

# Levés bathymétriques de la gravière d'Artins

Février 2020



## Objet

La mission confiée par WPD à Dynamique Hydro consistait à lever la bathymétrie d'un plan d'eau dans le Loir et Cher, sur la commune d'Artins et à proximité du lieu-dit de Lancé, en vue d'un projet d'aménagement photovoltaïque.



Figure 1. Le plan d'eau d'Artins aux environs de Lancé (environ 10 ha)

## Méthodes

Les levés ont été réalisés le 5 février 2020 en quadrillant le plan d'eau selon un maillage de l'ordre de 25 m de côté (**figure 2**). L'altitude de la ligne d'eau était alors de 60,48 m NGF.

Le matériel de mesure utilisé est le suivant :

- échosondeur mono-faisceau Sonarmite BTX (précision +/- 2,5 cm) ;
- GPS centimétrique Trimble Geo7x.

8 129 points de mesures ont été levés. Après élimination des valeurs aberrantes, 7 932 points de mesures ont été retenus pour créer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) par interpolation surfacique (**figure 2**).

Les bords du lac n'ont pas été levés dans la mesure où la couverture végétale perturbait la réception du signal GPS et/ou des débris ligneux empêchaient de s'approcher des berges. Par conséquent, le MNT ne couvre pas la totalité de la surface en eau mais tout de même plus de 90%.

### Emprise des levés sur le plan d'eau d'Artins

- point de mesure retenu
- points exclus (valeurs aberrantes)
- surface en eau approximative



Figure 2. Emprise des levés



## Résultats

Outre cette note technique, les données restituées sont les suivantes :

- Points de mesures (fichier **ART\_bathy.shp**) renseignant principalement (6 derniers champs, dans l'ordre) :
  - o Les coordonnées XY des points,
  - o La profondeur des fonds par rapport à la sonde (mesure de l'échosondeur),
  - o L'altitude moyenne du sondeur (calée sur les levés GPS),
  - o L'altitude des fonds ( $Z_{sondeur} - profondeur$ ),
  - o La hauteur d'eau au droit de chaque point lors des levés ( $Z_{eau} - Z_{fond}$ ) ;
- MNT des fonds du lac (fichier **ART\_MNT.tif**) construit par interpolation surfacique à partir du champ  $Z_{fond}$  (altitude des fonds) des points de mesure ;
- Contour approximatif du plan d'eau d'après les photographies aériennes à faible résolution disponibles gratuitement auprès de l'IGN (fichier **ART\_contour.shp**).

Toutes les données cartographiques sont projetées en Lambert 93 – RGF 93.

### Bathymétrie du plan d'eau d'Artins

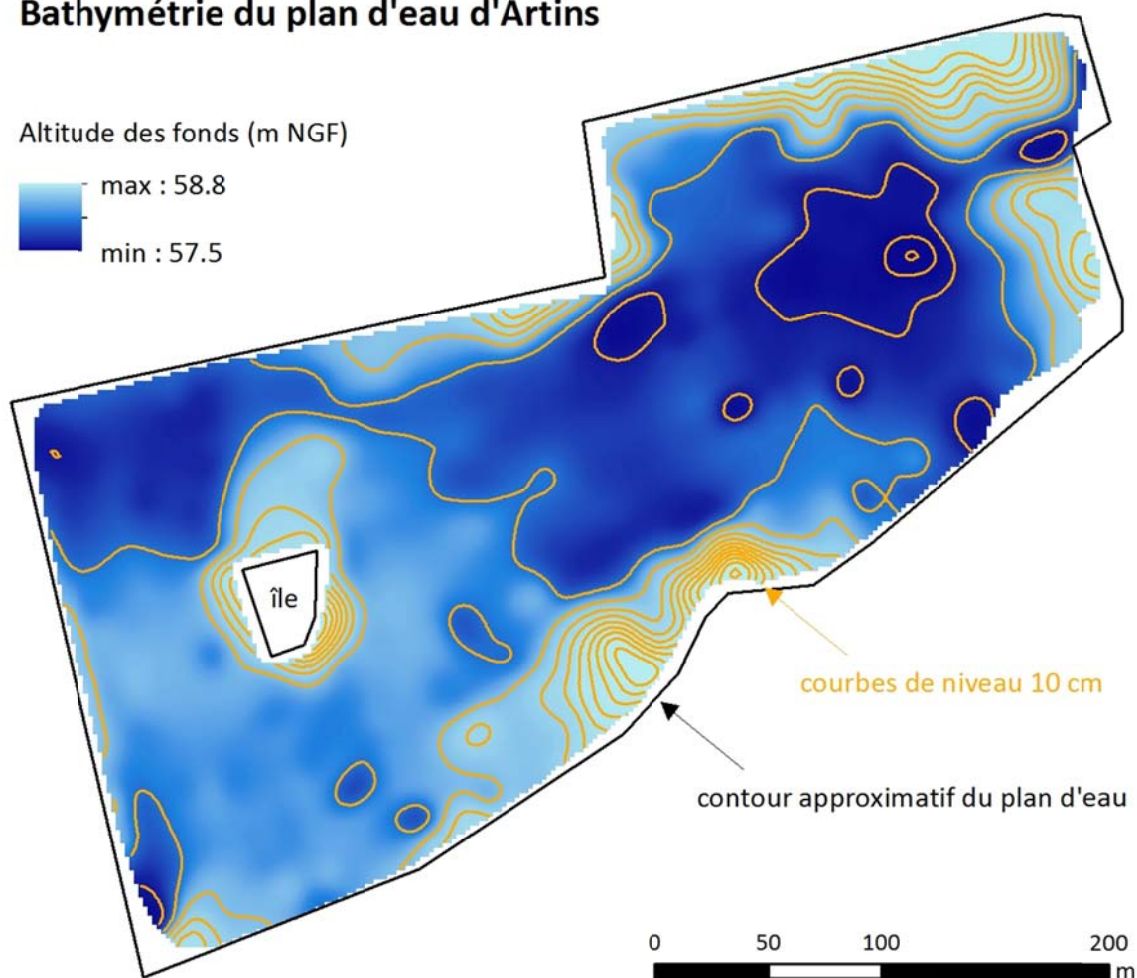


Figure 3. Bathymétrie du plan d'eau



# **ANNEXE 3**

---

***COURRIER DE LA DRAC CENTRE - VAL DE LOIRE  
DU 22 JUILLET 2020***



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PRÉFET DE LA RÉGION CENTRE-VAL DE LOIRE

Direction régionale  
des affaires culturelles

Service régional de  
l'archéologie

AFFAIRE SUIVIE PAR : VALERIE SCHEMMAMA  
TÉLÉPHONE. 02.38.78.85.49  
COURRIEL : VALERIE.SCHEMMAMA@CULTURE.GOUV.FR  
SECRETARIAT : ANNIE COOK  
TÉL. : 02 38 78 12 53  
COURRIEL : ANNIE.COOK@CULTURE.GOUV.FR  
RÉFÉRENCE : 20/VS/ACB1308

DYNAMIQUE HYDRO  
16 rue Masaryk  
69009 LYON

A l'attention de Monsieur Simon CHABERT

ORLÉANS, LE 22 JUILLET 2020

**OBJET :** Loir-et-Cher, Artins, analyse de la faisabilité administrative et réglementaire en vue d'un projet de centrale solaire photovoltaïque flottante

**P.J. :** Cartographie des sites et fiche de renseignement de demande anticipée de diagnostic

Monsieur,

En réponse à votre demande d'information du 17 juillet et à la suite de votre échange téléphonique avec Madame Schemmama le 21 juillet, j'ai l'honneur de vous faire connaître les éléments suivants concernant le patrimoine archéologique dans le cadre de l'étude citée en objet.

Une trentaine de sites sont actuellement inventoriés sur la commune d'Artins, potentielle agglomération secondaire gallo-romaine. Le secteur concerné par le projet, localisé dans la vallée du Loir, est particulièrement sensible comme en témoignent les différentes découvertes révélées à ce jour. Elles concernent en particulier un atelier de taille de silex et un dolmen (aujourd'hui détruit) d'époque néolithique, une ferme gauloise, un château fortifié médiéval à l'emplacement de l'édifice actuel de *la Salle*, l'aménagement probable d'une garenne à lapins vraisemblablement en lien avec le château médiéval, tandis que les habitats encore en place peuvent avoir une origine ancienne attestée dans les archives comme à *Lancé*, mentionné dès 1625 mais certainement antérieur.

J'attire votre attention sur le fait que ces éléments ne préjugent pas de la découverte de sites non encore repérés à ce jour. C'est pourquoi, en raison de la nature du projet, il est nécessaire de prévoir la prise en compte du patrimoine archéologique. Il convient donc, dès que le projet d'aménagement le rendra possible, que le maître d'ouvrage prenne l'attache du Service régional d'archéologie, afin que toutes mesures préventives nécessaires puissent être mises en œuvre (évaluation de l'impact, fouilles éventuelles ou mesures de protection des sites), conformément aux dispositions prévues au Livre V, titre II du code du patrimoine.

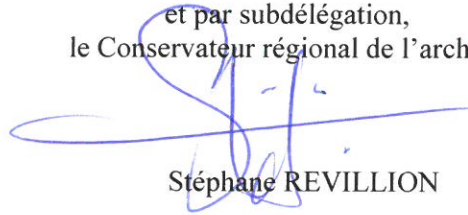
Il est également possible d'anticiper sur la procédure (L. 522.4 et article R. 523-12 du code du patrimoine, livre V, titre II), en saisissant le Préfet de région (DRAC Centre-Val de Loire, Service régional de l'archéologie) avant le dépôt de la demande d'autorisation, afin qu'il examine si le projet est susceptible de donner lieu à des prescriptions archéologiques. Cette saisine sera accompagnée d'un plan parcellaire avec ses références cadastrales, du descriptif du projet et son emplacement sur le terrain d'assiette, ainsi que d'une notice précisant les modalités techniques envisagées pour l'exécution des travaux.

Quel que soit le mode de saisine, si le projet de travaux porte sur un terrain d'une superficie égale ou supérieure à 3000 m<sup>2</sup>, l'aménageur devra acquitter, conformément à l'article L 524-7 du Code du Patrimoine, une redevance d'archéologie préventive de 0,56 euro par m<sup>2</sup> (montant indexé sur le coût de la construction).

