300	300à320	320à340	340à360
Vitesse max Bassin 1a et 1b (bleu)	0.51	0.45	0.45	0.33	0.33	0.20	0.31	0.24	0.40	0.23	0.31	0.35	0.41	0.35	0.61	0.79	0.77	1.05
Bassin 2 (ventrouge)	0.31	0.54	0.48	0.29	0.25	0.33	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.56	0.57	0.57	0.66	0.90	1.06	0.95



En passant au référentiel C&T, nous obtenons :

Tableau 5 : Vitesse maximale de courant (référentiel C&T)

0°=face to PV panels	Vitesse maximale par direction (m/s)	
	lot 1-1, 1-2 et 1-3	lot 1-4, 1-5, 2-1 et 2-2
0°	0.31	0.29
20°	0.24	0.29
40°	0.40	0.29
60°	0.23	0.29
80°	0.31	0.56
90°	0.35	0.56
100°	0.35	0.57
120°	0.41	0.57
140°	0.35	0.66
160°	0.61	0.90
180°	0.79	1.08
200°	0.77	0.95
220°	1.05	0.91
240°	0.51	0.54
260°	0.45	0.48
270°	0.45	0.48
280°	0.45	0.29
300°	0.33	0.25
320°	0.39	0.33
340°	0.20	0.29

Ci-dessous les efforts de courant en fonction des directions de vent :

Tableau 6 : Effort de courant par direction

lot 1-1					lot 1-2				
Water current direction	Current speed	F _x	F _y	F _{horizontal}	Water current direction	Current speed	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	0.31 m/s	3.12 kN	0.00 kN	3.12 kN	0°	0.31 m/s	9.23 kN	0.00 kN	9.23 kN
20°	0.24 m/s	1.86 kN	0.68 kN	1.98 kN	20°	0.24 m/s	5.55 kN	2.02 kN	5.90 kN
40°	0.40 m/s	4.33 kN	3.64 kN	5.66 kN	40°	0.40 m/s	13.25 kN	11.11 kN	17.29 kN
60°	0.23 m/s	0.88 kN	1.52 kN	1.76 kN	60°	0.23 m/s	2.82 kN	4.88 kN	5.64 kN
80°	0.31 m/s	0.49 kN	2.79 kN	2.83 kN	80°	0.31 m/s	1.70 kN	9.63 kN	9.78 kN
90°	0.35 m/s	0.00 kN	3.25 kN	3.25 kN	90°	0.35 m/s	0.00 kN	11.79 kN	11.79 kN
100°	0.35 m/s	-0.61 kN	3.47 kN	3.53 kN	100°	0.35 m/s	-2.12 kN	12.00 kN	12.18 kN
120°	0.41 m/s	-2.75 kN	4.77 kN	5.51 kN	120°	0.41 m/s	-8.84 kN	15.31 kN	17.68 kN
140°	0.35 m/s	-3.28 kN	2.75 kN	4.28 kN	140°	0.35 m/s	-10.02 kN	8.41 kN	13.09 kN
160°	0.61 m/s	-12.31 kN	4.48 kN	13.09 kN	160°	0.61 m/s	-36.60 kN	13.32 kN	38.95 kN
180°	0.79 m/s	-20.65 kN	0.00 kN	20.65 kN	180°	0.79 m/s	-61.17 kN	0.00 kN	61.17 kN
200°	0.77 m/s	-19.27 kN	-7.01 kN	20.51 kN	200°	0.77 m/s	-57.32 kN	-20.86 kN	61.00 kN
220°	1.05 m/s	-29.71 kN	-24.93 kN	38.79 kN	220°	1.05 m/s	-90.81 kN	-76.20 kN	118.55 kN
240°	0.51 m/s	-4.34 kN	-7.51 kN	8.67 kN	240°	0.51 m/s	-13.92 kN	-24.10 kN	27.83 kN
260°	0.45 m/s	-1.04 kN	-5.92 kN	6.01 kN	260°	0.45 m/s	-3.61 kN	-20.46 kN	20.78 kN
270°	0.45 m/s	0.00 kN	-5.56 kN	5.56 kN	270°	0.45 m/s	0.00 kN	-20.18 kN	20.18 kN
280°	0.45 m/s	1.05 kN	-5.94 kN	6.03 kN	280°	0.45 m/s	3.62 kN	-20.53 kN	20.85 kN
300°	0.33 m/s	1.81 kN	-3.13 kN	3.62 kN	300°	0.33 m/s	5.81 kN	-10.06 kN	11.62 kN
320°	0.39 m/s	4.06 kN	-3.40 kN	5.30 kN	320°	0.39 m/s	12.40 kN	-10.40 kN	16.19 kN
340°	0.20 m/s	1.32 kN	-0.48 kN	1.41 kN	340°	0.20 m/s	3.94 kN	-1.43 kN	4.19 kN

lot 1-3					lot 1-4				
Water current direction	Current speed	F _x	F _y	F _{horizontal}	Water current direction	Current speed	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	0.31 m/s	9.02 kN	0.00 kN	9.02 kN	0°	0.29 m/s	2.23 kN	0.00 kN	2.23 kN
20°	0.24 m/s	5.43 kN	1.98 kN	5.78 kN	20°	0.29 m/s	2.39 kN	0.87 kN	2.54 kN
40°	0.40 m/s	12.97 kN	10.89 kN	16.94 kN	40°	0.29 m/s	2.21 kN	1.85 kN	2.88 kN
60°	0.23 m/s	2.76 kN	4.78 kN	5.52 kN	60°	0.29 m/s	1.51 kN	2.61 kN	3.02 kN
80°	0.31 m/s	1.66 kN	9.42 kN	9.57 kN	80°	0.56 m/s	2.01 kN	11.39 kN	11.57 kN
90°	0.35 m/s	0.00 kN	11.52 kN	11.52 kN	90°	0.56 m/s	0.00 kN	11.26 kN	11.26 kN
100°	0.35 m/s	-2.07 kN	11.74 kN	11.92 kN	100°	0.57 m/s	-2.07 kN	11.73 kN	11.91 kN
120°	0.41 m/s	-8.66 kN	14.99 kN	17.31 kN	120°	0.57 m/s	-6.07 kN	10.52 kN	12.15 kN
140°	0.35 m/s	-9.82 kN	8.24 kN	12.82 kN	140°	0.66 m/s	-11.55 kN	9.69 kN	15.07 kN
160°	0.61 m/s	-35.83 kN	13.04 kN	38.13 kN	160°	0.90 m/s	-23.65 kN	8.61 kN	25.17 kN
180°	0.79 m/s	-59.79 kN	0.00 kN	59.79 kN	180°	1.08 m/s	-30.09 kN	0.00 kN	30.09 kN
200°	0.77 m/s	-56.10 kN	-20.42 kN	59.71 kN	200°	0.95 m/s	-26.19 kN	-9.53 kN	27.87 kN
220°	1.05 m/s	-88.95 kN	-74.64 kN	116.11 kN	220°	0.91 m/s	-22.03 kN	-18.49 kN	28.76 kN
240°	0.51 m/s	-13.63 kN	-23.60 kN	27.25 kN	240°	0.54 m/s	-5.41 kN	-9.38 kN	10.83 kN
260°	0.45 m/s	-3.53 kN	-20.02 kN	20.33 kN	260°	0.48 m/s	-1.45 kN	-8.24 kN	8.36 kN
270°	0.45 m/s	0.00 kN	-19.72 kN	19.72 kN	270°	0.48 m/s	0.00 kN	-8.14 kN	8.14 kN
280°	0.45 m/s	3.54 kN	-20.09 kN	20.40 kN	280°	0.29 m/s	0.52 kN	-2.92 kN	2.97 kN
300°	0.33 m/s	5.69 kN	-9.85 kN	11.38 kN	300°	0.25 m/s	1.10 kN	-1.91 kN	2.21 kN
320°	0.39 m/s	12.14 kN	-10.19 kN	15.85 kN	320°	0.33 m/s	2.93 kN	-2.46 kN	3.83 kN
340°	0.20 m/s	3.85 kN	-1.40 kN	4.10 kN	340°	0.29 m/s	2.53 kN	-0.92 kN	2.69 kN

lot 1-5					lot 2-1				
Water current direction	Current speed	F _x	F _y	F _{horizontal}	Water current direction	Current speed	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	0.29 m/s	7.63 kN	0.00 kN	7.63 kN	0°	0.29 m/s	4.98 kN	0.00 kN	4.98 kN
20°	0.29 m/s	7.23 kN	2.63 kN	7.70 kN	20°	0.29 m/s	4.70 kN	1.71 kN	5.00 kN
40°	0.29 m/s	6.12 kN	5.13 kN	7.99 kN	40°	0.29 m/s	3.92 kN	3.29 kN	5.12 kN
60°	0.29 m/s	3.94 kN	6.82 kN	7.88 kN	60°	0.29 m/s	2.47 kN	4.29 kN	4.95 kN
80°	0.56 m/s	5.05 kN	28.62 kN	29.06 kN	80°	0.56 m/s	3.08 kN	17.49 kN	17.76 kN
90°	0.56 m/s	0.00 kN	28.00 kN	28.00 kN	90°	0.56 m/s	0.00 kN	16.82 kN	16.82 kN
100°	0.57 m/s	-5.19 kN	29.46 kN	29.91 kN	100°	0.57 m/s	-3.17 kN	18.00 kN	18.28 kN
120°	0.57 m/s	-15.85 kN	27.46 kN	31.71 kN	120°	0.57 m/s	-9.96 kN	17.25 kN	19.92 kN
140°	0.66 m/s	-32.03 kN	26.88 kN	41.81 kN	140°	0.66 m/s	-20.54 kN	17.23 kN	26.81 kN
160°	0.90 m/s	-71.61 kN	26.06 kN	76.21 kN	160°	0.90 m/s	-46.52 kN	16.93 kN	49.51 kN
180°	1.08 m/s	-102.86 kN	0.00 kN	102.86 kN	180°	1.08 m/s	-67.21 kN	0.00 kN	67.21 kN
200°	0.95 m/s	-79.28 kN	-28.86 kN	84.37 kN	200°	0.95 m/s	-51.51 kN	-18.75 kN	54.81 kN
220°	0.91 m/s	-61.12 kN	-51.29 kN	79.79 kN	220°	0.91 m/s	-39.19 kN	-32.88 kN	51.16 kN
240°	0.54 m/s	-14.13 kN	-24.47 kN	28.26 kN	240°	0.54 m/s	-8.88 kN	-15.37 kN	17.75 kN
260°	0.48 m/s	-3.65 kN	-20.69 kN	21.00 kN	260°	0.48 m/s	-2.23 kN	-12.64 kN	12.83 kN
270°	0.48 m/s	0.00 kN	-20.24 kN	20.24 kN	270°	0.48 m/s	0.00 kN	-12.16 kN	12.16 kN
280°	0.29 m/s	1.29 kN	-7.34 kN	7.45 kN	280°	0.29 m/s	0.79 kN	-4.49 kN	4.55 kN
300°	0.25 m/s	2.88 kN	-4.99 kN	5.76 kN	300°	0.25 m/s	1.81 kN	-3.13 kN	3.62 kN
320°	0.33 m/s	8.14 kN	-6.83 kN	10.62 kN	320°	0.33 m/s	5.22 kN	-4.38 kN	6.81 kN
340°	0.29 m/s	7.65 kN	-2.78 kN	8.14 kN	340°	0.29 m/s	4.97 kN	-1.81 kN	5.29 kN

lot 2-2				
Water current direction	Current speed	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	0.29 m/s	14.68 kN	0.00 kN	14.68 kN
20°	0.29 m/s	13.41 kN	4.88 kN	14.27 kN
40°	0.29 m/s	11.00 kN	9.23 kN	14.36 kN
60°	0.29 m/s	6.91 kN	11.97 kN	13.83 kN
80°	0.56 m/s	8.72 kN	49.43 kN	50.20 kN
90°	0.56 m/s	0.00 kN	48.16 kN	48.16 kN
100°	0.57 m/s	-8.97 kN	50.88 kN	51.66 kN
120°	0.57 m/s	-27.82 kN	48.18 kN	55.64 kN
140°	0.66 m/s	-57.57 kN	48.31 kN	75.15 kN
160°	0.90 m/s	-132.75 kN	48.32 kN	141.27 kN
180°	1.08 m/s	-198.00 kN	0.00 kN	198.00 kN
200°	0.95 m/s	-146.97 kN	-53.49 kN	156.41 kN
220°	0.91 m/s	-109.85 kN	-92.18 kN	143.40 kN
240°	0.54 m/s	-24.79 kN	-42.94 kN	49.59 kN
260°	0.48 m/s	-6.30 kN	-35.73 kN	36.28 kN
270°	0.48 m/s	0.00 kN	-34.81 kN	34.81 kN
280°	0.29 m/s	2.24 kN	-12.68 kN	12.88 kN
300°	0.25 m/s	5.05 kN	-8.75 kN	10.10 kN
320°	0.33 m/s	14.62 kN	-12.27 kN	19.09 kN
340°	0.29 m/s	14.18 kN	-5.16 kN	15.09 kN

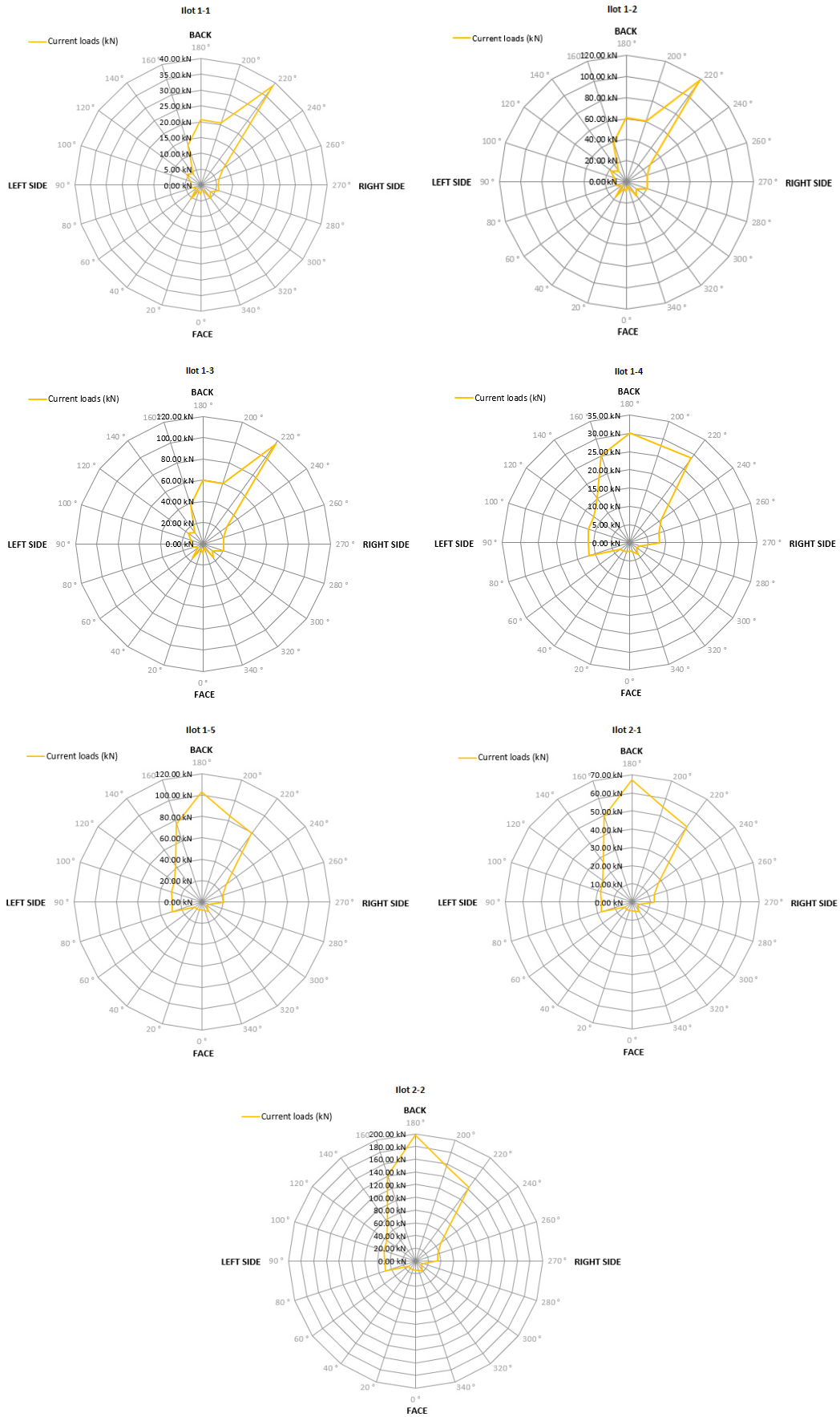


Figure 6 : Diagramme des efforts de courant (Résultante horizontale | Fxy |)

3| ENVELOPPE DE CHARGE

3.1. Combinaison des efforts

Conformément au standard BV NR 493, en considérant une période de retour globale de 50 ans et une combinaison régie par le vent, la combinaison des efforts s'exprime de la façon suivante :

$$\begin{cases} F_{x,combiné} = F_{x,vent} + F_{x,courant} + F_{x,vague} \\ F_{y,combiné} = F_{y,vent} + F_{y,courant} + F_{y,vague} \end{cases}$$

Tableau 7 : Efforts environnementaux par direction

Ilot 1-1				Ilot 1-2			
Wind direction	F _x	F _y	F _{horizontal}	Wind direction	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	115.58 kN	0.01 kN	115.58 kN	0°	418.00 kN	-0.02 kN	418.00 kN
20°	114.58 kN	33.80 kN	119.46 kN	20°	414.89 kN	132.58 kN	435.56 kN
40°	74.78 kN	37.12 kN	83.49 kN	40°	273.91 kN	142.43 kN	308.73 kN
60°	71.03 kN	43.43 kN	83.26 kN	60°	263.03 kN	167.33 kN	311.75 kN
80°	70.23 kN	44.41 kN	83.09 kN	80°	261.07 kN	171.68 kN	312.46 kN
90°	0.64 kN	44.69 kN	44.69 kN	90°	3.02 kN	173.51 kN	173.54 kN
100°	-112.14 kN	46.16 kN	121.27 kN	100°	-404.37 kN	176.63 kN	441.26 kN
120°	-116.13 kN	49.47 kN	126.22 kN	120°	-414.88 kN	183.65 kN	453.71 kN
140°	-118.38 kN	46.01 kN	127.01 kN	140°	-418.90 kN	166.73 kN	450.87 kN
160°	-243.67 kN	46.21 kN	248.01 kN	160°	-790.22 kN	168.42 kN	807.96 kN
180°	-251.31 kN	0.04 kN	251.31 kN	180°	-812.71 kN	0.17 kN	812.71 kN
200°	-250.23 kN	-48.59 kN	254.90 kN	200°	-810.23 kN	-175.70 kN	829.06 kN
220°	-144.98 kN	-68.33 kN	160.28 kN	220°	-500.01 kN	-234.79 kN	552.39 kN
240°	-117.71 kN	-51.23 kN	128.37 kN	240°	-419.95 kN	-184.06 kN	458.52 kN
260°	-112.51 kN	-47.24 kN	122.02 kN	260°	-405.70 kN	-175.78 kN	442.14 kN
270°	0.31 kN	-25.93 kN	25.93 kN	270°	1.48 kN	-99.58 kN	99.59 kN
280°	35.25 kN	-26.50 kN	44.10 kN	280°	130.78 kN	-100.34 kN	164.84 kN
300°	36.33 kN	-23.93 kN	43.51 kN	300°	133.63 kN	-90.21 kN	161.23 kN
320°	38.92 kN	-20.10 kN	43.80 kN	320°	140.77 kN	-75.29 kN	159.64 kN
340°	114.09 kN	-16.90 kN	115.33 kN	340°	413.37 kN	-65.73 kN	418.56 kN

Ilot 1-3				Ilot 1-4			
Wind direction	F _x	F _y	F _{horizontal}	Wind direction	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	406.51 kN	-0.02 kN	406.51 kN	0°	105.30 kN	0.00 kN	105.30 kN
20°	403.53 kN	128.87 kN	423.61 kN	20°	107.25 kN	36.27 kN	113.22 kN
40°	266.84 kN	138.75 kN	300.75 kN	40°	75.21 kN	39.22 kN	84.82 kN
60°	256.28 kN	163.48 kN	303.98 kN	60°	72.79 kN	49.13 kN	87.82 kN
80°	254.19 kN	168.67 kN	305.06 kN	80°	72.13 kN	57.64 kN	92.33 kN
90°	2.90 kN	168.56 kN	168.59 kN	90°	0.29 kN	56.61 kN	56.61 kN
100°	-393.08 kN	169.25 kN	427.97 kN	100°	-112.37 kN	57.69 kN	126.31 kN
120°	-401.08 kN	173.90 kN	437.16 kN	120°	-117.90 kN	57.59 kN	131.22 kN
140°	-403.19 kN	158.36 kN	433.17 kN	140°	-125.16 kN	54.23 kN	136.40 kN
160°	-763.77 kN	161.59 kN	780.67 kN	160°	-219.30 kN	51.31 kN	225.23 kN
180°	-786.97 kN	0.16 kN	786.97 kN	180°	-223.40 kN	0.04 kN	223.40 kN
200°	-783.69 kN	-168.84 kN	801.67 kN	200°	-219.48 kN	-51.37 kN	225.41 kN
220°	-481.43 kN	-224.02 kN	530.99 kN	220°	-133.12 kN	-60.92 kN	146.40 kN
240°	-405.38 kN	-173.27 kN	440.85 kN	240°	-116.05 kN	-52.08 kN	127.20 kN
260°	-394.42 kN	-168.79 kN	429.02 kN	260°	-111.47 kN	-50.32 kN	122.30 kN
270°	1.42 kN	-96.99 kN	97.00 kN	270°	0.14 kN	-30.19 kN	30.19 kN
280°	127.13 kN	-97.27 kN	160.08 kN	280°	34.84 kN	-25.40 kN	43.12 kN
300°	129.83 kN	-87.46 kN	156.54 kN	300°	35.84 kN	-24.37 kN	43.34 kN
320°	136.94 kN	-73.19 kN	155.27 kN	320°	37.73 kN	-19.96 kN	42.69 kN
340°	402.32 kN	-64.04 kN	407.39 kN	340°	105.65 kN	-18.05 kN	107.18 kN

Ilot 1-5				Ilot 2-1			
Wind direction	F _x	F _y	F _{horizontal}	Wind direction	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	408.41 kN	-0.02 kN	408.41 kN	0°	224.22 kN	0.00 kN	224.22 kN
20°	371.89 kN	118.37 kN	390.27 kN	20°	227.33 kN	70.32 kN	237.96 kN
40°	240.98 kN	124.63 kN	271.30 kN	40°	146.35 kN	74.68 kN	164.30 kN
60°	236.30 kN	154.99 kN	282.59 kN	60°	144.21 kN	95.25 kN	172.83 kN
80°	234.64 kN	178.15 kN	294.61 kN	80°	142.21 kN	111.43 kN	180.67 kN
90°	2.58 kN	171.38 kN	171.40 kN	90°	1.47 kN	101.70 kN	101.71 kN
100°	-360.55 kN	175.28 kN	400.90 kN	100°	-219.43 kN	105.81 kN	243.60 kN
120°	-374.62 kN	175.63 kN	413.75 kN	120°	-228.52 kN	105.81 kN	251.82 kN
140°	-393.31 kN	166.28 kN	427.01 kN	140°	-241.17 kN	101.40 kN	261.62 kN
160°	-744.38 kN	163.13 kN	762.05 kN	160°	-471.07 kN	99.17 kN	481.40 kN
180°	-776.25 kN	0.14 kN	776.25 kN	180°	-491.51 kN	0.08 kN	491.51 kN
200°	-747.25 kN	-164.18 kN	765.08 kN	200°	-471.04 kN	-99.16 kN	481.37 kN
220°	-422.40 kN	-190.69 kN	463.45 kN	220°	-256.28 kN	-114.09 kN	280.53 kN
240°	-372.90 kN	-165.64 kN	408.03 kN	240°	-226.53 kN	-99.04 kN	247.24 kN
260°	-358.45 kN	-156.39 kN	391.08 kN	260°	-218.02 kN	-94.47 kN	237.60 kN
270°	1.26 kN	-89.64 kN	89.64 kN	270°	0.72 kN	-53.72 kN	53.72 kN
280°	113.56 kN	-79.27 kN	138.49 kN	280°	68.26 kN	-46.50 kN	82.59 kN
300°	115.99 kN	-76.31 kN	138.84 kN	300°	70.64 kN	-46.62 kN	84.64 kN
320°	122.70 kN	-64.95 kN	138.83 kN	320°	75.57 kN	-39.83 kN	85.43 kN
340°	370.60 kN	-59.88 kN	375.41 kN	340°	229.60 kN	-36.97 kN	232.56 kN

Ilot 2-2			
Wind direction	F _x	F _y	F _{horizontal}
0°	772.51 kN	-0.03 kN	772.51 kN
20°	728.21 kN	228.13 kN	763.11 kN
40°	458.82 kN	237.19 kN	516.50 kN
60°	450.72 kN	293.47 kN	537.84 kN
80°	447.07 kN	331.99 kN	556.86 kN
90°	5.88 kN	322.43 kN	322.48 kN
100°	-684.81 kN	328.19 kN	759.39 kN
120°	-709.54 kN	328.83 kN	782.03 kN
140°	-745.11 kN	313.91 kN	808.53 kN
160°	-1,434.92 kN	308.31 kN	1,467.66 kN
180°	-1,504.38 kN	0.28 kN	1,504.38 kN
200°	-1,456.57 kN	-316.19 kN	1,490.50 kN
220°	-798.26 kN	-358.51 kN	875.07 kN
240°	-702.89 kN	-304.20 kN	765.90 kN
260°	-681.25 kN	-294.89 kN	742.33 kN
270°	2.88 kN	-167.85 kN	167.87 kN
280°	216.18 kN	-146.30 kN	261.03 kN
300°	221.91 kN	-145.63 kN	265.42 kN
320°	239.26 kN	-128.34 kN	271.51 kN
340°	731.91 kN	-118.41 kN	741.42 kN

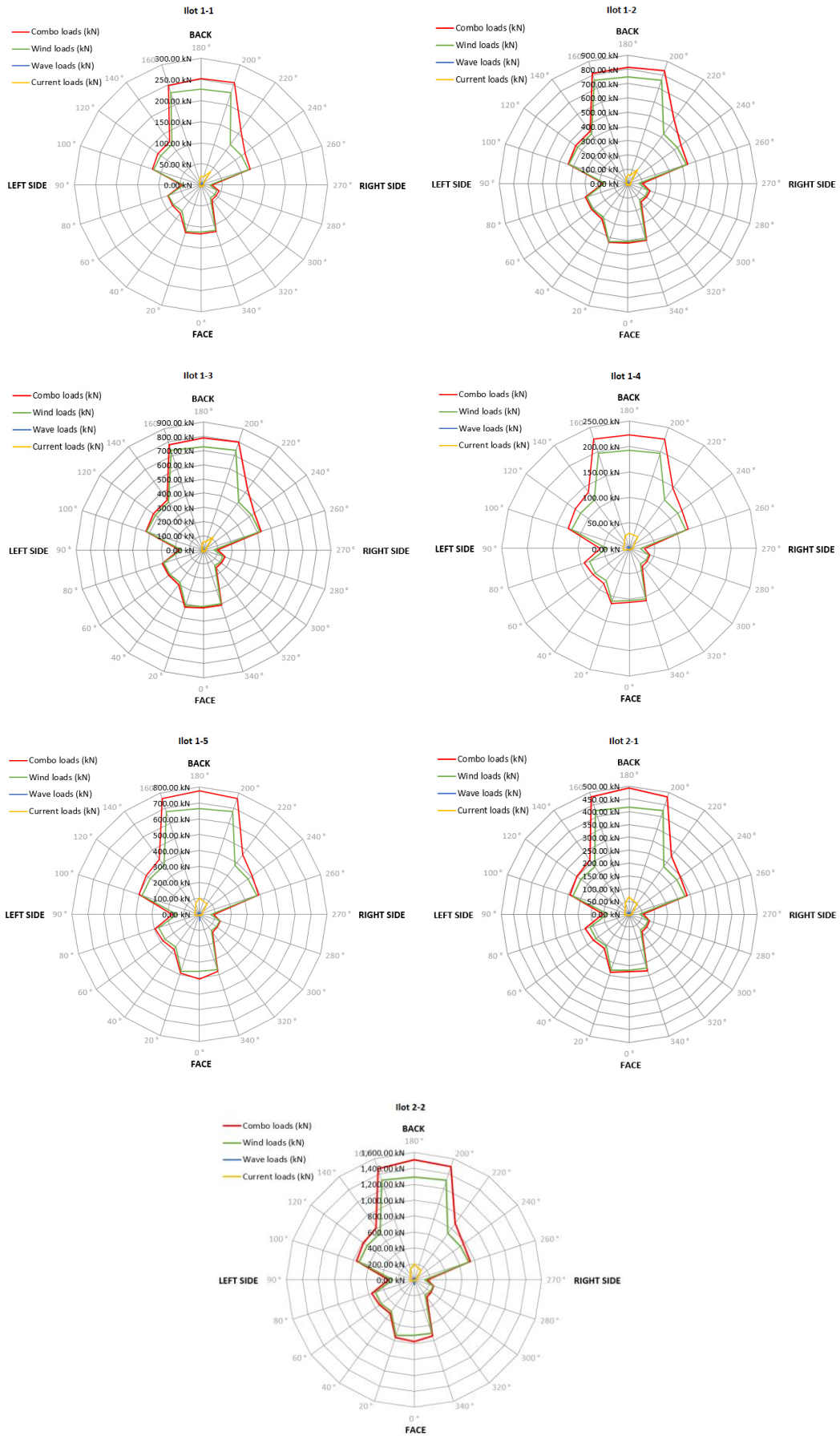


Figure 7 : Diagramme des efforts environnementaux (Résultante horizontale | Fxy |)

3.2. Efforts par côté

Afin d'avoir un aperçu des efforts par côté, Ciel et Terre considère l'effort maximum pour chaque côté de l'îlot, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8 : Considération des efforts par côté

Effective side	Range to consider*	Effective range*	Formula
Face side	315° to 45°	320° to 40°	$F_{Face} = \max_{\substack{0^\circ \leq \theta \leq 40^\circ \\ 320^\circ \leq \theta \leq 360^\circ}} F_x$
Left side	45° to 135°	40° to 140°	$F_{Left} = \max_{40^\circ \leq \theta \leq 140^\circ} F_y$
Back side	135° to 225°	140° to 220°	$F_{Back} = \max_{140^\circ \leq \theta \leq 220^\circ} F_x$
Right side	225° to 315°	220° to 320°	$F_{Right} = \max_{220^\circ \leq \theta \leq 320^\circ} F_y$

*0° vient du côté Face. 180° provient de la direction opposée, suivant le sens des aiguilles d'une montre.