Mon service reste à votre disposition pour vous apporter toute précision que vous souhaiteriez obtenir.

Dans cette attente, je vous prie d'agréer, Monsieur, l'expression de ma considération distinguée.

Pour le Préfet de la région Centre – Val de Loire  
et par subdélégation,  
le Conservateur régional de l'archéologie,





Stéphane REVILLION



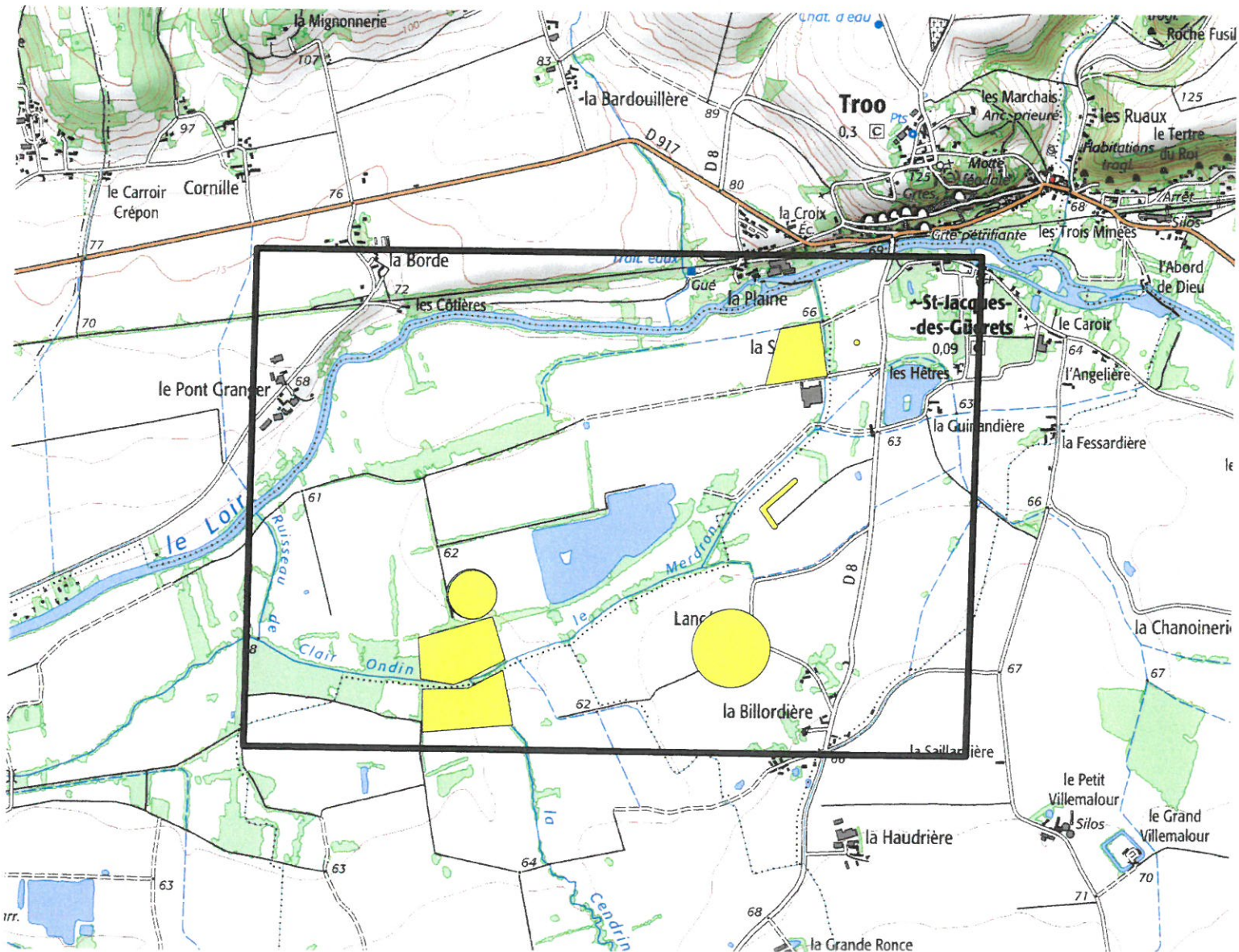
Préfecture de la région Centre-Val de Loire  
Direction des affaires culturelles

Service régional de l'archéologie  
Sites et indices de sites archéologiques  
État des connaissances en juillet 2020

Artins  
Projet de centrale solaire photovoltaïque flottante  
(Loir-et-Cher)

-  Périmètre de l'étude
-  Sites archéologiques

Une trentaine de sites sont actuellement inventoriés sur la commune d'Artins, potentielle agglomération secondaire gallo-romaine. Le secteur concerné par le projet, localisé dans la vallée du Loir, est particulièrement sensible comme en témoignent les différentes découvertes révélées à ce jour. Elles concernent en particulier un atelier de taille de silex et un dolmen (aujourd'hui détruit) d'époque néolithique, une ferme gauloise, un château fortifié médiéval à l'emplacement de l'édifice actuel de *la Salle*, l'aménagement probable d'une garenne à lapins vraisemblablement en lien avec le château médiéval, tandis que les habitats encore en place peuvent avoir une origine ancienne attestée dans les archives comme à *Lancé*, mentionné dès 1625 mais certainement antérieur. Ces informations ne préjugent pas de la présence de sites encore non repérés à ce jour.





## **Demande anticipée de prescription archéologique**

Afin de leur permettre de mieux maîtriser les délais liés aux contraintes archéologiques, l'article L.522-4 du code du patrimoine prévoit la possibilité pour les aménageurs de saisir le préfet de région d'une demande anticipée de prescription archéologique. Celle-ci doit intervenir avant le dépôt de la demande d'autorisation administrative requise pour la réalisation du projet.

La demande anticipée de prescription archéologique s'inscrit dans une procédure en deux étapes :

- une demande d'examen préalable du projet afin de savoir s'il est susceptible de donner lieu à des prescriptions archéologiques (article R.523-12 du code du patrimoine),
- une demande anticipée de prescription archéologique (article R.523-14 du code du patrimoine).

En application de l'article R.523-12 du code du patrimoine, un dossier complet doit être adressé au préfet de la région Centre – Val de Loire (Direction régionale des affaires culturelles, Service régional de l'archéologie, 6 rue de la Manufacture, 45043 Orléans cedex). Celui-ci doit comporter les éléments suivants :

Nom de la commune

Localisation

Intitulé du projet d'aménagement

Plan de localisation (IGN 1/25000)

Plan parcellaire comportant les références cadastrales (extrait cadastral) et figurant l'emprise du projet (*si possible, pour les grands aménagements, fichier numérique de préférence au format shape ou DXF (version 2010/2013), projection Lambert 93*).

État parcellaire, contenances et superficie totale des terrains sur lesquels porte le projet

Notice précisant les modalités techniques envisagées pour l'exécution des travaux

À compter de la réception de la demande d'examen préalable du projet, le préfet dispose d'un délai de deux mois pour informer le demandeur si son projet présenté donnera lieu ou non à une prescription archéologique. En cas de réponse positive du préfet de région, l'aménageur est en droit de solliciter la prescription de diagnostic.

À compter de la réception de la demande anticipée de prescription archéologique, le préfet dispose d'un délai de 1 mois (délai porté à deux mois lorsque les aménagements, ouvrages ou travaux projetés sont soumis à étude d'impact) pour prescrire un diagnostic archéologique.

En application de l'article L.522-4 du code du patrimoine, l'aménageur qui sollicite la réalisation anticipée d'un diagnostic archéologique pour un aménagement sur un terrain d'une surface égale ou supérieure à 3 000 m<sup>2</sup>, est redevable de la redevance prévue à l'article L.524-2. La demande anticipée de prescription archéologique constitue un système partiellement dérogatoire aux règles de prescription et de liquidation de la redevance. En effet, cette demande constitue en elle-même un fait générateur de redevance et ce, quelle que soit la nature de l'aménagement projeté. En conséquence, aucune exonération n'est possible. La redevance d'archéologie préventive est calculée sur la base d'un taux indexé sur l'indice du coût de la construction (0,56 € par mètre carré, taux fixé par arrêté du 23 décembre 2019 pour la période du 1<sup>er</sup> janvier 2020 au 31 décembre 2020).

Enfin, la demande anticipée de prescription archéologique doit faire l'objet d'un courrier dûment daté et signé par le demandeur.





# Design d'ancrage préliminaire



**CIEL & TERRE INTERNATIONAL**

100 rue Harrison  
59262 SAINGHAIN-EN-MELANTOIS, France  
+33 (0)3.20.01.05.65



## INTRODUCTION

Le document qui suit décrit le design d'ancrage pour la centrale flottante Hydrelio® du projet WFR105, 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 as built, c'est-à-dire après avoir reçu et analysé les positions exactes des points d'ancrage. 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 ancrs Longueur approximative des lignes d'ancrage Position approximative des barres d'ancrage	X
Détaillé	Position théorique des ancrs Longueur théorique des lignes d'ancrage Position théorique des barres d'ancrage	
Positioning	<u>Positionnement des points d'ancrage :</u> Position exacte des ancrs Longueur réelle des lignes d'ancrage Position théorique des barres d'ancrage	
As built	Position exacte des ancrs Longueur réelle des lignes d'ancrage Position réelle des barres d'ancrage	

<b>Localisation</b>	Artins, 41800 FRANCE
<b>Référence projet</b>	WFR105
<b>Référence design</b>	V6indA
<b>Ecrit par</b>	JH
<b>Approuvé par</b>	RDF
<b>15 juillet 2021</b>	
<b>CONFIDENTIEL</b>	

# TABLE DES MATIERES

<b>1 </b>	<b>Caractéristiques du réservoir.....</b>	<b>7</b>
<b>2 </b>	<b>Efforts environnementaux.....</b>	<b>8</b>
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.....	13
2.3.1.	Méthode de calcul .....	13
2.3.2.	Modèle de génération de vagues .....	15
2.3.3.	Efforts de vague .....	15
2.4.	Efforts de courant.....	17
2.4.1.	Méthode de calcul .....	17
2.4.2.	Efforts de courant .....	18
<b>3 </b>	<b>Enveloppe de charge .....</b>	<b>20</b>
3.1.	Combinaison des efforts.....	20
3.2.	Efforts par côté.....	21
<b>4 </b>	<b>Méthode d'ancrage.....</b>	<b>23</b>
4.1	Design de l'ilot .....	23
4.2	Description du système d'ancrage .....	24
4.2.1.	Introduction .....	24
4.2.2.	Scénarios de design .....	25
4.2.3.	Barre d'ancrage.....	26
4.2.4.	Lignes d'ancrage .....	27
<b>5 </b>	<b>Calcul d'ancrage.....</b>	<b>28</b>
5.1	Calcul statique .....	28

5.2	Calcul quasi-statique .....	30
5.2.1.	Introduction .....	30
5.3	Management des efforts verticaux .....	31
5.3.1.	Introduction .....	31
<b>6 </b>	<b>Résultats.....</b>	<b>33</b>
6.1	Hypothèses.....	33
6.2	Résultats principaux .....	34
6.3	Nomenclature.....	36
6.4	Mouvements de l'îlot .....	37



## FIGURES

Figure 1 : Repère de référence (x,y,z).....	8
Figure 2 : Test en soufflerie sur une configuration Hydrelio® réduite .....	9
Figure 3 : Direction de vent angulaire .....	10
Figure 4 : Diagramme des efforts de vent (Résultante horizontale   Fxy   ) .....	12
Figure 5 : Diagramme des efforts de vagues (Résultante horizontale   Fxy   ) .....	16
Figure 6 : Diagramme des efforts de courant (Résultante horizontale   Fxy   ).....	19
Figure 7 : Diagramme des efforts environnementaux (Résultante horizontale   Fxy   ) .....	21
Figure 8 : Diagramme de considération des efforts par côté.....	22
Figure 9 : Efforts environnementaux par côté .....	22
Figure 10 : Exemple d'ancrage en berge.....	24
Figure 11 : Exemple d'ancrage au fond .....	24
Figure 12 : Exemple d'un ancrage en berge à niveau d'eau haut et bas.....	25
Figure 13 : Exemple d'un ancrage au fond à niveau d'eau haut et bas .....	25
Figure 14 : barre d'ancrage .....	26
Figure 15 : Cas accidentel avec des lignes élastiques.....	26
Figure 16 : Schéma d'un ancrage en berge.....	28
Figure 17 : Schéma d'un ancrage au fond.....	28
Figure 18 : Lignes d'amarrage caténares .....	30
Figure 19 : Repère de référence (x, y, z).....	31
Figure 20 : Schéma des efforts verticaux appliqués dans le cas d'un ancrage en berge.....	32
Figure 21 : Schéma des efforts verticaux appliqués dans le cas d'un ancrage au fond .....	32
Figure 22 : Schéma du système d'ancrage usuel pour ARTINS .....	35
Figure 23 : Schéma des mouvements de l'îlot .....	37

## TABLES

Tableau 1 : Données sur le réservoir .....	7
Tableau 2 : Efforts de vent par direction .....	11
Tableau 3 : Effort de vague par direction.....	15
Tableau 4 : Effort de courant par direction .....	18
Tableau 5 : Efforts environnementaux par direction .....	20
Tableau 6 : Considération des efforts par côté .....	21
Tableau 7 : Cas intact et cas accidentel.....	27
Tableau 8 : Formules utilisées dans le calcul d'ancrage statique .....	29
Tableau 9 : Hypothèses d'ancrage .....	33
Tableau 10 : Résultats des calculs d'ancrage .....	34
Tableau 11: Nomenclature du système d'ancrage.....	36
Tableau 12 : Mouvements maximums de l'îlot.....	37

# 1 | CARACTERISTIQUES DU RESERVOIR

Le tableau 1 résume les informations fournies par le client.

Le client a également fourni une bathymétrie du réservoir.

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

**Tableau 1 : Données sur le réservoir**

ARTINS	
Localisation	Artins, 41800 FRANCE
Coordonnées GPS	47.765643, 0.778545
Conditions de mesure	Par le client
Eau douce / salée	Eau douce
Niveau des berges	62 m NGF
Niveau d'eau maximum (HWL)	64.5 m NGF
Niveau d'eau minimum (LWL)	58.5 m NGF
Variation de niveau (m)	6 m
Point le plus bas du réservoir (LG)	57.5 m NGF
Profondeur maximum (m)	7 m
Vitesse d'écoulement et direction	1 m/s

NB : Afin d'affiner la valeur de la vitesse d'écoulement, nous proposons au client de réaliser une étude hydrodynamique.



## 2 | EFFORTS ENVIRONNEMENTAUX

### 2.1. Repère

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

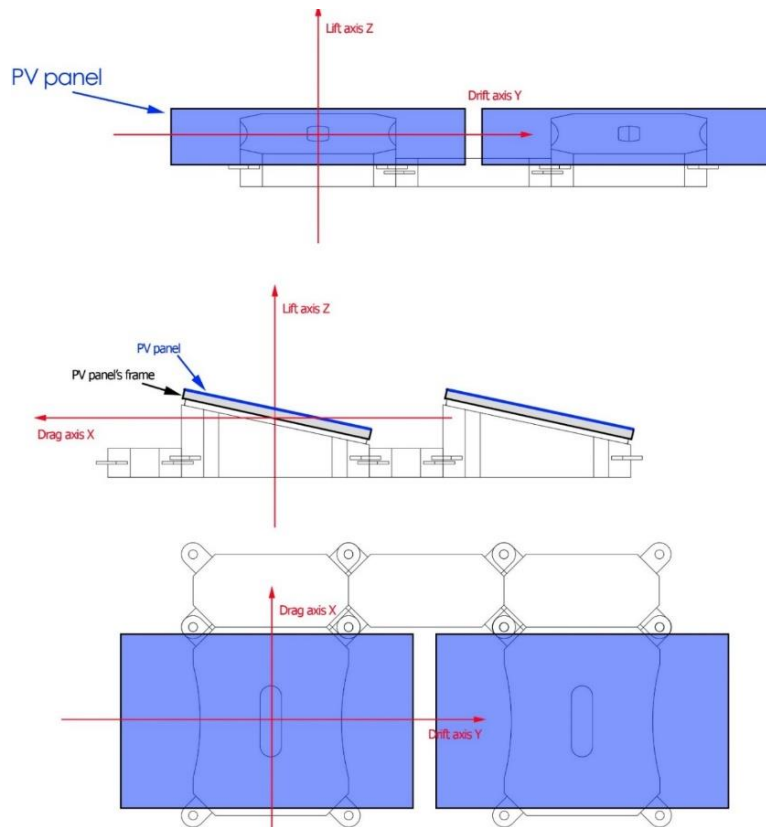


Figure 1 : Repère de référence (x,y,z)

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 :

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

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

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

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

$\rho$  = masse volumique du fluide (air)

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

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

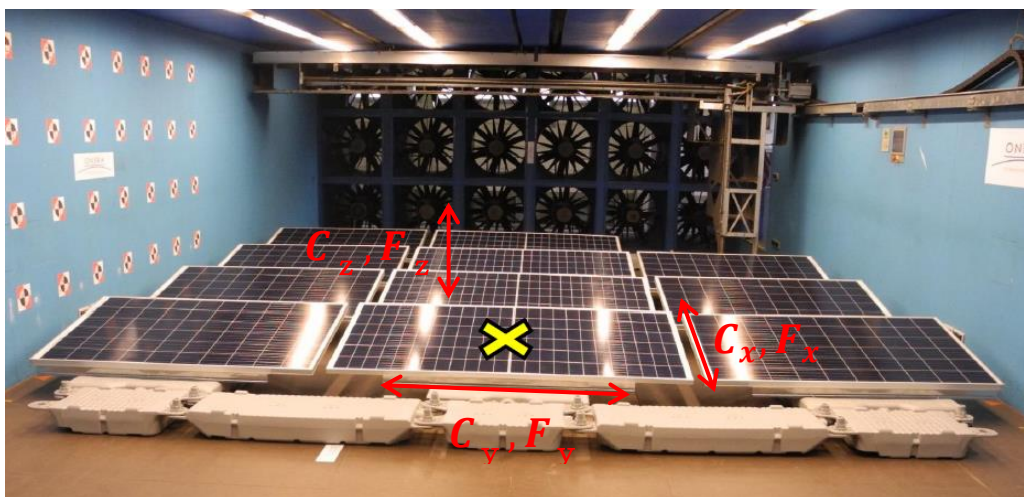


Figure 2 : Test en soufflerie sur une configuration Hydrelío® réduite

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...)