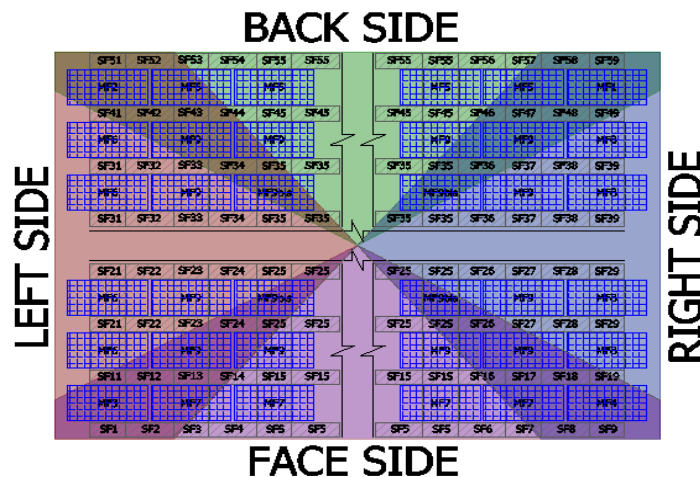
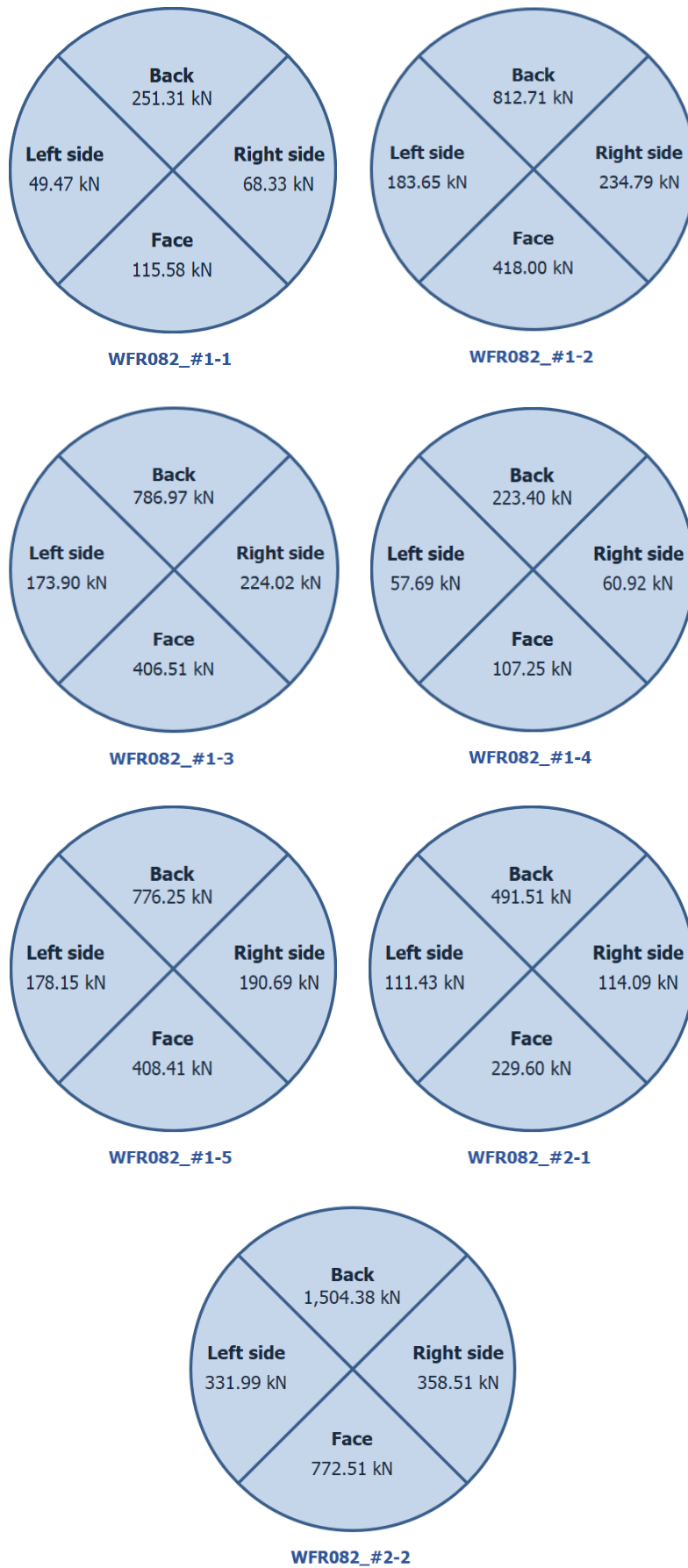


Figure 8 : Diagramme de considération des efforts par côté

Pour ce projet, les efforts suivants sont obtenus :

**Figure 9 : Efforts environnementaux par côté**

4| METHODE D'ANCRAGE

4.1 Design de l'îlot

Le projet est composé de 7 îlots. Le produit choisi est Hydrelío® aiR 1440mm, avec une configuration 4-in-a-row (bloc de 4 lignes de panneaux séparé par une allée de maintenance) et une inclinaison des panneaux de 12°.

Le détail par îlot :

- L'îlot #1-1 est composé de 2 496 panneaux. L'orientation de l'îlot est 135° (0° Nord). La surface de l'îlot est d'environ 9 543 m².
- L'îlot #1-2 est composé de 10 296 panneaux. L'orientation de l'îlot est 135° (0° Nord). La surface de l'îlot est d'environ 38 866 m².
- L'îlot #1-3 est composé de 9 984 panneaux. L'orientation de l'îlot est 135° (0° Nord). La surface de l'îlot est d'environ 37 080 m².
- L'îlot #1-4 est composé de 2 496 panneaux. L'orientation de l'îlot est 142.2° (0° Nord). La surface de l'îlot est d'environ 9 368 m².
- L'îlot #1-5 est composé de 8 736 panneaux. L'orientation de l'îlot est 142.2° (0° Nord). La surface de l'îlot est d'environ 33 495 m².
- L'îlot #2-1 est composé de 4 862 panneaux. L'orientation de l'îlot est 142.2° (0° Nord). La surface de l'îlot est d'environ 19 680 m².
- L'îlot #2-2 est composé de 17 446 panneaux. L'orientation de l'îlot est 142.2° (0° Nord). La surface de l'îlot est d'environ 67 423 m².

Les dimensions des panneaux sont 2094mm * 1038mm.

Un plan montrant la centrale flottante et le design d'ancrage est disponible en annexe 3.

4.2 Description du système d'ancrage

4.2.1. Introduction

L'ancrage est un moyen de maintenir la plateforme flottante à une position définie quels que soient les efforts environnementaux (vent, vagues et courant) auxquels elle est soumise.

Le système d'ancrage est composé de plusieurs lignes d'ancrage attachées à la plateforme flottante (grâce à des barres d'ancrage appelé « spreader bars ») d'un côté et ancrées de l'autre côté, soit au fond du réservoir, soit au niveau des berges.

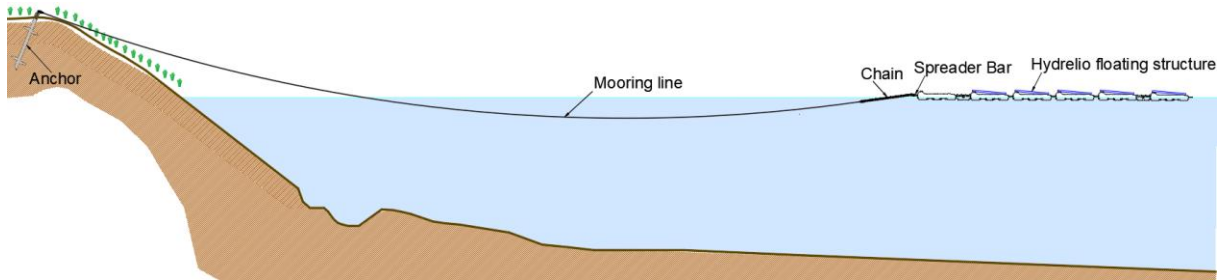


Figure 10 : Exemple d'ancrage en berge

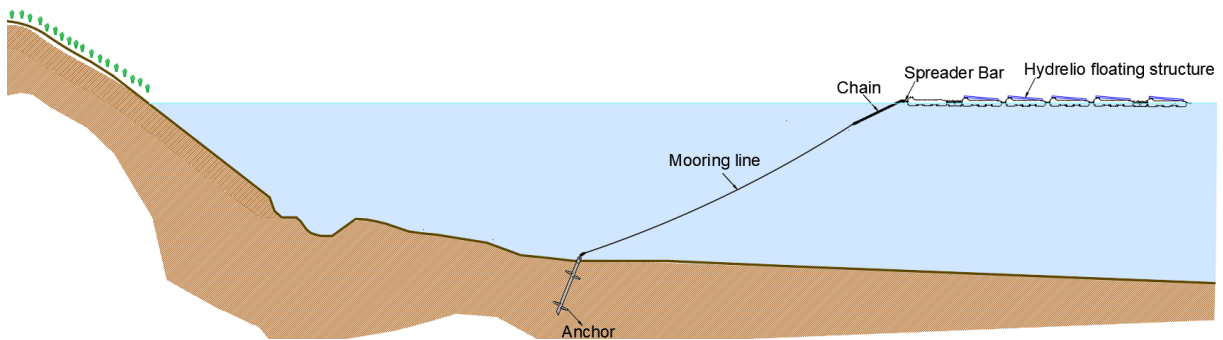


Figure 11 : Exemple d'ancrage au fond

4.2.2. Scénarios de design

Les efforts environnementaux, calculés précédemment, sont utilisés pour le calcul de l'ancrage. Ils représentent les forces externes auxquelles la plateforme flottante pourra être soumise dans les pires conditions.

De plus, les calculs d'ancrage sont réalisés pour différents niveaux d'eau pour assurer l'intégrité de la plateforme flottante, ainsi que son système d'ancrage. Plus précisément, les calculs sont réalisés pour les niveaux d'eau extrêmes – niveau d'eau haut (HWL) et niveau d'eau bas (LWL) – et si nécessaire, pour un niveau d'eau intermédiaire.

Ci-dessous des schémas montrant le comportement du système d'ancrage à niveau haut et niveau bas pour un ancrage en berge et un ancrage au fond.

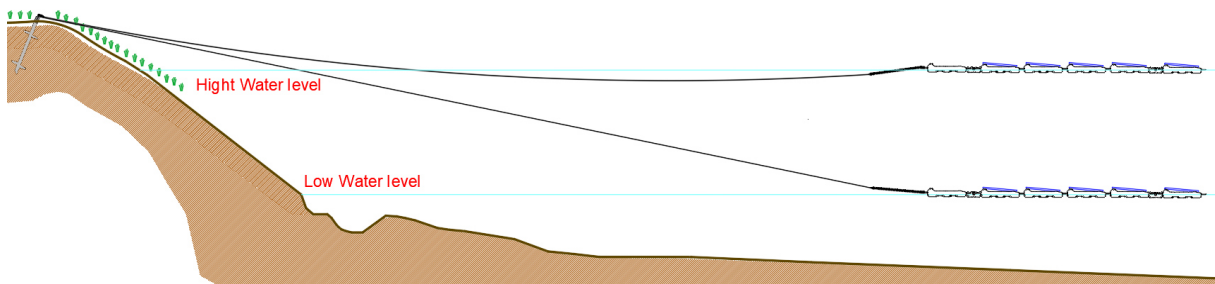


Figure 12 : Exemple d'un ancrage en berge à niveau d'eau haut et bas

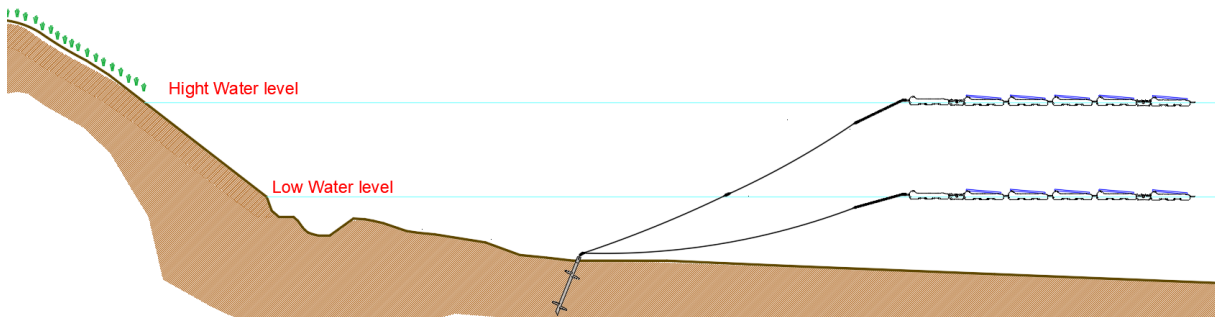


Figure 13 : Exemple d'un ancrage au fond à niveau d'eau haut et bas

4.2.3. Barre d'ancrage

La barre d'ancrage est le lien entre la ligne d'ancrage et la centrale flottante. Elles sont disposées tout autour de l'îlot afin d'assurer son intégrité.

Chaque barre d'ancrage est connectée au flotteur Hydrelío® grâce à deux trous à ses extrémités, et à la ligne d'ancrage grâce au trou central, comme illustré sur la figure suivante.

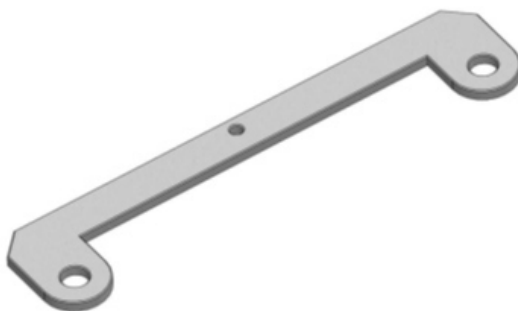


Figure 14 : barre d'ancrage

Les barres d'ancrage sont les premiers maillons de la chaîne de transmission des efforts environnementaux de la structure flottante jusqu'au point d'ancrage.

Ainsi, l'effort maximum admissible par barre d'ancrage est un critère de design primordial. Cette valeur est déterminée à travers des tests mécaniques et en suivant un standard **Bureau Veritas (BV NR 493)**, qui recommande de considérer deux cas : le cas accidentel et le cas intact, tous deux avec des coefficients de sécurité différents.

Le cas intact correspond au cas où la centrale est intacte, les efforts sont répartis uniformément entre les lignes d'ancrage. Le cas accidentel correspond au cas où une ligne d'ancrage vient à rompre.

Comme illustré ci-dessous, des tests ont été réalisés et ont montré, qu'avec des lignes élastiques, les efforts (de la ligne rompue) vont se répartir sur les quatre lignes d'ancrage adjacentes.

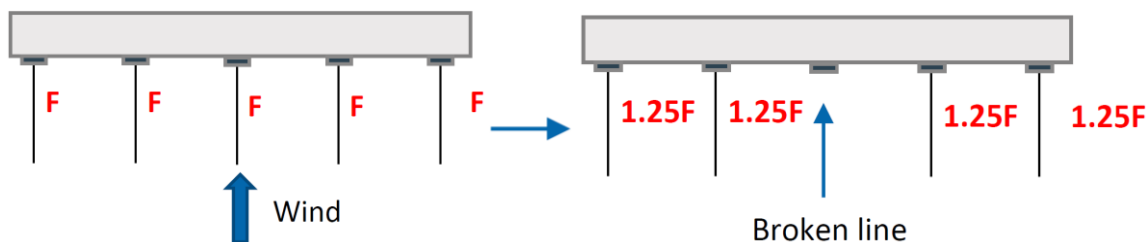


Figure 15 : Cas accidentel avec des lignes élastiques

Le tableau suivant montre les facteurs de sécurité de chacun des cas:

Spreader bar specification	Intact Case	Accidental Case
Minimum Breaking Load	20 kN	20 kN
Safety Factor	1.67	1.25
Accidental Case	X	In case of one line breaking, the loads will be spread on 4 adjacent spreader bars. It means extra safety factor of 1.25
Safe Working Load	$20 / 1.67 = 11.9$ kN	$20 / 1.25 / 1.25 = 12.8$ kN

Tableau 9 : Cas intact et cas accidentel

Les deux scénarios devant être satisfaits, l'effort maximum admissible par barre d'ancrage est de 11.98 kN.

4.2.4. Lignes d'ancrage

Les lignes d'ancrages transmettent les efforts environnementaux, agissant sur la plateforme flottante, jusqu'aux points d'ancrage. Leur composition – matériaux – et longueurs sont ajustées de sorte à assurer une distribution uniforme des efforts dans tout le système d'ancrage.

Les longueurs des lignes d'ancrage sont définies en fonction du niveau d'eau dimensionnant (niveau d'eau qui crée la plus grande différence de niveau avec l'élévation des ancrés). Ainsi, si le niveau d'eau haut est dimensionnant, à niveau bas, il y aura du mou dans la ligne et vice versa. Les longueurs de lignes sont ajustées pour minimiser la différence de mou entre les lignes d'un même côté.

Les lignes d'ancrages sont composées de **plusieurs portions** de différent matériaux (liées les unes aux autres par des manilles). Les propriétés mécaniques de chaque matériau affectent les propriétés mécaniques de la ligne dans son ensemble. Un des critères principaux de la ligne d'ancrage est son élasticité : une longueur minimum de cordage élastique (cordage polyester) doit être implémentée sur chaque ligne d'ancrage. Ciel & Terre définit le critère d'élasticité de la façon suivante : **la ligne doit s'allonger de minimum un mètre à l'effort de design maximum.**

Des **lignes élastiques** et un **bon ajustement des longueurs de lignes** permettent une répartition homogène des efforts dans les lignes et points d'ancrage, empêchant que certaines lignes soient tendues alors que d'autres non.

La dernière portion de la ligne d'ancrage est de la chaîne, afin de simplifier l'ajustement de la longueur de la ligne après positionnement des ancrés.

La composition des lignes d'ancrage pour ce projet est détaillée dans la section « Résultats ».

5| CALCUL D'ANCRAGE

Les calculs d'ancrage sont réalisés à travers un outil développé par C&T. Cet outil permet, en premier, de réaliser un dimensionnement statique et ensuite, un dimensionnement quasi-statique. Ce deuxième dimensionnement permet de prendre en compte plus de paramètres physiques comme l'élasticité de la ligne et son poids propre.

5.1 Calcul statique

Le Tableau 10 présente les formules pour un dimensionnement statique des lignes d'ancrages.

Les figures ci-dessous montrent les différents paramètres des équations. En partant de l'effort environnemental maximum V , l'effort dans chaque point d'ancrage dépend de :

- La distance horizontale D entre le point d'ancrage et le point de connexion à l'îlot,
- L'angle α entre le point d'ancrage et le niveau d'eau dimensionnant,
- La différence d'élévation H entre le point d'ancrage et le niveau d'eau dimensionnant,
- Si l'ancrage est mutualisé : de l'angle β entre les deux lignes d'ancrages connectées au même point d'ancrage.

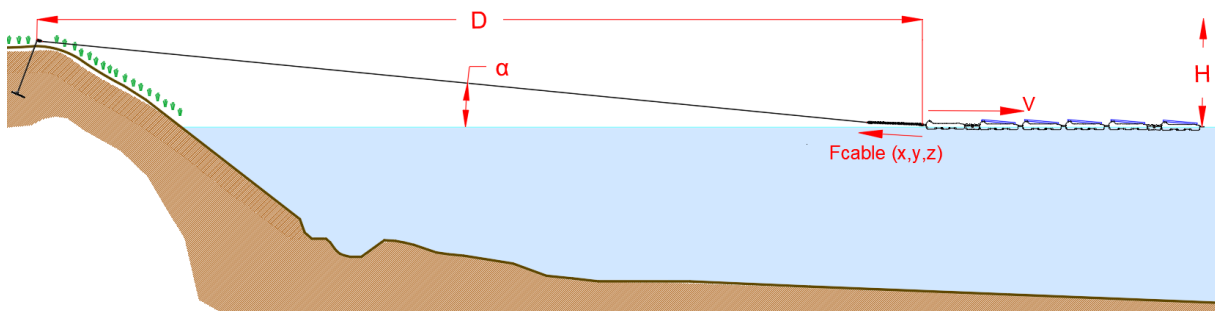


Figure 16 : Schéma d'un ancrage en berge

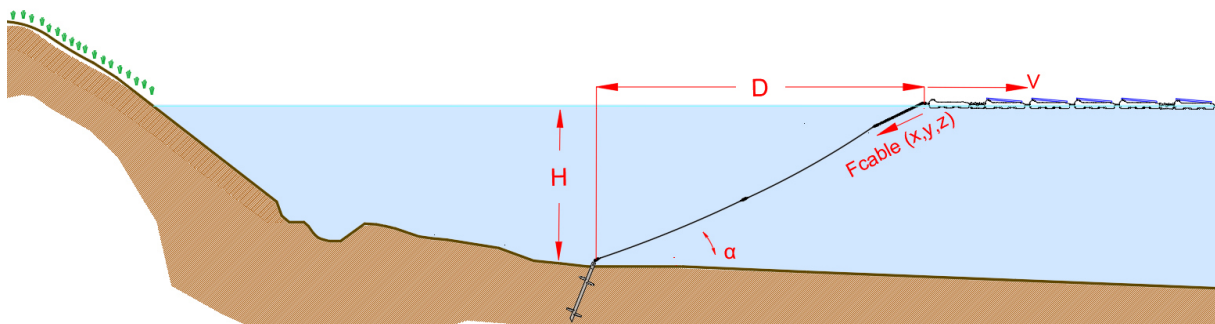
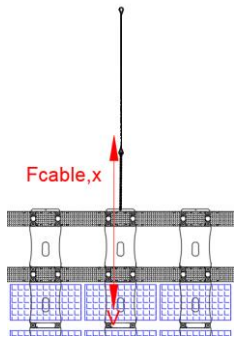
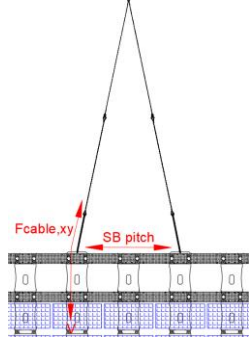


Figure 17 : Schéma d'un ancrage au fond

Tableau 10 : Formules utilisées dans le calcul d'ancrage statique

Item	Ancrage simple	Ancrage mutualisé
Description	1 ligne d'ancrage connectées à 1 point d'ancrage	2 lignes d'ancrage connectées à 1 point d'ancrage
Schéma		
Effort maximum admissible par ligne	11.98 kN	
α	$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{H}{D}\right)$	
β	-	$\beta = 2 \times \sin^{-1}\left(\frac{\text{Spreader bar pitch}}{2 \times D}\right)$
Effort par ligne d'ancrage		
$F_{cable,x}$	$F_{cable,x} = V$	
$F_{cable,y}$	$F_{cable,y} = 0$	$F_{cable,y} = V \times \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)$
$F_{cable,xy}$	$F_{cable,xy} = V$	$F_{cable,xy} = \frac{V}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}$
$F_{cable,z}$	$F_{cable,z} = F_{cable,xy} \times \tan(\alpha)$	
$F_{cable,xyz}$	$F_{cable,xyz} = \frac{F_{cable,xy}}{\cos(\alpha)}$	

5.2 Calcul quasi-statique

5.2.1. Introduction

Cet outil permet de modéliser un système de lignes d'amarrage caténaires hétérogènes dans une approche quasi-statique. La caténaire est la courbe qu'un câble suspendu, en fonction de ses propriétés mécaniques, prend lorsqu'il est soutenu uniquement à ses extrémités, comme illustré ci-dessous.

Par conséquent, ce modèle prend en compte le propre poids des lignes d'ancrages, ainsi que leur capacité d'élongation.

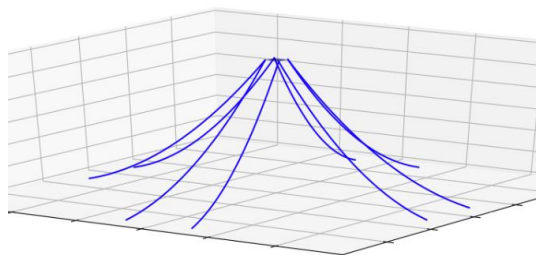


Figure 18 : Lignes d'amarrage caténaires

Ensuite, selon les caractéristiques des matériaux des lignes d'ancrage, la capacité d'élongation globale des lignes est variable, générant ainsi plus ou moins de charges aux deux extrémités lorsqu'elles sont plus ou moins étirées.

Le but est de calculer la tension générée aux deux extrémités de la ligne d'ancrage, en tenant compte des spécifications de ces composants. Et ce, pour différents emplacements de la centrale flottante (plus ou moins loin du point d'ancrage, ce qui signifie des lignes d'amarrage lâches ou étirées), comme si la plate-forme était en mouvement.

Ainsi, une fois les efforts globaux générés sur la centrale (efforts environnementaux) équilibrés par les tensions générées dans les lignes d'ancrage, la centrale devient immobile, le mouvement maximum est atteint. Cette simulation est effectuée pour chaque direction de vent.

NB : Lors d'une étude d'ancrage préliminaire, seul un design statique est réalisé (une étude quasi-statique sera réalisée lors de l'étude détaillée).

5.3 Management des efforts verticaux

5.3.1. Introduction

Le vent génère des efforts sur la plateforme flottante décomposés en efforts horizontaux et verticaux. Les efforts verticaux, appelés **portance**, dépendent de la forme de l'objet placé dans le flux de vent et de la vitesse de ce flux. Au vu de la forme des flotteurs Hydrelio® et de l'inclinaison des panneaux, le flux de vent génère une dépression sur le dessus des panneaux, et une surpression sous les panneaux, créant ainsi un effort vertical vers le haut qui tend à soulever les panneaux et donc les flotteurs.

Afin de maintenir l'équilibre, cet effort vertical doit être contré. L'équilibre doit être fait entre le poids des flotteurs et l'effort vertical généré par les lignes d'ancrage. Dans certains cas, le poids des flotteurs et l'effort vertical de la ligne n'est pas suffisant pour assurer l'équilibre. Une vérification similaire est nécessaire pour les efforts verticaux négatifs, afin de vérifier que la flottabilité de l'extra-ring est suffisante.

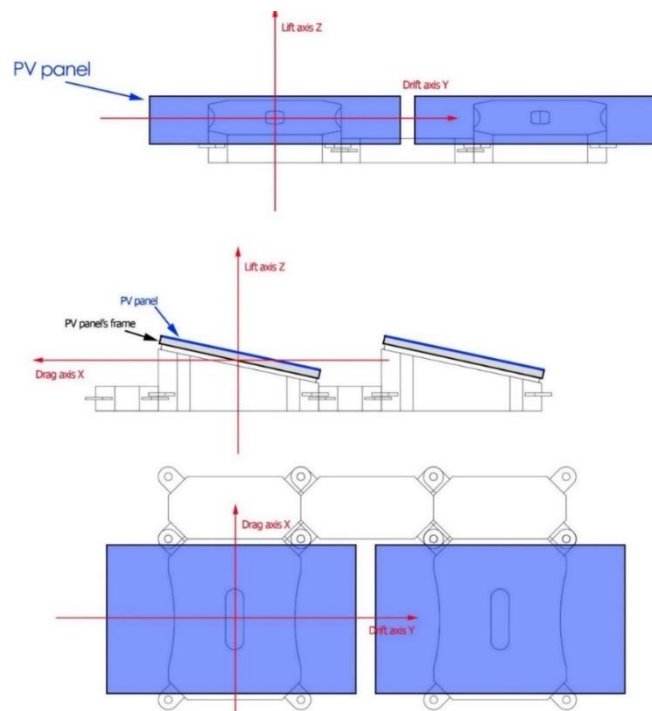


Figure 19 : Repère de référence (x, y, z)

La portance est définie comme positive vers le haut et négative vers le bas, on a donc :

- La portance vers le haut (« uplift ») est positive (+)
- La portance vers le bas (« downlift ») est négative (-)
- Le poids des flotteurs / panneaux est négatif (-)
- La flottabilité des flotteurs est positive (+)
- Les efforts verticaux des lignes d'ancrage peuvent être positifs (+) ou négatifs (-) selon la direction des lignes d'ancrage

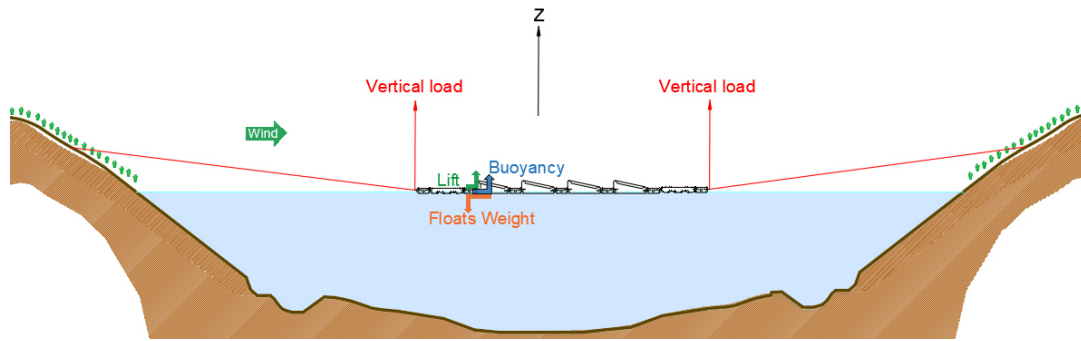


Figure 20 : Schéma des efforts verticaux appliqués dans le cas d'un ancrage en berge

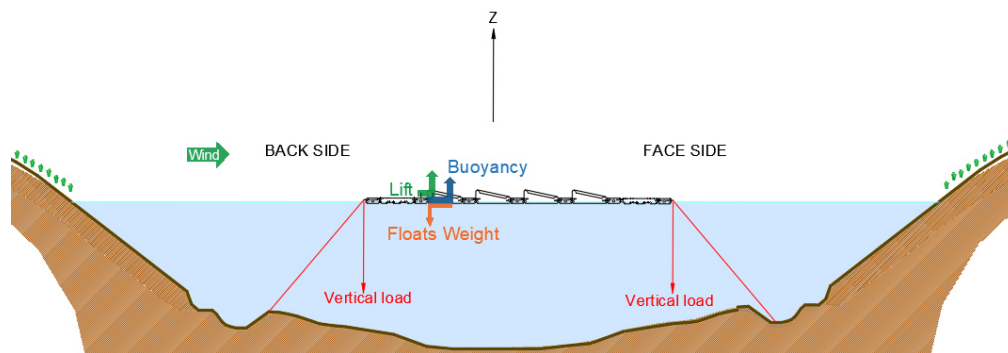


Figure 21 : Schéma des efforts verticaux appliqués dans le cas d'un ancrage au fond

NB : Le calcul détaillé des efforts verticaux n'est pas réalisé en étude d'ancrage préliminaire (il est réalisé lors de l'étude détaillée). Cependant, quelques recommandations peuvent être données dans la section Résultats.