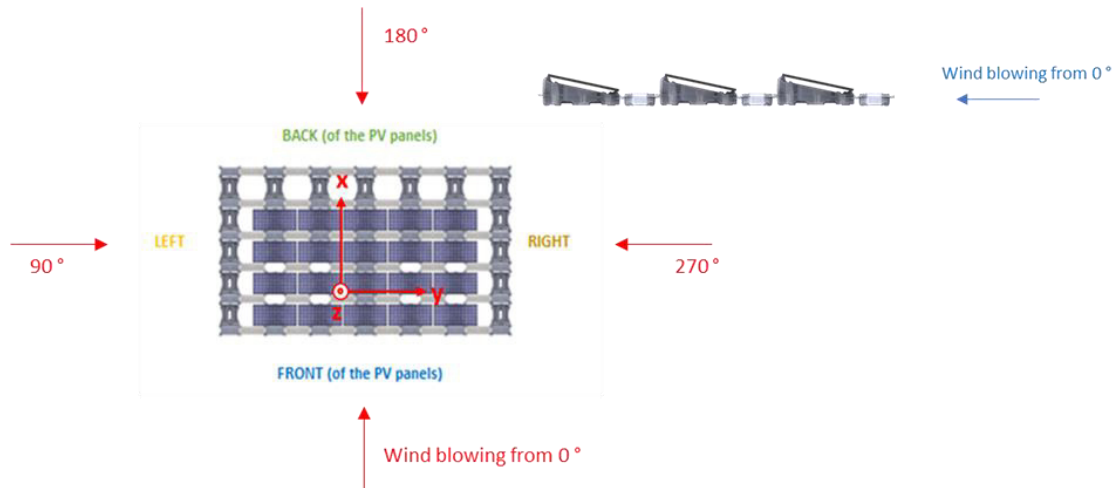


Figure 3 : Direction de vent angulaire

Ainsi, pour une direction de vent donnée  $\theta$ , l'effort sur la centrale flottante  $F_\theta$  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					Ilot 2				
Wind direction	Wind pressure	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>	Wind direction	Wind pressure	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>
0 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	285.48 kN	-0.01 kN	285.48 kN	0 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	193.21 kN	-0.01 kN	193.21 kN
20 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	285.48 kN	90.17 kN	299.38 kN	20 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	193.21 kN	63.37 kN	203.33 kN
40 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	182.84 kN	90.17 kN	203.86 kN	40 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	128.00 kN	63.37 kN	142.83 kN
60 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	182.84 kN	112.39 kN	214.62 kN	60 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	128.00 kN	79.47 kN	150.66 kN
80 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	182.84 kN	112.39 kN	214.62 kN	80 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	128.00 kN	79.47 kN	150.66 kN
90 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	1.97 kN	112.39 kN	112.40 kN	90 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	1.06 kN	79.47 kN	79.48 kN
100 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-299.37 kN	112.39 kN	319.77 kN	100 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-208.43 kN	79.47 kN	223.07 kN
120 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-299.37 kN	112.39 kN	319.77 kN	120 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-208.43 kN	79.47 kN	223.07 kN
140 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-299.37 kN	106.70 kN	317.82 kN	140 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-208.43 kN	75.05 kN	221.53 kN
160 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-608.77 kN	106.70 kN	618.05 kN	160 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-404.85 kN	75.05 kN	411.75 kN
180 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-608.77 kN	0.11 kN	608.77 kN	180 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-404.85 kN	0.07 kN	404.85 kN
200 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-608.77 kN	-106.70 kN	618.05 kN	200 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-404.85 kN	-36.77 kN	406.52 kN
220 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-299.37 kN	-106.70 kN	317.82 kN	220 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	-102.13 kN	-36.77 kN	108.55 kN
240 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	-299.37 kN	-106.70 kN	317.82 kN	240 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	-102.13 kN	-38.94 kN	109.30 kN
260 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	-299.37 kN	-106.70 kN	317.82 kN	260 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	-102.13 kN	-38.94 kN	109.30 kN
270 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	0.96 kN	-55.07 kN	55.08 kN	270 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	0.52 kN	-38.94 kN	38.95 kN
280 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	89.59 kN	-55.07 kN	105.16 kN	280 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	62.72 kN	-38.94 kN	73.83 kN
300 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	89.59 kN	-55.07 kN	105.16 kN	300 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	62.72 kN	-38.94 kN	73.83 kN
320 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	89.59 kN	-44.18 kN	99.89 kN	320 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	62.72 kN	-31.05 kN	69.99 kN
340 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	285.48 kN	-44.18 kN	288.88 kN	340 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	193.21 kN	-31.05 kN	195.69 kN

Ilot 3					Ilot 4				
Wind direction	Wind pressure	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>	Wind direction	Wind pressure	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>
0 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	73.76 kN	0.00 kN	73.76 kN	0 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	60.39 kN	0.00 kN	60.39 kN
20 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	73.76 kN	23.20 kN	77.32 kN	20 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	60.39 kN	18.25 kN	63.09 kN
40 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	49.19 kN	23.20 kN	54.39 kN	40 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	39.67 kN	18.25 kN	43.67 kN
60 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	49.19 kN	29.70 kN	57.47 kN	60 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	39.67 kN	23.49 kN	46.10 kN
80 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	49.19 kN	29.70 kN	57.47 kN	80 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	39.67 kN	23.49 kN	46.10 kN
90 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	0.18 kN	29.70 kN	29.70 kN	90 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	0.13 kN	23.49 kN	23.49 kN
100 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-83.70 kN	29.70 kN	88.82 kN	100 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-69.01 kN	23.49 kN	72.89 kN
120 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-83.70 kN	29.70 kN	88.82 kN	120 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-69.01 kN	23.49 kN	72.89 kN
140 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-83.70 kN	28.36 kN	88.38 kN	140 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-69.01 kN	22.63 kN	72.62 kN
160 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-173.04 kN	28.36 kN	175.35 kN	160 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-149.65 kN	22.63 kN	151.35 kN
180 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-173.04 kN	0.02 kN	173.04 kN	180 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-149.65 kN	0.02 kN	149.65 kN
200 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-173.04 kN	-28.36 kN	175.35 kN	200 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-149.65 kN	-22.63 kN	151.35 kN
220 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-83.70 kN	-28.36 kN	88.38 kN	220 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	-69.01 kN	-22.63 kN	72.62 kN
240 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	-83.70 kN	-28.36 kN	88.38 kN	240 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	-69.01 kN	-22.63 kN	72.62 kN
260 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	-83.70 kN	-28.36 kN	88.38 kN	260 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	-69.01 kN	-22.63 kN	72.62 kN
270 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	0.09 kN	-14.55 kN	14.55 kN	270 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	0.06 kN	-11.51 kN	11.51 kN
280 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	24.11 kN	-14.55 kN	28.16 kN	280 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	19.44 kN	-11.51 kN	22.59 kN
300 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	24.11 kN	-14.55 kN	28.16 kN	300 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	19.44 kN	-11.51 kN	22.59 kN
320 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	24.11 kN	-11.37 kN	26.65 kN	320 °	245.29 N/m <sup>2</sup>	19.44 kN	-8.94 kN	21.40 kN
340 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	73.76 kN	-11.37 kN	74.63 kN	340 °	500.60 N/m <sup>2</sup>	60.39 kN	-8.94 kN	61.05 kN

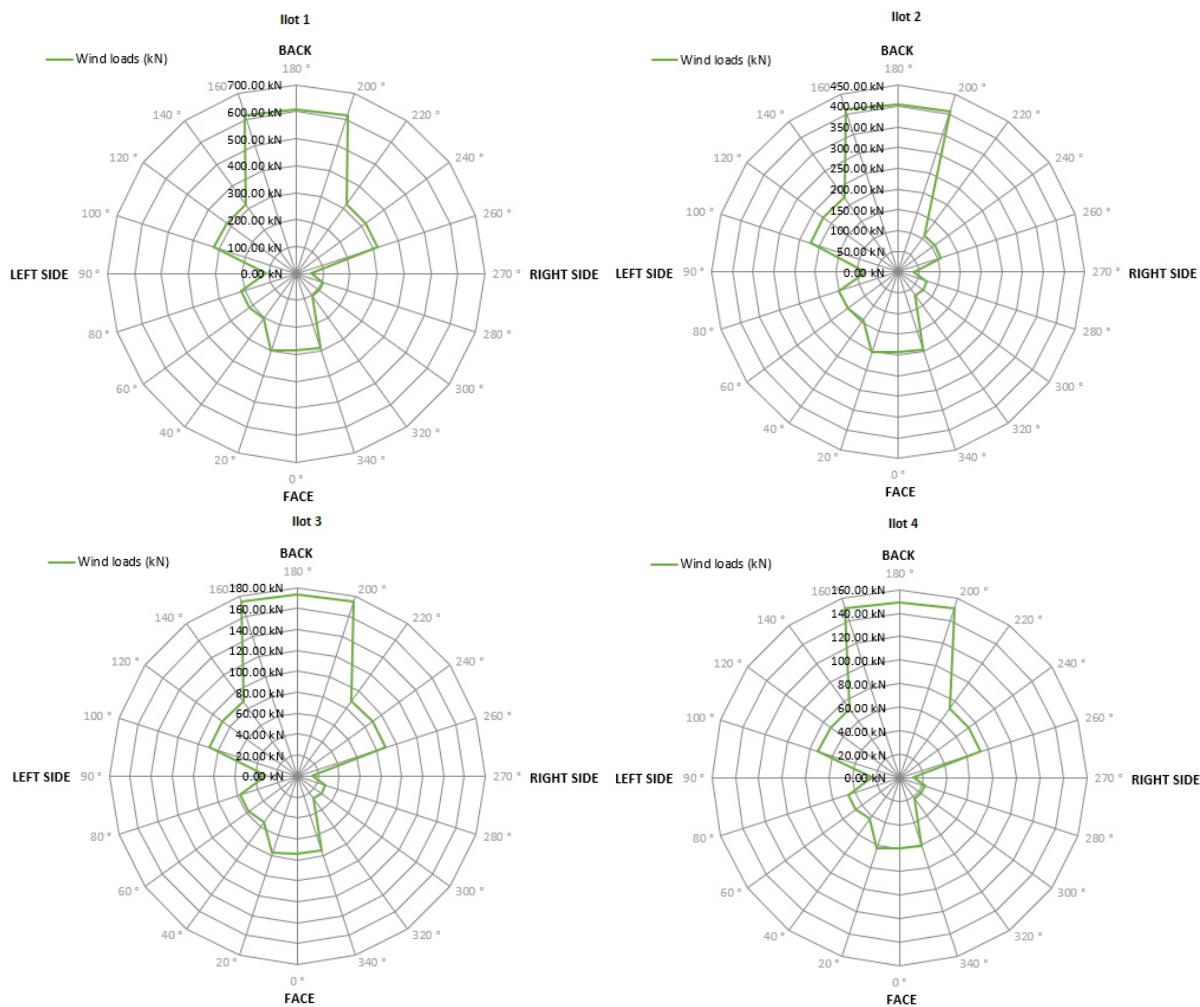


Figure 4 : Diagramme des efforts de vent (Résultante horizontale | Fxy | )



## 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")

$\rho$  = masse volumique de l'eau = 1 000 kg/m<sup>3</sup>

$g$  = accélération de la pesanteur = 9,81 m/s<sup>2</sup>

$H_I$  = 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

$\beta$  = 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")

$\rho$  = masse volumique = 1 000 kg/m<sup>3</sup>

$g$  = accélération de la pesanteur = 9,81 m/s<sup>2</sup>

$H_I$  = hauteur de vague incidente = hauteur de vague significative

$\beta$  = 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 ».