6| RESULTATS

Comme indiqué dans la section introduction, les résultats de calcul présentés dans cette section sont liés à l'étape « Préliminaire » de l'ancrage. Un calcul plus détaillé sera effectué pendant la phase d'étude d'ancrage détaillée, puis après la phase de positionnement des ancrages.

6.1 Hypothèses

Les hypothèses de conception du design d'ancrage sont les suivantes :

Tableau 11 : Hypothèses d'ancrage

Hypothèses d'ancrage			BACK	LEFT	RIGHT	FACE
Ancrage au fond ou en berge	1-1		Fond	Berge	Berge	Fond
	1-2		Fond	Berge	Berge	Berge
	1-3		Berge	Berge	Berge	Berge
	1-4		Fond	Berge	Berge	Fond
	1-5		Fond	Berge	Berge	Fond
	2-1		Fond	Berge	Fond	Fond
	2-2		Fond	Fond	Fond	Fond
Ancrage simple ou mutualisé			Ancrage simple			
Composition d'une ligne d'ancrage typique en eau douce	1	Cable acier galvanisé	variable	variable	variable	variable
	2	Cordage polyester	15 m	15 m	15 m	15 m
	3	Chaîne acier galvanisé	1,5 m	1,5 m	1,5 m	1,5 m

6.2 Résultats principaux

Le tableau ci-dessous résume les résultats des calculs :

Tableau 12 : Résultats des calculs d'ancrage

Ilot 1-1	BACK	LEFT	RIGHT	FACE	Total
Efforts environnementaux	251.31 kN	49.47 kN	68.33 kN	115.58 kN	
Nombre de barre d'ancrage	30	8	10	17	65
Nombre d'ancre	30	8	10	17	65
Distance D	40 m	20 m	20 m	25 m	
Effort max dans la ligne	9.9 kN	7.0 kN	7.8 kN	8.8 kN	

Ilot 1-2	BACK	LEFT	RIGHT	FACE	Total
Efforts environnementaux	812.71 kN	183.65 kN	234.79 kN	418.00 kN	
Nombre de barre d'ancrage	82	27	34	42	185
Nombre d'ancre	82	27	34	42	185
Distance D	35 m	20 m	20 m	20 m	
Effort max dans la ligne	11.9 kN	7.7 kN	7.8 kN	11.3 kN	

Ilot 1-3	BACK	LEFT	RIGHT	FACE	Total
Efforts environnementaux	786.97 kN	173.90 kN	224.02 kN	406.51 kN	
Nombre de barre d'ancrage	79	26	34	42	181
Nombre d'ancre	79	26	34	42	181
Distance D	20 m	20 m	20 m	20 m	
Effort max dans la ligne	11.3 kN	7.6 kN	7.5 kN	11.0 kN	

Ilot 1-4	BACK	LEFT	RIGHT	FACE	Total
Efforts environnementaux	223.40 kN	57.69 kN	60.92 kN	107.25 kN	
Nombre de barre d'ancrage	26	13	13	15	67
Nombre d'ancre	26	13	13	15	67
Distance D	35 m	20 m	20 m	25 m	
Effort max dans la ligne	10.5 kN	5.0 kN	5.3 kN	9.3 kN	

Ilot 1-5	BACK	LEFT	RIGHT	FACE	Total
Efforts environnementaux	776.25 kN	178.15 kN	190.69 kN	408.41 kN	
Nombre de barre d'ancrage	80	27	29	60	196
Nombre d'ancre	80	27	29	60	196
Distance D	33 m	20 m	20 m	30 m	
Effort max dans la ligne	11.8 kN	7.5 kN	7.5 kN	8.4 kN	

Ilot 2-1	BACK	LEFT	RIGHT	FACE	Total
Efforts environnementaux	491.51 kN	111.43 kN	114.09 kN	229.60 kN	
Nombre de barre d'ancrage	71	17	18	28	134
Nombre d'ancre	71	17	18	28	134
Distance D	30 m	35 m	35 m	25 m	
Effort max dans la ligne	8.6 kN	7.3 kN	7.6 kN	10.6 kN	

Ilot 2-2	BACK	LEFT	RIGHT	FACE	Total
Efforts environnementaux	1,504.38 kN	331.99 kN	358.51 kN	772.51 kN	
Nombre de barre d'ancrage	153	32	34	78	297
Nombre d'ancre	153	32	34	78	297
Distance D	35 m	30 m	30 m	35 m	
Effort max dans la ligne	11.8 kN	11.6 kN	11.8 kN	11.9 kN	

NB : Ces résultats sont issus d'un calcul préliminaire, ceux-ci peuvent évoluer lors de l'étude d'ancrage détaillée.

Ci-dessous un schéma du système d'ancrage usuel pour CHEVENON.

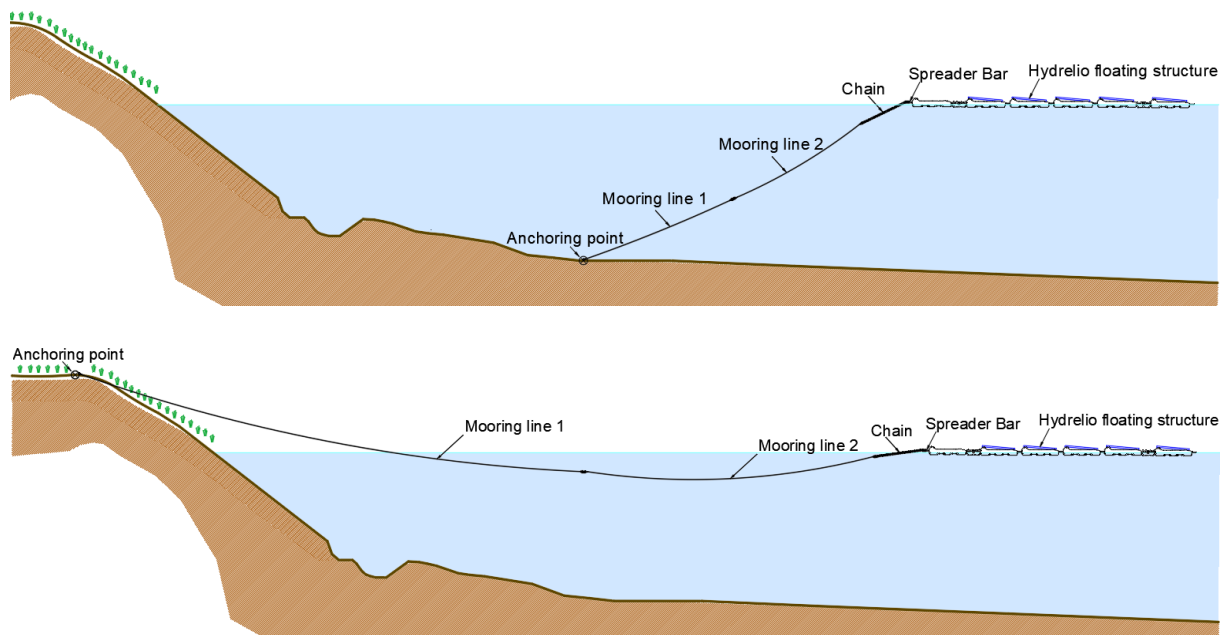


Figure 22 : Schéma du système d'ancrage usuel pour CHEVENON

6.3 Nomenclature

Ci-dessous les quantités approximatives nécessaires de chaque composant du système d'ancrage :

Tableau 13: Nomenclature du système d'ancrage

Composant	Ilot 1-1	Ilot 1-2	Ilot 1-3	Ilot 1-4	Ilot 1-5	Ilot 2-1	Ilot 2-2	Total
Point d'ancrage	65 pcs	185 pcs	181 pcs	67 pcs	196 pcs	134 pcs	297 pcs	1 125 pcs
Barre d'ancrage	65 pcs	185 pcs	181 pcs	67 pcs	196 pcs	134 pcs	297 pcs	1 125 pcs
Câble acier (SWL > 11.98 kN)	1 075 m	2 270 m	896 m	843 m	2 775 m	2 175 m	6 008 m	16 042 m
Cordage polyester (SWL > 11.98 kN) Elongation $\Delta L \geq 1m$ à l'effort de design dans la ligne	975 m	2 775 m	2 715 m	1 005 m	2 940 m	2 010 m	4 455 m	16 875 m
Chaîne (SWL > 11.98 kN)	97.5 m	277.5 m	271.5 m	100.5 m	294 m	201 m	445.5 m	1 687.5 m
Manille (SWL > 11.98 kN)	260 pcs	740 pcs	724 pcs	268 pcs	784 pcs	536 pcs	1 188 pcs	4 500 pcs

NB : Des bouées pourront être ajoutées afin d'éviter que les lignes ne touchent pas le fond à niveau d'eau bas.

6.4 Mouvements de l'îlot

Les longueurs des lignes d'ancrage sont calculées avec suffisamment de mou pour gérer la variation du niveau d'eau. Selon le niveau d'eau, la centrale flottante se déplacera plus ou moins de sa position d'équilibre. Le système d'ancrage est conçu pour que la centrale photovoltaïque flottante n'entre pas en collision avec les berges ou tout obstacle identifié dans la zone d'eau.

Dans le tableau ci-dessous sont affichés les déplacements d'îlot maximums dans chaque direction. Ces valeurs sont approximatives, elles dépendent du cordage polyester qui sera choisi.

Les déplacements sont donnés dans le référentiel de la centrale.

Tableau 14 : Mouvements maximums de l'îlot

Direction du mouvement	Ilot
Mouvement vers l'avant	3.8 m
Mouvement vers la gauche	3.8 m
Mouvement vers l'arrière	3.8 m
Mouvement vers la droite	3.8 m

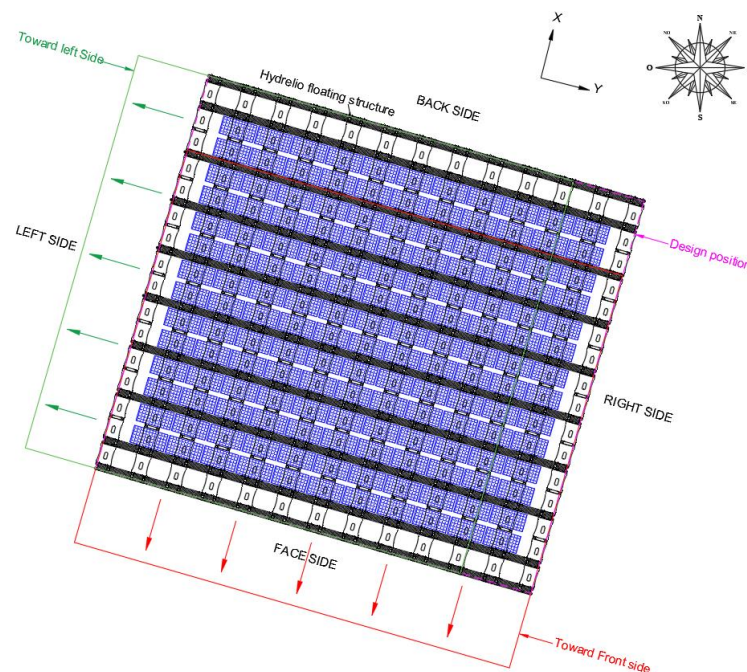



Figure 23 : Schéma des mouvements de l'îlot

Annexe 1 : Note de calcul de la pression dynamique

	Note de calcul Pression dynamique		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
CONFIDENTIEL	Client: ELEMENTS	Date: 02/11/2021		
	Code projet: WFR082_ CHEVENON	Revision: Rev2		

NOTE DE CALCUL PRESSION DYNAMIQUE DU VENT

RESUME

Le présent document présente le calcul de la pression dynamique agissant sur la centrale flottante.

NORME APPLICABLE

En France, la norme de construction applicable est: **EUROCODE EN 1991-1-4 en combinaison avec l'annexe nationale NF EN 1991-1-4 :2005**. Tous deux fournissent des indications sur la vitesse et la pression du vent à prendre en compte pour la conception de toute construction en France. L'Eurocode permet de calculer la pression dynamique de design à partir du vent de référence, à travers le process suivant:



APPLICATION AU SOLAIRE FLOTTANT


La méthode de design de Ciel & Terre est basée sur les conditions de vent extrême, c'est-à-dire sur le vent de pointe selon la définition de l'Eurocode.

Pour répondre aux besoins de Ciel et Terre, la pression du vent utilisée pour le calcul des charges de vent sur la centrale solaire flottante doit répondre aux exigences suivantes :

- Vent rafale (moyenné sur 3s) ou vent de pointe d'après la définition de l'Eurocode (Vitesse moyenne + fluctuation court terme), exprimé en pression
- A la hauteur des panneaux (0.5m)
- Période de retour de 50 ans, c'est à dire une probabilité d'excédance annuelle de 2%.

CONTENU

1. Vent de référence
2. Vent base
 - 2.1. Coefficient de directionnalité
 - 2.2. Coefficient de saison
 - 2.3. Probabilité d'excédance
 - 2.4. Conclusion sur le vent base
3. Vent moyen
 - 3.1. Coefficient de rugosité
 - 3.2. Coefficient d'orographie
 - 3.3. Conclusion sur la vitesse moyenne
4. Pression dynamique de pointe
 - 4.1. Intensité de la turbulence
 - 4.2. Densité de l'air
 - 4.3. Conclusion sur la pression dynamique de pointe

	Note de calcul Pression dynamique		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
CONFIDENTIEL	Client: ELEMENTS	Date: 02/11/2021		
	Code projet: WFR082_ CHEVENON	Revision: Rev2		

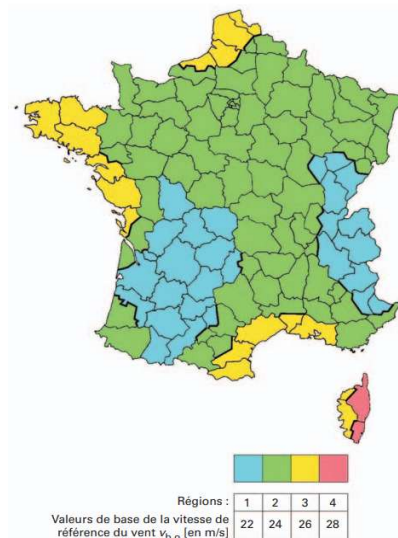
1. VENT DE REFERENCE

La valeur de la vitesse de vent de référence $v_{b,0}$ est la vitesse moyenne caractéristique du vent sur 10 minutes, indépendamment de la direction du vent et de la période de l'année, à 10 m au-dessus du niveau du sol, en terrain dégagé avec une végétation basse comme de la prairie et des obstacles avec des séparations d'au moins 20 fois la hauteur des obstacles.

La valeur de la vitesse de référence du vent $v_{b,0}$ est donnée dans l'annexe nationale, elle dépend de la localisation du projet.

La localisation du projet est la suivante:

Departement	58_NIEVRE
Municipalité	CHEVENON



La vitesse de référence est donc:

$$v_{b,0} = 24.00 \text{ m/s}$$

2. VENT BASE

(2)P The basic wind velocity shall be calculated from Expression (4.1).

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (4.1)$$


where:

v_b is the basic wind velocity, defined as a function of wind direction and time of year at 10 m above ground of terrain category II

$v_{b,0}$ is the fundamental value of the basic wind velocity, see (1)P

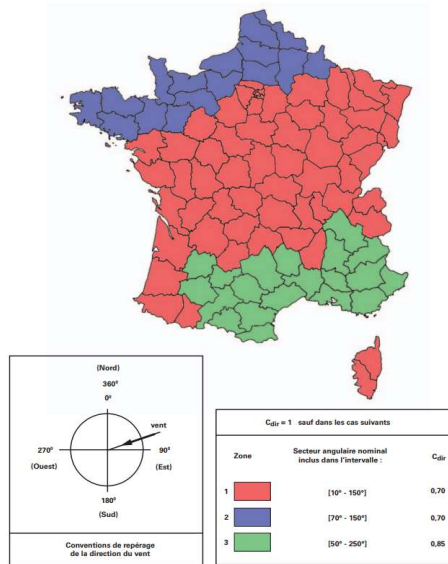
c_{dir} is the directional factor, see Note 2.

c_{season} is the season factor, see Note 3.

	Note de calcul Pression dynamique		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
CONFIDENTIEL	Cliant: ELEMENTS	Date: 02/11/2021		
	Code projet: WFR082_CHEVENON	Revision: Rev2		

2.1. COEFFICIENT DE DIRECTIONALITE

Le coefficient de directionnalité est donné dans l'annexe nationale. En fonction de la localisation du projet et la direction du vent, le coefficient de directionnalité varie:



NOTE:

- Les directions de vent mentionné dans l'annexe nationale diffèrent de celles utilisées par Ciel et Terre pour le design de la centrale flottante:
- Dans l'annexe nationale, 0° = Nord. Il s'agit d'un repère absolu.
 - Dans notre repère, 0° a été fixé par les modèles CFD et les essais en soufflerie comme l'avant des panneaux. Il s'agit donc d'un repère relatif.

L'orientation de l'îlot est:

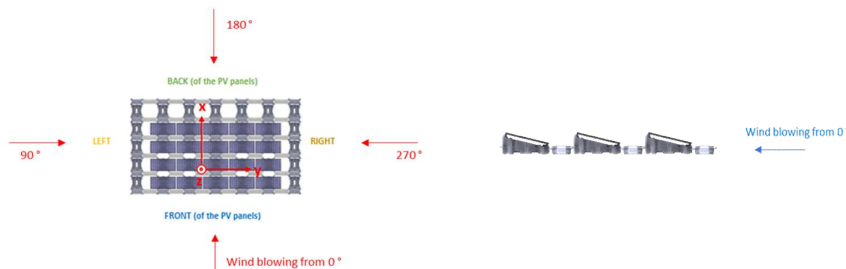
	Repère selon l'annexe nationale (0° = North)	Repère C&T (0° = avant des panneaux)
Orientation de l'îlot	135°	0°

*L'orientation des îlots est comme suit:


- îlots 1-1, 1-2 et 1-3: 135°
- îlots 1-4, 1-5, 2-1 et 2-2: 142,2°

Cependant, cette différence d'orientation n'a pas d'impact sur le résultat final. La présente note de calcul est pour une orientation de 135°.

A partir de maintenant, les directions de vents mentionnées dans la note font référence au repère utilisé par C&T (0° = avant des panneaux) - sauf mention contraire.



Les principales directions utilisées dans les modèles CFD et les tunnels de vent sont: 0° - 20° - 40° - 60° - 80° - 90° - 100° - 120° - 140° - 160° - 180° - 200° - 220° - 240° - 260° - 270° - 280° - 300° - 320° - 340°.

	Note de calcul Pression dynamique		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
CONFIDENTIEL	Client: ELEMENTS	Date: 02/11/2021		
	Code projet: WFR082_ CHEVENON	Revision: Rev2		

Ainsi, on obtient:

Direction de vent (0°= avant des panneaux)	Direction de vent (0°=Nord)	C _{dir}	Direction de vent (0°= avant des panneaux)	Direction de vent (0°=Nord)	C _{dir}
0°	135°	1.00	180°	315°	1.00
20°	155°	1.00	200°	335°	1.00
40°	175°	1.00	220°	355°	1.00
60°	195°	1.00	240°	15°	1.00
80°	215°	1.00	260°	35°	0.70
90°	225°	1.00	270°	45°	0.70
100°	235°	1.00	280°	55°	0.70
120°	255°	1.00	300°	75°	0.70
140°	275°	1.00	320°	95°	0.70
160°	295°	1.00	340°	115°	0.70

2.2. COEFFICIENT DE SAISONNALITE

Le coefficient de saisonnalité est donné dans l'annexe nationale. Le coefficient de saisonnalité est utilisé dans le cas de construction temporaire (durée de vie inférieure à 1 an). Il n'est donc pas applicable à une centrale flottante, dont la durée de vie est supérieure à 1 an.

$$C_{saison} = 1.00$$

2.3. PROBABILITE D'EXCEDANCE

NOTE 4 The 10 minutes mean wind velocity having the probability p for an annual exceedence is determined by multiplying the basic wind velocity v_b in 4.2 (2)P by the probability factor, C_{prob} given by Expression (4.2). See also EN 1991-1-6.

$$C_{prob} = \left(\frac{1 - K \cdot \ln(-\ln(1 - p))}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n \quad (4.2)$$


where:

K is the shape parameter depending on the coefficient of variation of the extreme-value distribution.

n is the exponent.

NOTE 5 The values for K and n may be given in the National Annex. The recommended values are 0,2 for K and 0,5 for n .

Les valeurs à utiliser sont les suivantes : $K = 0,15$ et $n = 0,5$, pour des probabilités p de dépassement supérieures à 0,02.

	Note de calcul Pression dynamique		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
CONFIDENTIEL	Client: ELEMENTS	Date: 02/11/2021		
	Code projet: WFR082_CHEVENON	Revision: Rev2		

La période retour considérée par Ciel et Terre pour le design des centrales flottantes est:

Période de retour minimum	50 ans
----------------------------------	--------

En accord avec le client, la période de retour retenue pour ce projet est:

Période de retour retenue	50 ans
----------------------------------	--------

Cela correspond à une probabilité annuelle d'excédance p de:

Probabilité annuelle d'excédance (p)	0.02
---	------

Selon l'annexe nationale, les valeurs recommandées pour K et n à utiliser sont les suivantes:

K	0.2
n	0.5

On obtient donc:

$$C_{prob} = 1.00$$

NOTE:

La période de retour est liée la probabilité d'excédance durant la durée de vie de la centrale.

La probabilité d'excédance durant la durée de vie de la centrale est indiquée par des formules statistiques, exprimées comme suit :

$$T \approx -\frac{N}{\ln(1-E)}$$

Où:

T est la période de retour

N est la durée de vie de la structure

E est la probabilité d'excédance durant la durée de vie de la structure

Ainsi, selon la ratio entre la période de retour et la durée de vie de la structure, on a:

T/N	1	2	5	10	20	50	100
E	0.63	0.39	0.18	0.10	0.05	0.02	0.01

La période de retour retenue est :


Periode de retour	50 ans
--------------------------	--------

La durée de vie considérée est :

Durée de vie	25 ans
---------------------	--------

Ainsi, la probabilité d'excédance durant la durée de vie de la centrale est :

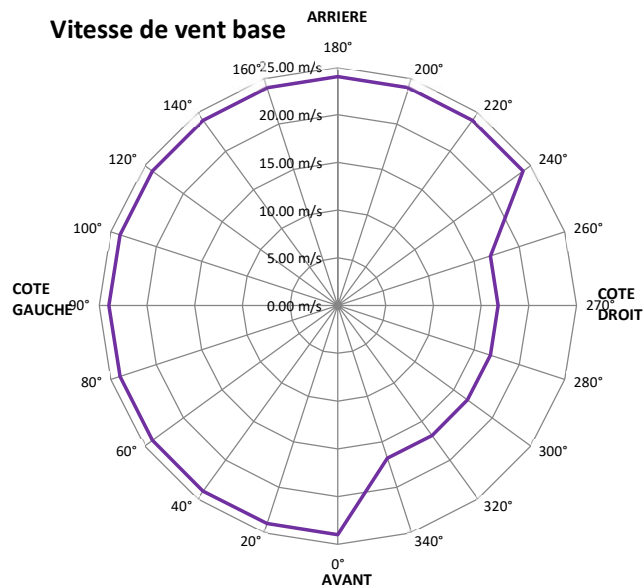
$$E = 0.393$$


	Note de calcul Pression dynamique		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
CONFIDENTIEL	Client: ELEMENTS	Date: 02/11/2021		
	Code projet: WFR082_ CHEVENON	Revision: Rev2		

2.4. CONCLUSION SUR LE VENT BASE

On a :

Direction de vent	V _{b,0}	C _{dir}	C _{saison}	C _{prob}	V _b
0°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
20°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
40°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
60°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
80°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
90°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
100°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
120°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
140°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
160°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
180°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
200°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
220°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
240°	24.00 m/s	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s
260°	24.00 m/s	0.70	1.00	1.00	16.80 m/s
270°	24.00 m/s	0.70	1.00	1.00	16.80 m/s
280°	24.00 m/s	0.70	1.00	1.00	16.80 m/s
300°	24.00 m/s	0.70	1.00	1.00	16.80 m/s
320°	24.00 m/s	0.70	1.00	1.00	16.80 m/s
340°	24.00 m/s	0.70	1.00	1.00	16.80 m/s



	Note de calcul Pression dynamique		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
CONFIDENTIEL	Client: ELEMENTS	Date: 02/11/2021		
	Code projet: WFR082_ CHEVENON	Revision: Rev2		

3. VENT MOYEN

Le vent moyen se calcule de la manière suivante:

(1) The mean wind velocity $v_m(z)$ at a height z above the terrain depends on the terrain roughness and orography and on the basic wind velocity, v_b , and should be determined using Expression (4.3)

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (4.3)$$

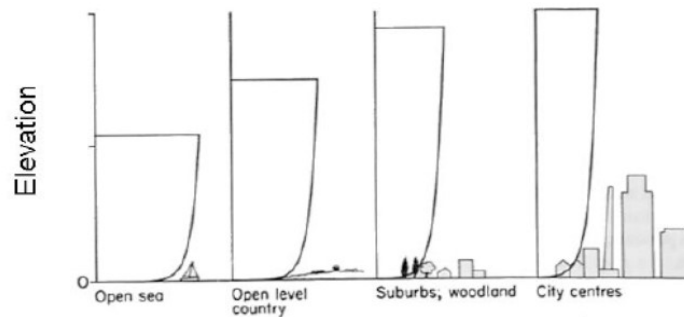
where:

$c_r(z)$ is the roughness factor, given in 4.3.2

$c_o(z)$ is the orography factor, taken as 1,0 unless otherwise specified in 4.3.3

3.1. COEFFICIENT DE RUGOSITE

Le facteur de rugosité tient compte de la variabilité de la vitesse moyenne du vent sur le site de la structure, due à la hauteur au-dessus du niveau du sol, et de la rugosité du terrain en amont de la structure dans la direction du vent considérée. C'est ce que nous appelons le « profil de vent ».



La procédure pour déterminer la catégorie de terrain est la suivante:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{for} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad \text{where:}$$

z_0 is the roughness length

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{for} \quad z \leq z_{\min} \quad k_r \quad \text{terrain factor depending on the roughness length } z_0 \text{ calculated using}$$

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$$

Pour les efforts de vent, la hauteur considéré z est la hauteur des panneaux (=0.5m).

z_0 et z_{\min} dépendent de la catégorie de terrain.


Selon l'annexe nationale, 5 catégories de terrain sont applicable en France :

Catégorie de terrain			
Code	Description	z_0 (m)	z_{\min} (m)
0	Mer ou zone côtière exposée. Lacs ou plans d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins 5 km	0.005	1
II	Rase campagne, obstacles isolés séparés par au moins 40 fois la hauteur	0.05	2
IIIa	Campagne avec des haies, vignoble, bocage, habitat dispersé	0.20	5
IIIb	Zones urbanisées ou industrielles, bocage dense, vergers	0.50	9
IV	Zone urbaine dont au moins 15 % de la superficie est recouverte par des bâtiments d'au moins 15 m de hauteur	1.00	15

NOTE:

La rugosité de terrain à utiliser pour une direction de vent donnée dépend de la rugosité du sol et de la distance avec une rugosité de terrain uniforme dans un secteur angulaire autour de la direction du vent.

Selon l'annexe nationale, le secteur angulaire à considérer est de $\pm 15^\circ$ autour de la direction du vent.

	Note de calcul Pression dynamique		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
CONFIDENTIEL	Cliant: ELEMENTS	Date: 02/11/2021		
	Code projet: WFR082_CHEVENON	Revision: Rev2		

Nous avons supposé des catégories de terrain pour chaque direction de vent conformément au tableau suivant, qui donne les facteurs de rugosité suivants :

Direction de vent	Catégorie de terrain	z_0	z_{min}	$C_r(0.5)$	Direction de vent	Catégorie de terrain	z_0	z_{min}	$C_r(0.5)$
0°	II	0.05	2	0.701	180°	II	0.05	2	0.701
20°	II	0.05	2	0.701	200°	II	0.05	2	0.701
40°	II	0.05	2	0.701	220°	II	0.05	2	0.701
60°	II	0.05	2	0.701	240°	II	0.05	2	0.701
80°	II	0.05	2	0.701	260°	II	0.05	2	0.701
90°	II	0.05	2	0.701	270°	II	0.05	2	0.701
100°	II	0.05	2	0.701	280°	II	0.05	2	0.701
120°	II	0.05	2	0.701	300°	II	0.05	2	0.701
140°	II	0.05	2	0.701	320°	II	0.05	2	0.701
160°	II	0.05	2	0.701	340°	II	0.05	2	0.701

3.2. COEFFICIENT D'OROGRAPHIE

Lorsque l'orographie (par exemple les collines, les falaises, etc.) augmente la vitesse du vent de plus de 5 %, les effets doivent être pris en compte en utilisant le facteur d'orographie.

Les effets de l'orographie peuvent être négligés lorsque la pente moyenne du terrain en amont vent est inférieure à 3°. Le terrain en amont peut être considéré jusqu'à une distance de 10 fois la hauteur de l'élément orographique isolé.