### 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					Ilot 2				
Wind direction	Wave height	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>	Wind direction	Wave height	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>
0°	0.10 m	1.12 kN	0.00 kN	1.12 kN	0°	0.05 m	0.19 kN	0.00 kN	0.19 kN
20°	0.10 m	1.32 kN	0.48 kN	1.40 kN	20°	0.05 m	0.26 kN	0.09 kN	0.28 kN
40°	0.10 m	1.16 kN	0.98 kN	1.52 kN	40°	0.05 m	0.26 kN	0.21 kN	0.33 kN
60°	0.10 m	0.72 kN	1.26 kN	1.45 kN	60°	0.05 m	0.17 kN	0.30 kN	0.35 kN
80°	0.10 m	0.21 kN	1.19 kN	1.21 kN	80°	0.05 m	0.06 kN	0.32 kN	0.32 kN
90°	0.09 m	0.00 kN	0.80 kN	0.80 kN	90°	0.19 m	0.00 kN	3.49 kN	3.49 kN
100°	0.09 m	-0.16 kN	0.92 kN	0.94 kN	100°	0.19 m	-0.66 kN	3.77 kN	3.83 kN
120°	0.09 m	-0.56 kN	0.97 kN	1.12 kN	120°	0.19 m	-2.07 kN	3.58 kN	4.14 kN
140°	0.09 m	-0.90 kN	0.76 kN	1.18 kN	140°	0.19 m	-3.03 kN	2.54 kN	3.95 kN
160°	0.09 m	-1.02 kN	0.37 kN	1.09 kN	160°	0.19 m	-3.09 kN	1.12 kN	3.28 kN
180°	0.05 m	-0.31 kN	0.00 kN	0.31 kN	180°	0.05 m	-0.18 kN	0.00 kN	0.18 kN
200°	0.05 m	-0.36 kN	-0.13 kN	0.39 kN	200°	0.05 m	-0.24 kN	-0.09 kN	0.26 kN
220°	0.05 m	-0.32 kN	-0.27 kN	0.42 kN	220°	0.04 m	-0.13 kN	-0.11 kN	0.17 kN
240°	0.04 m	-0.11 kN	-0.19 kN	0.22 kN	240°	0.04 m	-0.09 kN	-0.16 kN	0.18 kN
260°	0.04 m	-0.03 kN	-0.18 kN	0.18 kN	260°	0.04 m	-0.03 kN	-0.16 kN	0.17 kN
270°	0.05 m	0.00 kN	-0.23 kN	0.23 kN	270°	0.14 m	0.00 kN	-1.81 kN	1.81 kN
280°	0.05 m	0.05 kN	-0.27 kN	0.27 kN	280°	0.14 m	0.34 kN	-1.95 kN	1.98 kN
300°	0.05 m	0.16 kN	-0.28 kN	0.32 kN	300°	0.14 m	1.07 kN	-1.86 kN	2.15 kN
320°	0.05 m	0.26 kN	-0.22 kN	0.34 kN	320°	0.14 m	1.57 kN	-1.32 kN	2.05 kN
340°	0.07 m	0.53 kN	-0.19 kN	0.57 kN	340°	0.21 m	3.66 kN	-1.33 kN	3.89 kN

Ilot 3					Ilot 4				
Wind direction	Wave height	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>	Wind direction	Wave height	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>
0°	0.07 m	0.21 kN	0.00 kN	0.21 kN	0°	0.12 m	0.60 kN	0.00 kN	0.60 kN
20°	0.07 m	0.28 kN	0.10 kN	0.29 kN	20°	0.12 m	0.75 kN	0.27 kN	0.80 kN
40°	0.07 m	0.26 kN	0.22 kN	0.34 kN	40°	0.12 m	0.69 kN	0.58 kN	0.90 kN
60°	0.07 m	0.18 kN	0.31 kN	0.35 kN	60°	0.12 m	0.45 kN	0.78 kN	0.90 kN
80°	0.05 m	0.03 kN	0.19 kN	0.19 kN	80°	0.12 m	0.14 kN	0.77 kN	0.78 kN
90°	0.05 m	0.00 kN	0.17 kN	0.17 kN	90°	0.06 m	0.00 kN	0.19 kN	0.19 kN
100°	0.05 m	-0.03 kN	0.19 kN	0.19 kN	100°	0.06 m	-0.04 kN	0.21 kN	0.21 kN
120°	0.05 m	-0.11 kN	0.18 kN	0.21 kN	120°	0.06 m	-0.12 kN	0.21 kN	0.24 kN
140°	0.05 m	-0.16 kN	0.13 kN	0.21 kN	140°	0.06 m	-0.19 kN	0.16 kN	0.24 kN
160°	0.05 m	-0.16 kN	0.06 kN	0.17 kN	160°	0.06 m	-0.20 kN	0.07 kN	0.22 kN
180°	0.13 m	-0.72 kN	0.00 kN	0.72 kN	180°	0.05 m	-0.12 kN	0.00 kN	0.12 kN
200°	0.13 m	-0.96 kN	-0.35 kN	1.02 kN	200°	0.05 m	-0.15 kN	-0.06 kN	0.16 kN
220°	0.13 m	-0.92 kN	-0.77 kN	1.20 kN	220°	0.05 m	-0.14 kN	-0.12 kN	0.18 kN
240°	0.10 m	-0.34 kN	-0.59 kN	0.68 kN	240°	0.04 m	-0.05 kN	-0.09 kN	0.10 kN
260°	0.10 m	-0.11 kN	-0.61 kN	0.62 kN	260°	0.04 m	-0.02 kN	-0.09 kN	0.09 kN
270°	0.14 m	0.00 kN	-1.09 kN	1.09 kN	270°	0.07 m	0.00 kN	-0.25 kN	0.25 kN
280°	0.14 m	0.21 kN	-1.19 kN	1.21 kN	280°	0.07 m	0.05 kN	-0.28 kN	0.28 kN
300°	0.14 m	0.67 kN	-1.16 kN	1.34 kN	300°	0.07 m	0.16 kN	-0.28 kN	0.32 kN
320°	0.14 m	1.00 kN	-0.83 kN	1.30 kN	320°	0.07 m	0.25 kN	-0.21 kN	0.33 kN
340°	0.21 m	2.40 kN	-0.87 kN	2.55 kN	340°	0.10 m	0.49 kN	-0.18 kN	0.52 kN

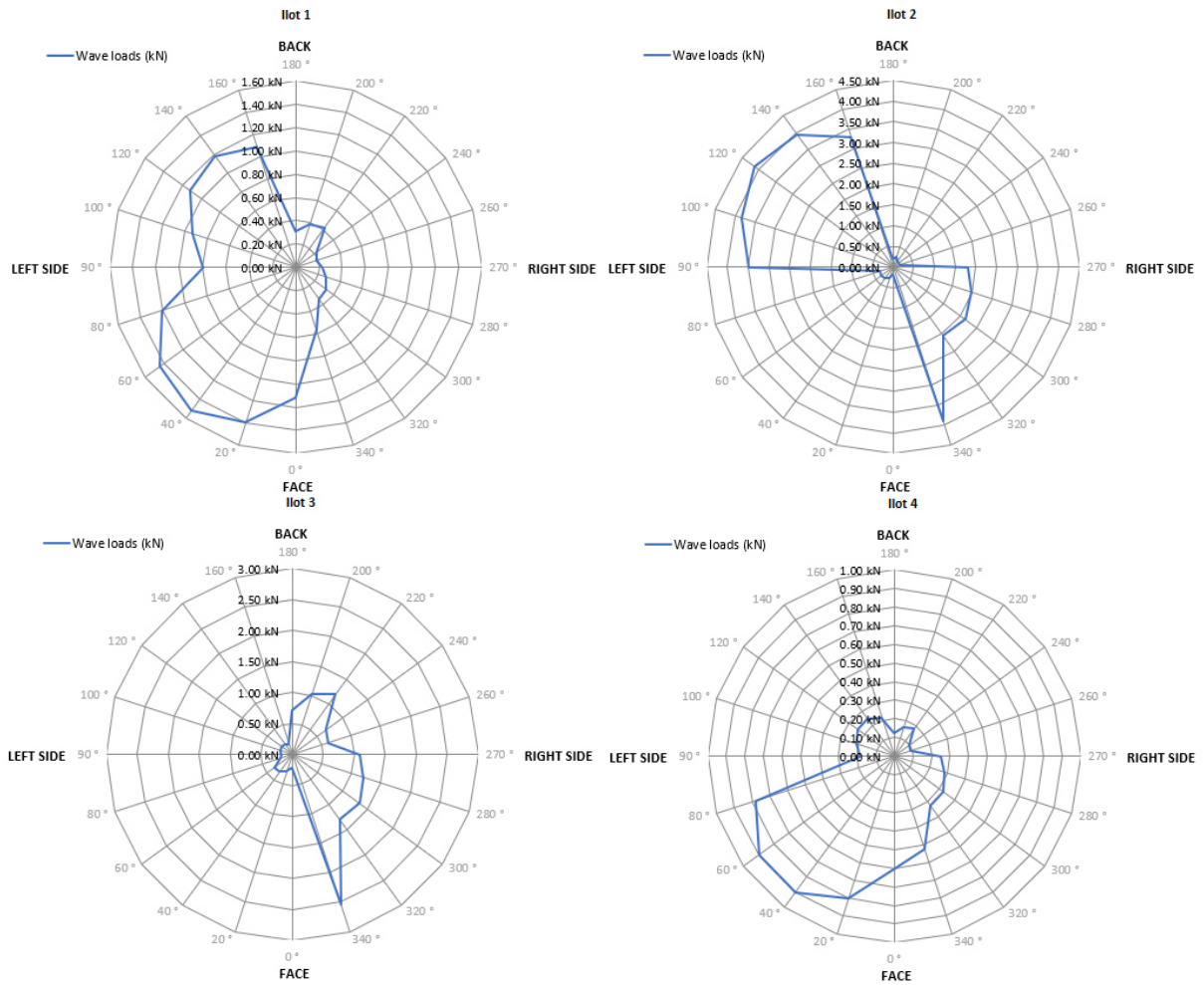


Figure 5 : Diagramme des efforts de vagues (Résultante horizontale | Fxy | )

## 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

$\rho$  = masse volumique de l'eau = 1 000 kg/m<sup>3</sup>

$C_n$  = 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

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

$\beta$  = direction angulaire de l'écoulement

## 2.4.2. Efforts de courant

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

Tableau 4 : Effort de courant par direction

Ilot 1					Ilot 2				
Water current direction	Current speed	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>	Water current direction	Current speed	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>
0°	1.00 m/s	66.92 kN	0.00 kN	66.92 kN	0°	1.00 m/s	44.06 kN	0.00 kN	44.06 kN
20°	1.00 m/s	67.36 kN	24.52 kN	71.68 kN	20°	1.00 m/s	46.51 kN	16.93 kN	49.49 kN
40°	1.00 m/s	56.39 kN	47.32 kN	73.61 kN	40°	1.00 m/s	40.52 kN	34.00 kN	52.90 kN
60°	1.00 m/s	36.23 kN	62.76 kN	72.47 kN	60°	1.00 m/s	26.93 kN	46.65 kN	53.86 kN
80°	1.00 m/s	11.88 kN	67.35 kN	68.39 kN	80°	1.00 m/s	9.08 kN	51.48 kN	52.27 kN
90°	1.00 m/s	0.00 kN	65.40 kN	65.40 kN	90°	1.00 m/s	0.00 kN	50.57 kN	50.57 kN
100°	1.00 m/s	-11.88 kN	67.35 kN	68.39 kN	100°	1.00 m/s	-9.08 kN	51.48 kN	52.27 kN
120°	1.00 m/s	-36.23 kN	62.76 kN	72.47 kN	120°	1.00 m/s	-26.93 kN	46.65 kN	53.86 kN
140°	1.00 m/s	-56.39 kN	47.32 kN	73.61 kN	140°	1.00 m/s	-40.52 kN	34.00 kN	52.90 kN
160°	1.00 m/s	-67.36 kN	24.52 kN	71.68 kN	160°	1.00 m/s	-46.51 kN	16.93 kN	49.49 kN
180°	1.00 m/s	-66.92 kN	0.00 kN	66.92 kN	180°	1.00 m/s	-44.06 kN	0.00 kN	44.06 kN
200°	1.00 m/s	-67.36 kN	-24.52 kN	71.68 kN	200°	1.00 m/s	-46.51 kN	-16.93 kN	49.49 kN
220°	1.00 m/s	-56.39 kN	-47.32 kN	73.61 kN	220°	1.00 m/s	-40.52 kN	-34.00 kN	52.90 kN
240°	1.00 m/s	-36.23 kN	-62.76 kN	72.47 kN	240°	1.00 m/s	-26.93 kN	-46.65 kN	53.86 kN
260°	1.00 m/s	-11.88 kN	-67.35 kN	68.39 kN	260°	1.00 m/s	-9.08 kN	-51.48 kN	52.27 kN
270°	1.00 m/s	0.00 kN	-65.40 kN	65.40 kN	270°	1.00 m/s	0.00 kN	-50.57 kN	50.57 kN
280°	1.00 m/s	11.88 kN	-67.35 kN	68.39 kN	280°	1.00 m/s	9.08 kN	-51.48 kN	52.27 kN
300°	1.00 m/s	36.23 kN	-62.76 kN	72.47 kN	300°	1.00 m/s	26.93 kN	-46.65 kN	53.86 kN
320°	1.00 m/s	56.39 kN	-47.32 kN	73.61 kN	320°	1.00 m/s	40.52 kN	-34.00 kN	52.90 kN
340°	1.00 m/s	67.36 kN	-24.52 kN	71.68 kN	340°	1.00 m/s	46.51 kN	-16.93 kN	49.49 kN

Ilot 3					Ilot 4				
Water current direction	Current speed	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>	Water current direction	Current speed	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>
0°	1.00 m/s	18.92 kN	0.00 kN	18.92 kN	0°	1.00 m/s	16.50 kN	0.00 kN	16.50 kN
20°	1.00 m/s	20.74 kN	7.55 kN	22.07 kN	20°	1.00 m/s	17.82 kN	6.48 kN	18.96 kN
40°	1.00 m/s	18.33 kN	15.38 kN	23.93 kN	40°	1.00 m/s	15.49 kN	13.00 kN	20.22 kN
60°	1.00 m/s	12.15 kN	21.04 kN	24.30 kN	60°	1.00 m/s	10.06 kN	17.43 kN	20.13 kN
80°	1.00 m/s	4.01 kN	22.76 kN	23.11 kN	80°	1.00 m/s	3.25 kN	18.42 kN	18.70 kN
90°	1.00 m/s	0.00 kN	21.98 kN	21.98 kN	90°	1.00 m/s	0.00 kN	17.54 kN	17.54 kN
100°	1.00 m/s	-4.01 kN	22.76 kN	23.11 kN	100°	1.00 m/s	-3.25 kN	18.42 kN	18.70 kN
120°	1.00 m/s	-12.15 kN	21.04 kN	24.30 kN	120°	1.00 m/s	-10.06 kN	17.43 kN	20.13 kN
140°	1.00 m/s	-18.33 kN	15.38 kN	23.93 kN	140°	1.00 m/s	-15.49 kN	13.00 kN	20.22 kN
160°	1.00 m/s	-20.74 kN	7.55 kN	22.07 kN	160°	1.00 m/s	-17.82 kN	6.48 kN	18.96 kN
180°	1.00 m/s	-18.92 kN	0.00 kN	18.92 kN	180°	1.00 m/s	-16.50 kN	0.00 kN	16.50 kN
200°	1.00 m/s	-20.74 kN	-7.55 kN	22.07 kN	200°	1.00 m/s	-17.82 kN	-6.48 kN	18.96 kN
220°	1.00 m/s	-18.33 kN	-15.38 kN	23.93 kN	220°	1.00 m/s	-15.49 kN	-13.00 kN	20.22 kN
240°	1.00 m/s	-12.15 kN	-21.04 kN	24.30 kN	240°	1.00 m/s	-10.06 kN	-17.43 kN	20.13 kN
260°	1.00 m/s	-4.01 kN	-22.76 kN	23.11 kN	260°	1.00 m/s	-3.25 kN	-18.42 kN	18.70 kN
270°	1.00 m/s	0.00 kN	-21.98 kN	21.98 kN	270°	1.00 m/s	0.00 kN	-17.54 kN	17.54 kN
280°	1.00 m/s	4.01 kN	-22.76 kN	23.11 kN	280°	1.00 m/s	3.25 kN	-18.42 kN	18.70 kN
300°	1.00 m/s	12.15 kN	-21.04 kN	24.30 kN	300°	1.00 m/s	10.06 kN	-17.43 kN	20.13 kN
320°	1.00 m/s	18.33 kN	-15.38 kN	23.93 kN	320°	1.00 m/s	15.49 kN	-13.00 kN	20.22 kN
340°	1.00 m/s	20.74 kN	-7.55 kN	22.07 kN	340°	1.00 m/s	17.82 kN	-6.48 kN	18.96 kN

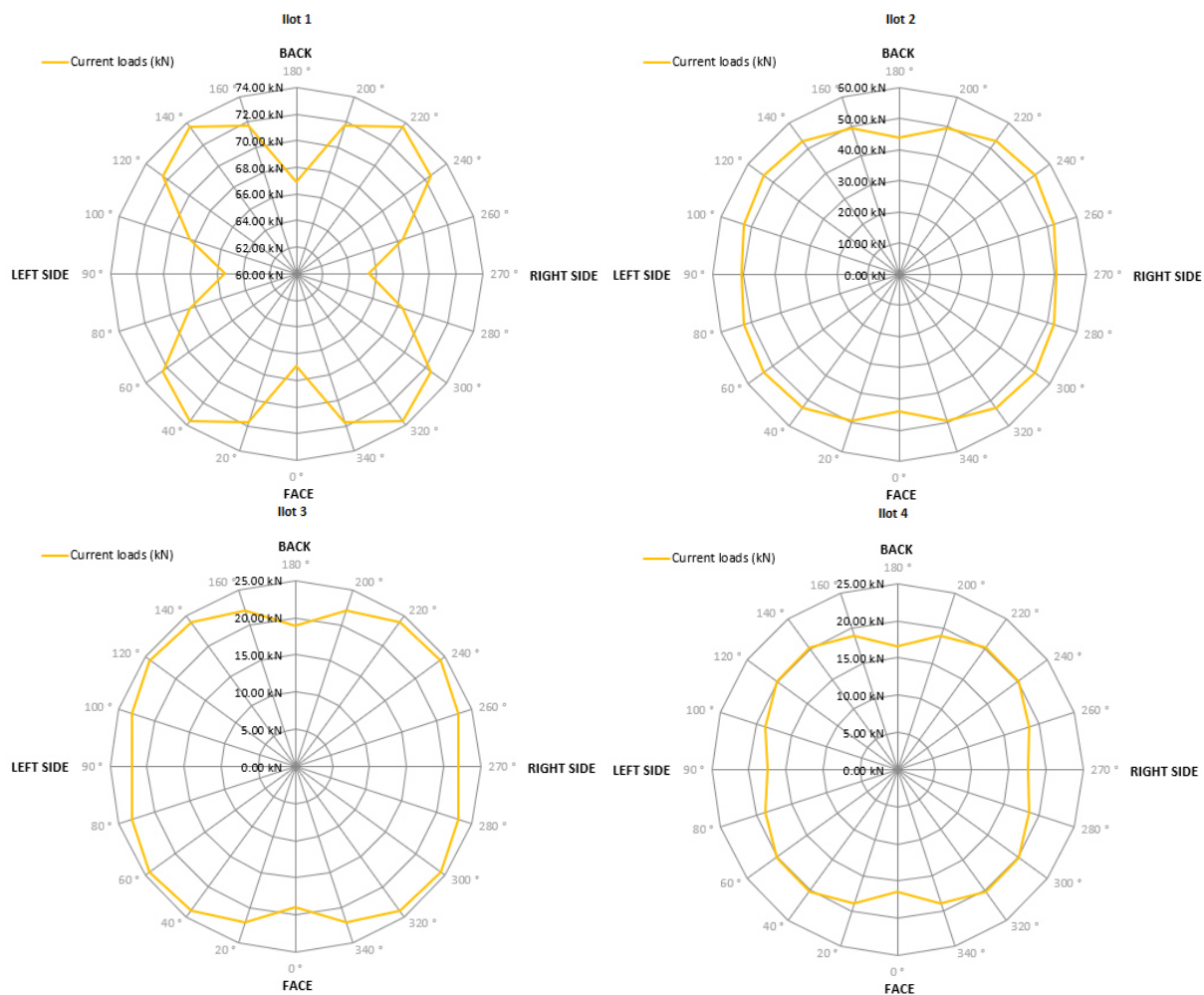


Figure 6 : Diagramme des efforts de courant (Résultante horizontale | Fxy | )