Figure 4.18(NA) Falaises et escarpements : définitions

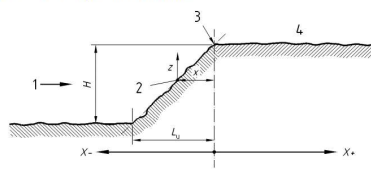
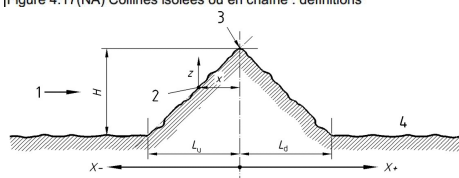


Figure 4.17(NA) Collines isolées ou en chaîne : définitions



c) Le coefficient d'orographie $c_o(z) = v_m(z) / v_{mf}(z)$ rend compte de l'augmentation de la vitesse moyenne du vent passant au-dessus des collines et des escarpements (mais non dans des régions ondulées et montagneuses). Au voisinage du sommet, à une distance du sommet $|X| < k_{red}L$, il est défini comme suit :

$$c_o = 1 \quad \text{pour } \phi < 0,05$$

$$c_o = 1 + S_{max} \left(1 - \frac{|X|}{k_{red}L} \right) e^{-\alpha z/L} \quad \text{pour } \phi \geq 0,05 \quad (4.15-NA)$$

où :

- S_{max} est un coefficient donné dans le tableau 4.7(NA) en fonction de la forme de l'obstacle et du rapport H/L
- ϕ est la pente du versant au vent, en suivant la direction du vent ($\phi = H / L_u$)
- L_u est la longueur du versant au vent, en suivant la direction du vent (voir figure 4.16(NA))
- H est la hauteur de l'obstacle (voir figure 4.16(NA))
- L est une longueur caractérisant le versant au vent et prenant la valeur :


$$L = L_u/2 \quad \text{pour } \phi < 0,25$$

$$L = 2H \quad \text{pour } \phi > 0,25 \quad (4.16-NA)$$

- X est la distance horizontale entre le lieu de construction considéré et le sommet de l'obstacle (voir figures 4.17(NA) et 4.18(NA))
- z est la distance verticale mesurée à partir du niveau du sol au lieu considéré
- α et k_{red} sont des coefficients définis dans le tableau 4.7(NA)

Forme de l'obstacle	S_{max}	α	k_{red}	
			$X < 0$	$X > 0$
Collines en chaîne	2,2 H/L	3	1,5	1,5
Falaises et escarpements	1,3 H/L	2,5	1,5	4
Collines isolées	1,6 H/L	4	1,5	1,5

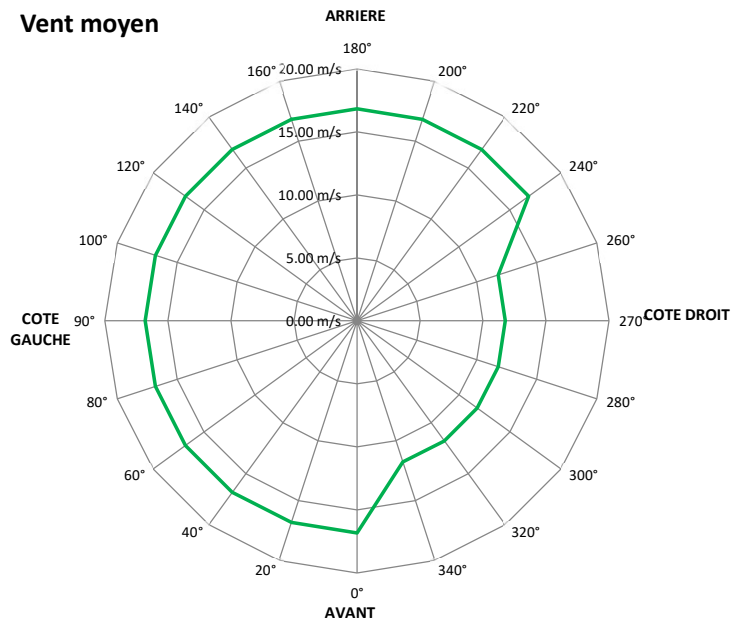
Pour ce projet, l'orographie n'est pas significative.


	Note de calcul Pression dynamique		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
CONFIDENTIEL	Client: ELEMENTS	Date: 02/11/2021		
	Code projet: WFR082_ CHEVENON	Revision: Rev2		

3.3. CONCLUSION SUR LA VITESSE MOYENNE

Compte tenu de la rugosité et de l'orographie, on obtient :

Direction de vent	V _b	Cr (0.5)	Co (0.5)	V _m (0.5)	Direction de vent	V _b	Cr (0.5)	Co (0.5)	V _m (0.5)
0°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s	180°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s
20°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s	200°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s
40°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s	220°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s
60°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s	240°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s
80°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s	260°	16.80 m/s	0.701	1.000	11.77 m/s
90°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s	270°	16.80 m/s	0.701	1.000	11.77 m/s
100°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s	280°	16.80 m/s	0.701	1.000	11.77 m/s
120°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s	300°	16.80 m/s	0.701	1.000	11.77 m/s
140°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s	320°	16.80 m/s	0.701	1.000	11.77 m/s
160°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s	340°	16.80 m/s	0.701	1.000	11.77 m/s



	Note de calcul Pression dynamique		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
CONFIDENTIEL	Cliant: ELEMENTS	Date: 02/11/2021		
	Code projet: WFR082_CHEVENON	Revision: Rev2		

4. PRESSION DYNAMIQUE DE POINTE

La pression dynamique de pointe à la hauteur z , qui comprend les fluctuations de vitesse moyenne et à court terme, doit être déterminée. Cette pression dynamique de pointe est celle utilisée pour la détermination des efforts de vent sur le centrale flottante.

NOTE:

La pression dynamique de pointe selon la définition de l'EUROCODE N'EST PAS BASEE SUR UN VENT RAFALE (c'est-à-dire pas moyenné sur une durée de 3 secondes). Il s'agit d'une pression dynamique incluant la vitesse moyenne (vitesse moyenne du vent V_m), plus une contribution des fluctuations de pression à court terme, définies par l'intensité de la turbulence.

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)]^{\frac{1}{2}} \cdot \rho \cdot V_m^2(z) = c_o(z) \cdot q_o \quad (4.8)$$

where:

ρ is the air density, which depends on the altitude, temperature and barometric pressure to be expected in the region during wind storms

Par ailleurs, l'intensité de la turbulence $I_v(z)$ à la hauteur z est définie comme l'écart type de la turbulence divisé par la vitesse moyenne du vent.

4.1. INTENSITE DE TURBULENCE

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{V_m(z)} = \frac{k_1}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{for} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4.7)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{for} \quad z < z_{\min}$$

where:

k_1 is the turbulence factor. The value of k_1 may be given in the National Annex. The recommended value for k_1 is 1,0.

c_o is the orography factor as described in 4.3.3

z_0 is the roughness length, given in Table 4.1

L'annexe nationale donne des indications sur la prise en compte du facteur de turbulence :

- en site plat et dans le cas d'orographie constituée d'obstacles bien individualisés (cas 2 défini par la présente Annexe Nationale pour l'application de la clause 4.3.3(1)), le coefficient de turbulence k_1 est défini par l'expression (4.19-NA) :

$$k_1 = 1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(z_0) + 3)^6 \quad (4.19-NA)$$


Ainsi on obtient:

Direction de vent	k_1	$I_v(0.5)$	Direction de vent	k_1	$I_v(0.5)$
0°	1.00	0.27	180°	1.00	0.27
20°	1.00	0.27	200°	1.00	0.27
40°	1.00	0.27	220°	1.00	0.27
60°	1.00	0.27	240°	1.00	0.27
80°	1.00	0.27	260°	1.00	0.27
90°	1.00	0.27	270°	1.00	0.27
100°	1.00	0.27	280°	1.00	0.27
120°	1.00	0.27	300°	1.00	0.27
140°	1.00	0.27	320°	1.00	0.27
160°	1.00	0.27	340°	1.00	0.27

4.2. DENSITE DE L'AIR

Selon l'annexe nationale, la valeur recommandée pour la densité de l'air est :

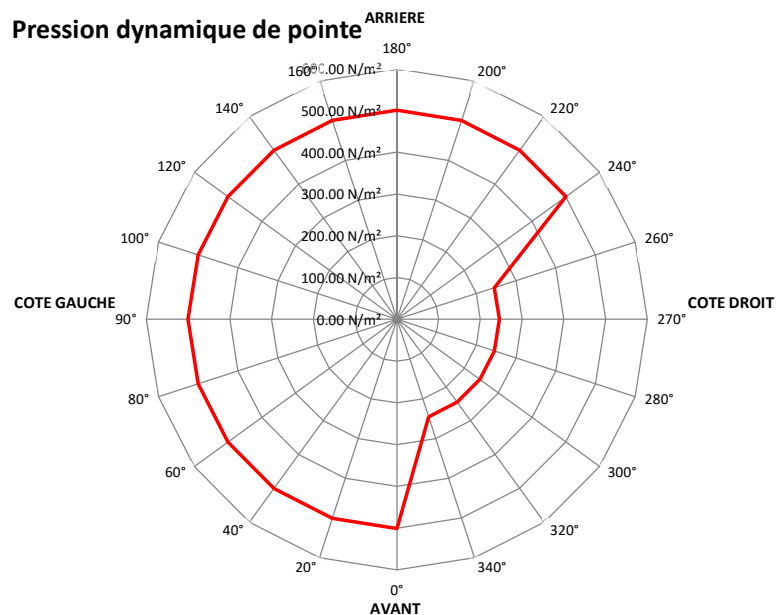
$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

	Note de calcul Pression dynamique		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
CONFIDENTIEL	Client: ELEMENTS	Date: 02/11/2021		
	Code projet: WFR082_ CHEVENON	Revision: Rev2		


4.3. CONCLUSION SUR LA PRESSION DYNAMIQUE

Compte tenu de l'intensité de la turbulence et de la densité de l'air, nous obtenons :

Direction du vent	V_s	$V_m(0.5)$	$I_v(0.5)$	ρ	$q_p(0.5)$
0°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
20°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
40°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
60°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
80°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
90°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
100°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
120°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
140°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
160°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
180°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
200°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
220°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
240°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²
260°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m²
270°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m²
280°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m²
300°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m²
320°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m²
340°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m²



Annexe 2 : Note de calcul sur la génération des vagues

	Note de calcul Génération de vagues		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
CONFIDENTIEL	Client: ELEMENTS	Date: 03/11/2021		
	Code projet:	WFR082_#1-1	Revision: VIndC	

NOTE DE CALCUL GENERATION DE VAGUES

RESUME

Le présent document décrit le modèle de prédiction de vagues utilisé, dont les résultats permettront ensuite le calcul des efforts de vagues auxquels la centrale flottante va être soumise.

1. Données d'entrée

1.1. Vitesse du vent

La vitesse du vent au-dessus de l'eau est nécessaire pour le calcul des vagues. Le même process que pour le calcul de la pression dynamique de design est utilisé, à l'exception des points suivants:

- On utilise la vitesse du vent à 10m (et non 0.5m)
- La vitesse de vent est déduite de la pression dynamique du vent, grâce à la formule suivante:

$$q_{design} = q_p(z) = \frac{1}{2} \rho v_{design}^2$$

Où:

$q_p(z)$ = pression dynamique du vent à la hauteur z (=10m)

On obtient :

Direction de vent	$q_p(10)$	V_{design}	Direction de vent	$q_p(10)$	V_{design}
0°	827.62 N/m ²	36.76 m/s	180°	827.62 N/m ²	36.76 m/s
20°	827.62 N/m ²	36.76 m/s	200°	827.62 N/m ²	36.76 m/s
40°	827.62 N/m ²	36.76 m/s	220°	827.62 N/m ²	36.76 m/s
60°	827.62 N/m ²	36.76 m/s	240°	827.62 N/m ²	36.76 m/s
80°	827.62 N/m ²	36.76 m/s	260°	405.53 N/m ²	25.73 m/s
90°	827.62 N/m ²	36.76 m/s	270°	405.53 N/m ²	25.73 m/s
100°	827.62 N/m ²	36.76 m/s	280°	405.53 N/m ²	25.73 m/s
120°	827.62 N/m ²	36.76 m/s	300°	405.53 N/m ²	25.73 m/s
140°	827.62 N/m ²	36.76 m/s	320°	405.53 N/m ²	25.73 m/s
160°	827.62 N/m ²	36.76 m/s	340°	405.53 N/m ²	25.73 m/s

1.2. Fetch

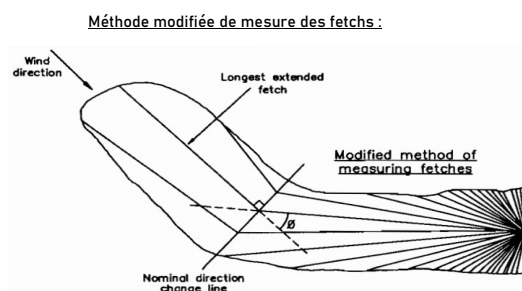
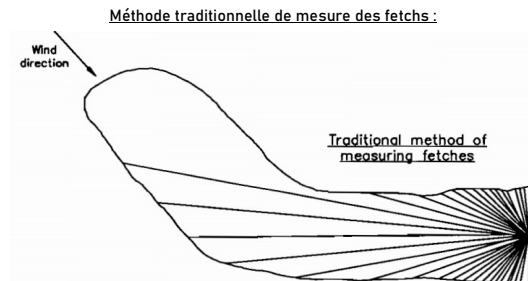
Le fetch est la plus longue distance sur le réservoir sur laquelle le vent peut souffler sans rencontrer d'obstacle, pour une direction de vent donnée. Ce sont des données clés pour le calcul des hauteurs de vagues et donc des efforts de vagues.

Les fetchs sont généralement tracés sous forme de lignes droites à partir du centre de l'objet d'intérêt, ici un bord de la centrale flottante.

Dans certains cas, de petits promontoires peuvent interrompre le trajet du fetch, provoquant une réduction importante de la longueur du fetch.

Cependant, dans la pratique, les vagues peuvent se réfracter et se diffracter autour de ces promontoires, provoquant des conditions de grosses vagues pouvant atteindre la structure flottante.

Les figures suivantes montrent la procédure pour déterminer les longueurs de fetch.



Sur ce dernier exemple, si l'angle est inférieur à 50°, alors la longueur de fetch étendue doit être considérée.

Pour le calcul des fetchs, et le calcul des efforts de vagues par la suite, nous utilisons sur les mêmes directions de vent que pour le calcul des efforts de vent.

Les fetchs sont les suivants :

Direction de vent	Fetch	Direction de vent	Fetch
0 °	45 m	180 °	190 m
20 °	55 m	200 °	190 m
40 °	60 m	220 °	220 m
60 °	65 m	240 °	200 m
80 °	55 m	260 °	200 m
90 °	50 m	270 °	55 m
100 °	120 m	280 °	70 m
120 °	200 m	300 °	85 m
140 °	210 m	320 °	90 m
160 °	210 m	340 °	95 m

1.3. Durée de vent

Un vent soufflant le long d'un fetch soulèvera des vagues proportionnelles à sa force et à sa durée.

A l'évidence, les fluctuations court-terme ne suffisent pas pour créer des vagues significatives. Par exemple, pour une longueur de fetch de 500 m, le temps minimum pour lever la vague significative est généralement d'environ 15 min. Ainsi, la vitesse du vent de pointe n'est pas une information pertinente.

Il est donc nécessaire de convertir la vitesse du vent rafale calculée à partir de la norme de construction en une valeur basée sur une durée plus appropriée pour la génération de vagues. Comme la procédure de conversion n'est décrite dans aucune norme, la méthode suivante est proposée.

Le modèle de prédiction des vagues que nous allons utiliser (CEM) permet de calculer le temps nécessaire pour élever la hauteur significative des vagues. L'idée est alors de calculer la vitesse du vent correspondant à cette durée, à partir de la vitesse du vent initiale de 3 secondes issue de la norme de construction nationale.