## 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 5 : Efforts environnementaux par direction

Ilot 1				Ilot 2			
Wind direction	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>	Wind direction	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>
0°	353.51 kN	-0.01 kN	353.51 kN	0°	237.46 kN	-0.01 kN	237.46 kN
20°	354.15 kN	115.16 kN	372.41 kN	20°	239.98 kN	80.39 kN	253.08 kN
40°	240.39 kN	138.46 kN	277.42 kN	40°	168.78 kN	97.59 kN	194.96 kN
60°	219.80 kN	176.40 kN	281.83 kN	60°	155.10 kN	126.42 kN	200.10 kN
80°	194.93 kN	180.93 kN	265.95 kN	80°	137.13 kN	131.27 kN	189.83 kN
90°	1.97 kN	178.58 kN	178.59 kN	90°	1.06 kN	133.53 kN	133.54 kN
100°	-311.41 kN	180.66 kN	360.02 kN	100°	-218.18 kN	134.72 kN	256.42 kN
120°	-336.17 kN	176.12 kN	379.51 kN	120°	-237.43 kN	129.70 kN	270.55 kN
140°	-356.66 kN	154.77 kN	388.79 kN	140°	-251.98 kN	111.59 kN	275.58 kN
160°	-677.16 kN	131.59 kN	689.82 kN	160°	-454.44 kN	93.10 kN	463.88 kN
180°	-676.00 kN	0.11 kN	676.00 kN	180°	-449.09 kN	0.07 kN	449.09 kN
200°	-676.50 kN	-131.35 kN	689.13 kN	200°	-451.60 kN	-53.79 kN	454.79 kN
220°	-356.08 kN	-154.29 kN	388.07 kN	220°	-142.79 kN	-70.89 kN	159.41 kN
240°	-335.72 kN	-169.65 kN	376.15 kN	240°	-129.15 kN	-85.74 kN	155.02 kN
260°	-311.28 kN	-174.24 kN	356.73 kN	260°	-111.24 kN	-90.58 kN	143.46 kN
270°	0.96 kN	-120.70 kN	120.70 kN	270°	0.52 kN	-91.32 kN	91.32 kN
280°	101.52 kN	-122.69 kN	159.24 kN	280°	72.14 kN	-92.37 kN	117.21 kN
300°	125.99 kN	-118.11 kN	172.69 kN	300°	90.72 kN	-87.44 kN	126.00 kN
320°	146.24 kN	-91.72 kN	172.62 kN	320°	104.81 kN	-66.37 kN	124.06 kN
340°	353.37 kN	-68.89 kN	360.02 kN	340°	243.37 kN	-49.31 kN	248.32 kN

Ilot 3				Ilot 4			
Wind direction	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>	Wind direction	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>horizontal</sub>
0°	92.89 kN	0.00 kN	92.89 kN	0°	77.50 kN	0.00 kN	77.50 kN
20°	94.77 kN	30.85 kN	99.67 kN	20°	78.96 kN	25.01 kN	82.83 kN
40°	67.79 kN	38.80 kN	78.11 kN	40°	55.85 kN	31.83 kN	64.28 kN
60°	61.52 kN	51.05 kN	79.94 kN	60°	50.19 kN	41.70 kN	65.25 kN
80°	53.24 kN	52.65 kN	74.88 kN	80°	43.06 kN	42.68 kN	60.62 kN
90°	0.18 kN	51.85 kN	51.85 kN	90°	0.13 kN	41.21 kN	41.21 kN
100°	-87.75 kN	52.65 kN	102.33 kN	100°	-72.29 kN	42.11 kN	83.66 kN
120°	-95.96 kN	50.93 kN	108.63 kN	120°	-79.19 kN	41.13 kN	89.24 kN
140°	-102.20 kN	43.88 kN	111.22 kN	140°	-84.68 kN	35.78 kN	91.93 kN
160°	-193.94 kN	35.97 kN	197.25 kN	160°	-167.67 kN	29.19 kN	170.19 kN
180°	-192.68 kN	0.02 kN	192.68 kN	180°	-166.28 kN	0.02 kN	166.28 kN
200°	-194.74 kN	-36.26 kN	198.08 kN	200°	-167.62 kN	-29.17 kN	170.14 kN
220°	-102.95 kN	-44.52 kN	112.17 kN	220°	-84.64 kN	-35.74 kN	91.87 kN
240°	-96.19 kN	-50.00 kN	108.41 kN	240°	-79.12 kN	-40.15 kN	88.73 kN
260°	-87.82 kN	-51.73 kN	101.93 kN	260°	-72.27 kN	-41.14 kN	83.16 kN
270°	0.09 kN	-37.62 kN	37.62 kN	270°	0.06 kN	-29.29 kN	29.29 kN
280°	28.33 kN	-38.51 kN	47.81 kN	280°	22.74 kN	-30.21 kN	37.81 kN
300°	36.92 kN	-36.75 kN	52.10 kN	300°	29.67 kN	-29.22 kN	41.64 kN
320°	43.44 kN	-27.59 kN	51.46 kN	320°	35.18 kN	-22.15 kN	41.57 kN
340°	96.90 kN	-19.79 kN	98.90 kN	340°	78.70 kN	-15.61 kN	80.23 kN

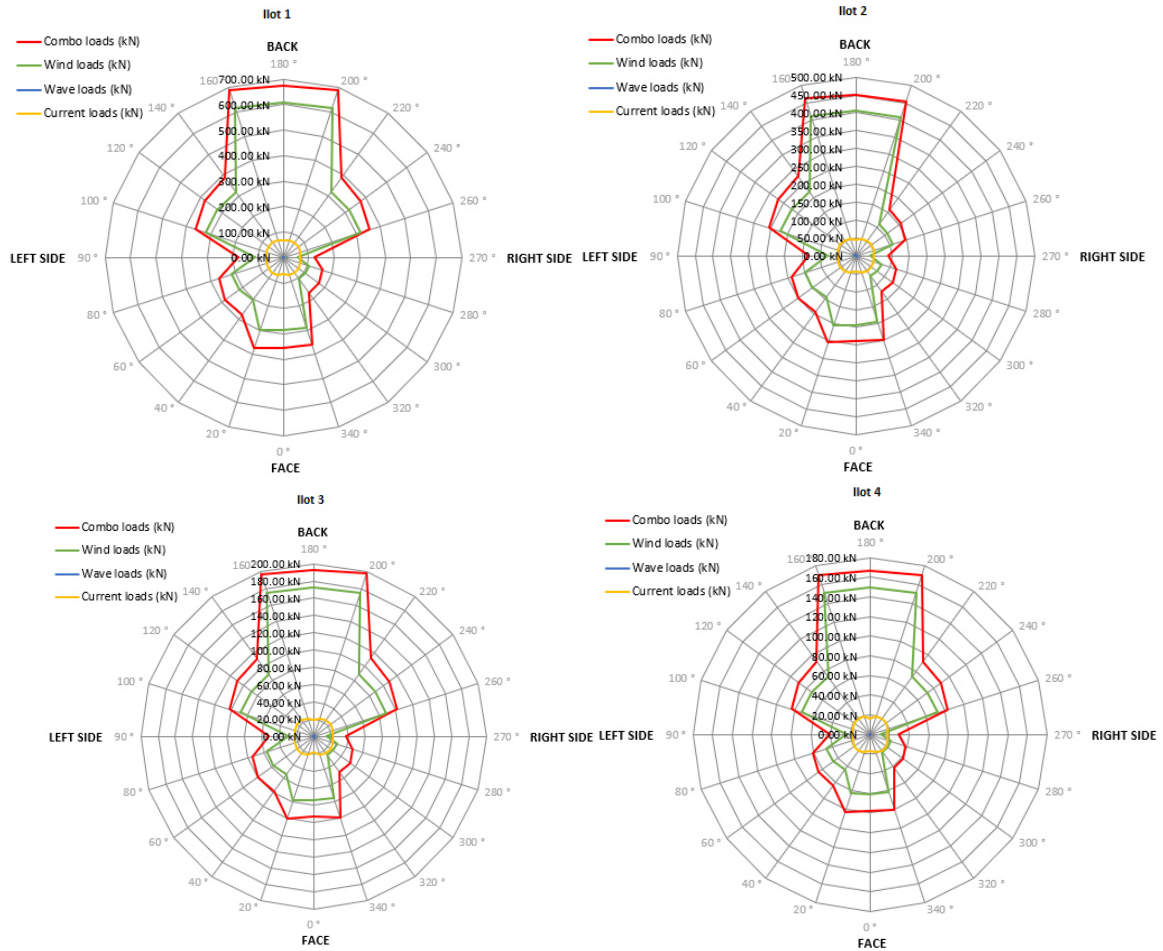


Figure 7 : Diagramme des efforts environnementaux (Résultante horizontale | Fxy | )

### 3.2. Efforts par côté

Pour simplifier, Ciel et Terre considère l'effort maximum pour chaque côté de l'îlot, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6 : 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.