Un facteur de durée est proposé dans « Reservoir Dams: wave conditions, wave overtopping and slab protection », AJ Yarde, LS Banyard, NWH Allsop, HR Wallingford, avril 1996.

Ce facteur s'applique sur la vitesse du vent de design, afin de convertir une vitesse de vent d'une durée donnée à une autre durée.

Wind Duration	Duration factor
3 sec	1.51
15 min	1.05
30 min	1.03
1 hour	1.00
3 hour	0.96
6 hour	0.93
12 hour	0.87

(source Herbert et al. 1995)

On a donc:

$$V_{x\text{-duration}} = S_f \times V_{1h}$$

Où:

$V_{x\text{-duration}}$ = Vitesse du vent à la durée souhaitée

S_f = Facteur de durée

V_{1h} = Vitesse du vent moyenné sur 1 heure

En utilisant ce tableau de conversion de durée, nous sommes en mesure de calculer la vitesse du vent pour n'importe quelle durée, sur la base de la vitesse du vent peak issue de l'Eurocode.

Exemple:

Vent rafale 3 secondes = 32.79 m/s

En utilisant le facteur de conversion, on obtient:

Vent moyenné sur 10min = 24.06 m/s

2. Caractéristique des vagues

Les principaux éléments caractéristiques d'une vague sont:

- Hauteur de vague significative
- Période
- Longueur d'onde

Le ratio entre la hauteur de vague et la longueur d'onde donne la cambrure de la vague.

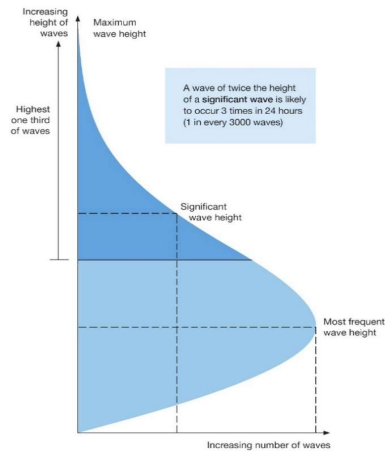
2.1. Hauteur de vague significative

En physique des vagues, la hauteur significative des vagues (SWH ou H_s ou H_{m0}) est traditionnellement définie comme la hauteur moyenne des vagues (du creux à la crête) du tiers le plus élevé des vagues.

Par exemple, en considérant une hauteur significative H_s de 10 mètres (33 pieds), statistiquement :

- 1 sur 10 sera plus grande que 10,7 mètres (35 pieds)
- 1 sur 100 sera plus grande que 15,1 mètres (50 pieds)
- 1 sur 1000 sera plus grande que 18,6 mètres (61 pieds)

Cela implique que l'on pourrait rencontrer une vague qui est à peu près le double de la hauteur de vague significative.



2.2. Période

La période de vague est le temps passé entre 2 vagues. Elle est directement liée à la longueur d'onde.

2.3. Longueur d'onde et conditions de site

La longueur d'onde dépend des conditions de site, qui sont définies en fonction du rapport entre la profondeur et la longueur d'onde.

La formule de la longueur d'onde dépend de ces conditions du site. Il faut donc passer par un processus itératif pour déterminer dans quelles conditions de site nous nous trouvons et quelle formule est alors applicable.

	Shallow Water	Transitional Water	Deep Water
Condition	$\frac{h}{\lambda} < \frac{1}{20}$	$\frac{1}{20} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$	$\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$
Wavelength	$\lambda = T\sqrt{gh}$	$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$	$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$

Où:

h = profondeur moyenne dans la direction de propagation de la vague.

λ = longueur d'onde, période spatiale de la vague.

T = période de la vague, période temporelle de la vague.

g = accélération de la pesanteur = 9.81 m/s²

2.4. Cambrure et hauteur de vague maximum

La cambrure d'une vague est le rapport entre sa hauteur et sa longueur d'onde :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{H_s}{\lambda} \right)$$

Où:

H_s = Hauteur significative de la vague

λ = longueur d'onde

α = cambrure de la vague

D'une manière générale, une onde de gravité progressive est physiquement limitée en hauteur par la profondeur et sa longueur d'onde.

La limite supérieure ou hauteur de vague maximum en eau profonde est fonction de la longueur d'onde et, dans les eaux peu profondes et de transition, est fonction à la fois de la profondeur et de la longueur d'onde.

Dans des conditions d'eau profonde, la limite théorique de cambrure de la vague est :

$$\left(\frac{H}{\lambda} \right)_{max} = 0.142 \approx \frac{1}{7}$$

Où:

H = hauteur de vague, dans notre cas on considère la hauteur significative de vague

λ = longueur d'onde

Dans des conditions d'eau transitoires, la limite théorique de cambrure de la vague est :

$$\left(\frac{H}{\lambda} \right)_{max} = 0.142 \tanh \left(\frac{2\pi h}{\lambda} \right)$$

Où:

H = hauteur de vague, dans notre cas on considère la hauteur significative de vague

λ = longueur d'onde

h = profondeur

NB: Il est fréquent que la hauteur significative de vague et sa longueur d'onde issues du modèle de prédiction soient supérieures à la limite de cambrure de la vague. Dans ce cas, la hauteur de vague maximum avant déferlement est retenue, au lieu de la hauteur significative de vague issue du modèle.

En fonction de la limite de vague déferlante, la hauteur de vague considérée est :

- hauteur significative de vague \leq limite de cambrure de la vague \Rightarrow la hauteur de vague significative est retenue
- hauteur significative de vague $>$ limite de cambrure de la vague \Rightarrow la limite de vague déferlante est retenue

3. Modèle de prédiction des vagues (CEM)

Le modèle de prédiction de vagues CEM (Coastal Engineering Manual) montre des résultats valides et précis dans un environnement à fetch limité. Ce manuel est une référence couramment utilisée en matière d'ingénierie côtière.

Le modèle CEM est un modèle semi-empirique qui est développé sur la base de paramètres d'onde sans dimension.

L'un des principaux avantages de l'utilisation de ce modèle est le calcul du temps minimum pour générer une vague, ce qui permet de définir la bonne durée de vent, et ainsi la bonne vitesse de vent.

3.1. Temps minimum pour générer une vague

La durée du vent doit être supérieure à t_{min} , qui est défini comme suit :

$$t_{min} = 77.23 \frac{F^{0.67}}{U^{0.34} g^{0.33}}$$

Où:

t_{min} = temps minimum pour générer une vague

g = accélération de la pesanteur = 9.81 m/s²

F = fetch (in m)

U = vitesse du vent (en m/s) à 10 m

En utilisant cette donnée comme donnée d'entrée pour le calcul de la vitesse du vent à la bonne durée, on obtient :

Direction de vent	t_{min}	Vitesse du vent	Direction de vent	t_{min}	Vitesse du vent
0 °	2.47 min	29.17 m/s	180 °	6.59 min	27.61 m/s
20 °	2.83 min	28.95 m/s	200 °	6.59 min	27.61 m/s
40 °	3.00 min	28.85 m/s	220 °	7.29 min	27.45 m/s
60 °	3.17 min	28.76 m/s	240 °	6.83 min	27.55 m/s
80 °	2.83 min	28.95 m/s	260 °	7.73 min	19.15 m/s
90 °	2.65 min	29.05 m/s	270 °	3.20 min	20.12 m/s
100 °	4.82 min	28.10 m/s	280 °	3.77 min	19.94 m/s
120 °	6.83 min	27.55 m/s	300 °	4.31 min	19.79 m/s
140 °	7.06 min	27.50 m/s	320 °	4.48 min	19.75 m/s
160 °	7.06 min	27.50 m/s	340 °	4.65 min	19.71 m/s

3.2. Période de pointe des vagues

Selon la méthode CEM, la période de pointe est donnée par :

$$T_p = 0.651 \left(\frac{gF}{u_*^2} \right)^{1/3}$$

Où:

T_p = période de pointe

g = accélération de la pesanteur = 9.81 m/s²

F = fetch (en m)

u_* = vitesse de friction (en m/s)

Et,

$$u_* = U \sqrt{0.001(1.1 + 0.035U)}$$

Où:

u_* = vitesse de friction (en m/s)

U = vitesse du vent (en m/s) à 10m

On obtient donc :

Direction de vent	Période de pointe	Direction de vent	Période de pointe
0 °	0.64 s	180 °	1.02 s
20 °	0.69 s	200 °	1.02 s
40 °	0.70 s	220 °	1.06 s
60 °	0.72 s	240 °	1.03 s
80 °	0.69 s	260 °	0.89 s
90 °	0.67 s	270 °	0.59 s
100 °	0.88 s	280 °	0.64 s
120 °	1.03 s	300 °	0.68 s
140 °	1.05 s	320 °	0.69 s
160 °	1.05 s	340 °	0.70 s

3.3. Longueur d'onde

En considérant la profondeur moyenne du réservoir, les conditions d'eaux profondes sont remplies pour toutes les directions de vent, nécessaires pour utiliser le modèle CEM (applicable uniquement en eau profonde et transitoire).

Direction de vent	λ	h/λ	Condition de site	Direction de vent	λ	h/λ	Condition de site
0 °	0.65 m	1/7	Deep Water	180 °	1.61 m	1/7	Deep Water
20 °	0.73 m	1/7	Deep Water	200 °	1.61 m	1/7	Deep Water
40 °	0.78 m	1/7	Deep Water	220 °	1.77 m	1/7	Deep Water
60 °	0.82 m	1/7	Deep Water	240 °	1.67 m	1/7	Deep Water
80 °	0.73 m	1/7	Deep Water	260 °	1.24 m	1/8	Deep Water
90 °	0.69 m	1/7	Deep Water	270 °	0.55 m	1/7	Deep Water
100 °	1.20 m	1/7	Deep Water	280 °	0.64 m	1/7	Deep Water
120 °	1.67 m	1/7	Deep Water	300 °	0.72 m	1/7	Deep Water
140 °	1.72 m	1/7	Deep Water	320 °	0.75 m	1/7	Deep Water
160 °	1.72 m	1/7	Deep Water	340 °	0.77 m	1/7	Deep Water

3.4. Hauteur significative de vague

Le modèle CEM donne:

$$H_{m0} = \left(4.13 \times 10^{-2} \times \sqrt{\frac{gF}{u_*^2}} \right) \times \frac{u_*^2}{g}$$

Où:

H_{m0} = hauteur significative de vague (en m)

g = accélération de la pesanteur = 9.81 m/s²

F = fetch (en m)

u_* = vitesse de friction (en m/s) (voir §3.2)

Ainsi on obtient:

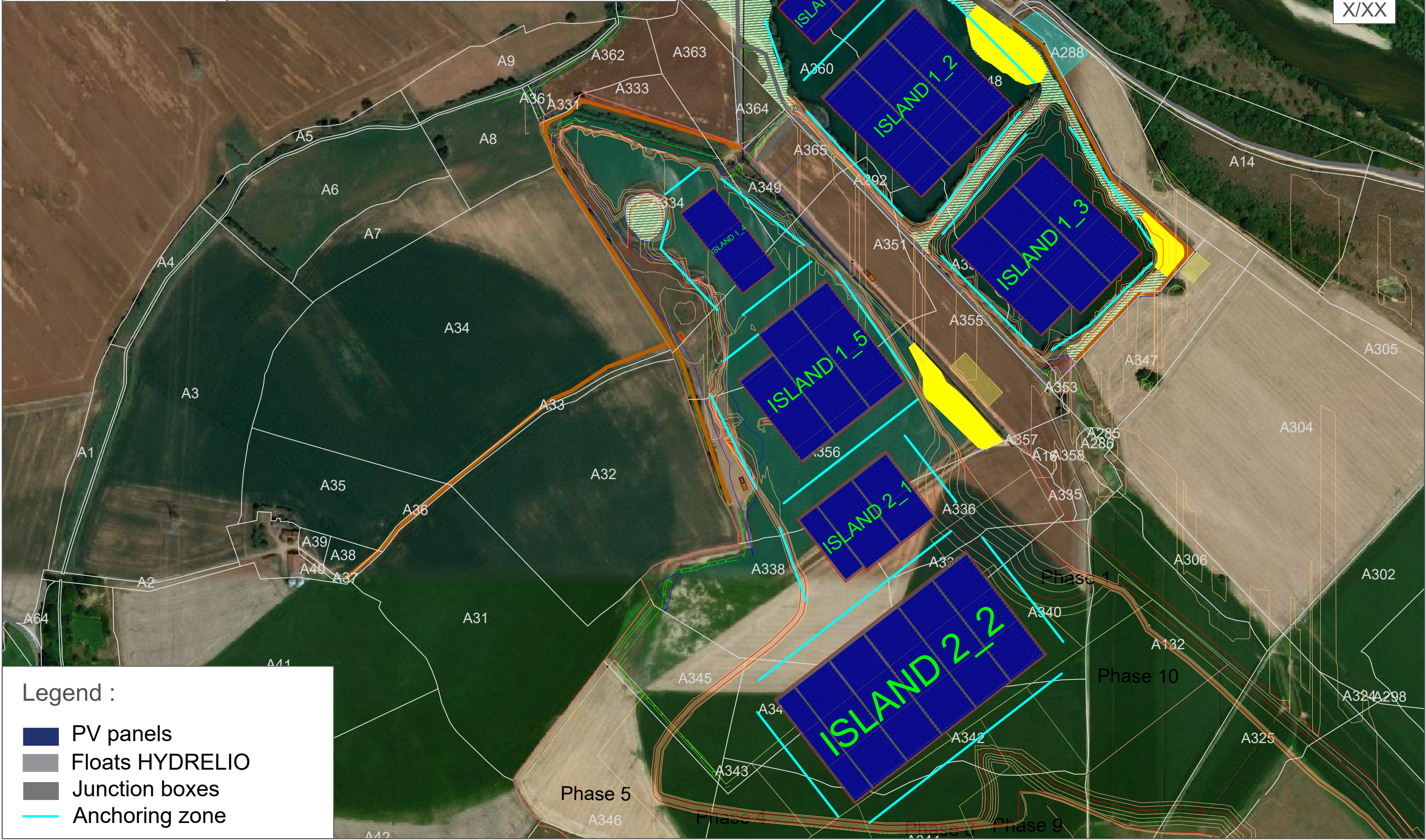
Direction de vent	Hauteur significative de vague	Direction de vent	Hauteur significative de vague
0 °	0.09 m	180 °	0.23 m
20 °	0.10 m	200 °	0.23 m
40 °	0.11 m	220 °	0.24 m
60 °	0.12 m	240 °	0.23 m
80 °	0.10 m	260 °	0.15 m
90 °	0.10 m	270 °	0.08 m
100 °	0.17 m	280 °	0.09 m
120 °	0.23 m	300 °	0.10 m
140 °	0.24 m	320 °	0.10 m
160 °	0.24 m	340 °	0.11 m

Note : Il est fréquent que la hauteur significative de vague et la longueur d'onde issues du modèle de prédiction dépassent la limite des vagues déferlantes. Dans ce cas, la hauteur de vague maximale autorisée avant le déferlement des vagues est considéré, au lieu de la hauteur de vague significative.

Annexe 3 : Plan d'implantation



WFR082 - CHEVENON
25 342.2 kWp



Legend :

- PV panels
- Floats HYDRELIO
- Junction boxes
- Anchoring zone