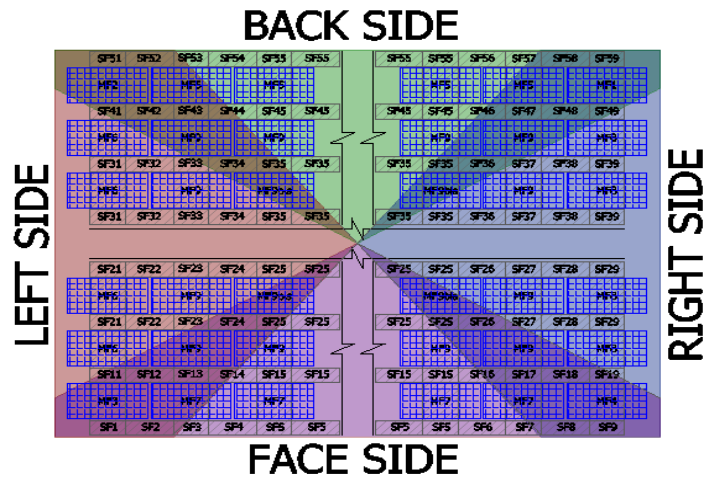


Figure 8 : Diagramme de considération des efforts par côté

Pour ce projet, les efforts suivants sont obtenus :

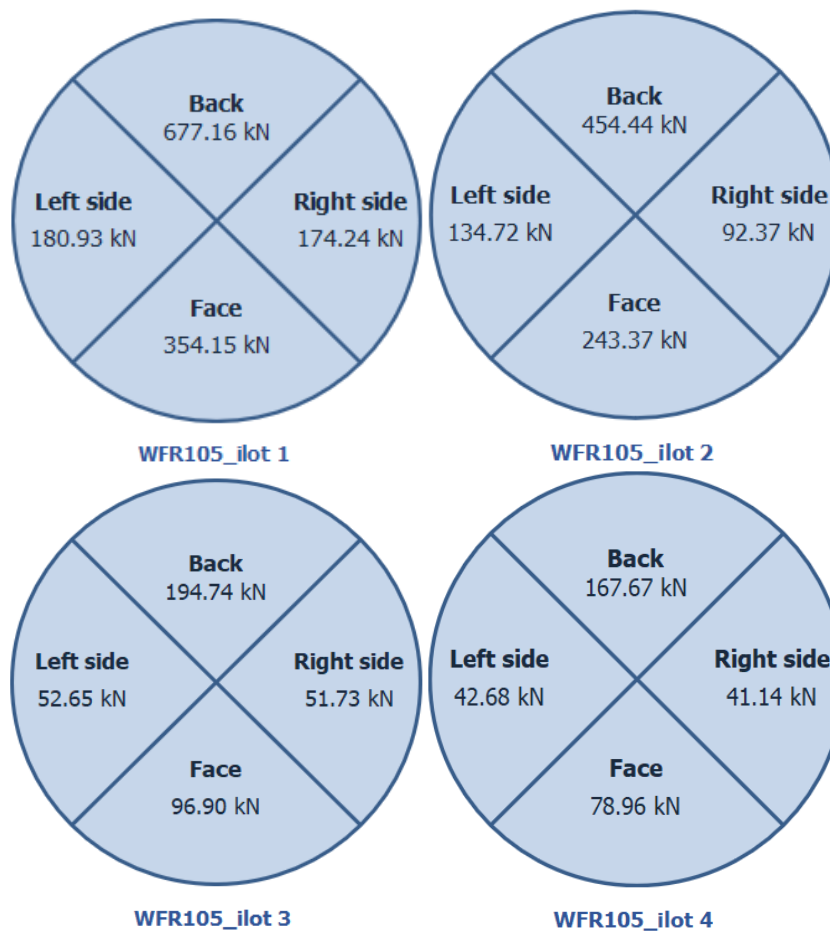


Figure 9 : Efforts environnementaux par côté

## 4 | METHODE D'ANCRAGE

### 4.1 Design de l'ilot

Le projet est composé de 4 îlot.

L'îlot #1 est composé de 6006 panneaux, plus un extra ring sans panneau afin d'améliorer la flottabilité. 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°. Tous les panneaux sont orientés vers la même direction (165°). La surface de l'ilot est d'environ 24 077 m<sup>2</sup>.

L'îlot #2 est composé de 4056 panneaux, plus un extra ring sans panneau afin d'améliorer la flottabilité. 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°. Tous les panneaux sont orientés vers la même direction (167°). La surface de l'ilot est d'environ 16 341 m<sup>2</sup>.

L'îlot #3 est composé de 1404 panneaux, plus un extra ring sans panneau afin d'améliorer la flottabilité. 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°. Tous les panneaux sont orientés vers la même direction (165°). La surface de l'ilot est d'environ 5 732 m<sup>2</sup>.

L'îlot #4 est composé de 1092 panneaux, plus un extra ring sans panneau afin d'améliorer la flottabilité. 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°. Tous les panneaux sont orientés vers la même direction (165°). La surface de l'ilot est d'environ 4 523 m<sup>2</sup>.

Les dimensions des panneaux sont 2256mm \* 1133mm.

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.

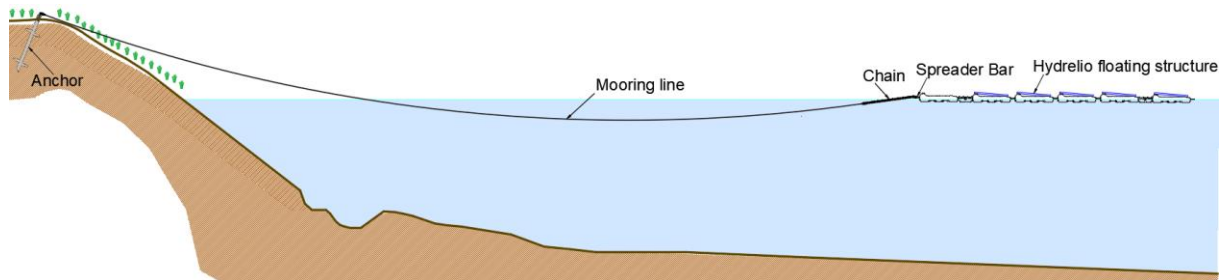


Figure 10 : Exemple d'ancrage en berge

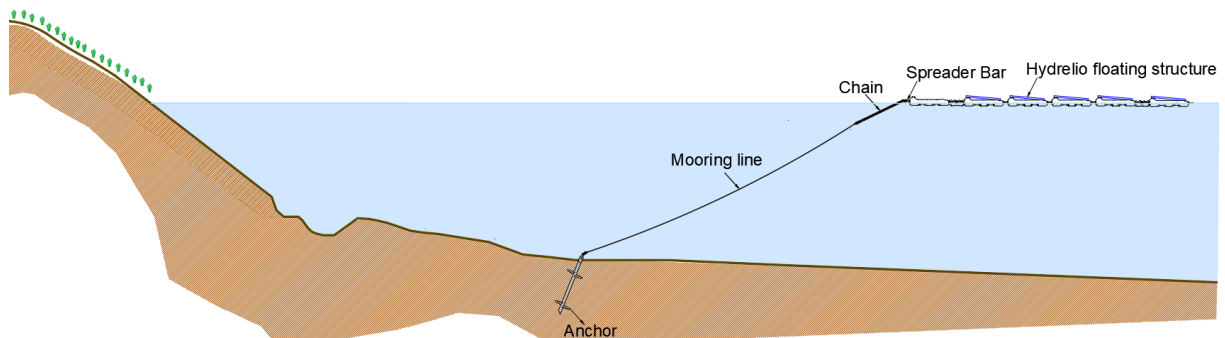


Figure 11 : Exemple d'ancrage au fond

## 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.

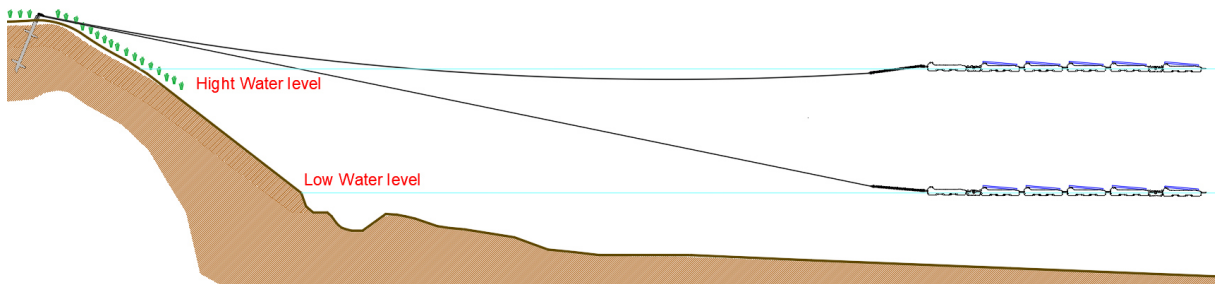


Figure 12 : Exemple d'un ancrage en berge à niveau d'eau haut et bas

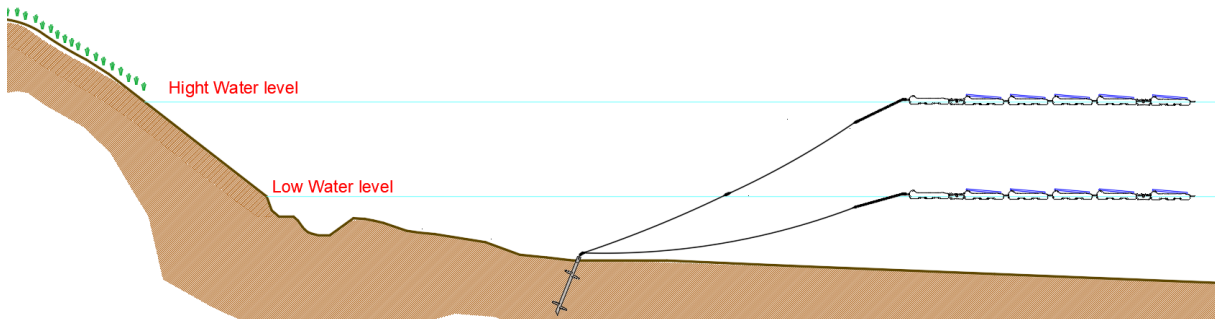


Figure 13 : Exemple d'un ancrage au fond à niveau d'eau haut et bas



### 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 Hydrelio<sup>®</sup> grâce à deux trous à ses extrémités, et à la ligne d'ancrage grâce au trou central, comme illustré sur la figure suivante.

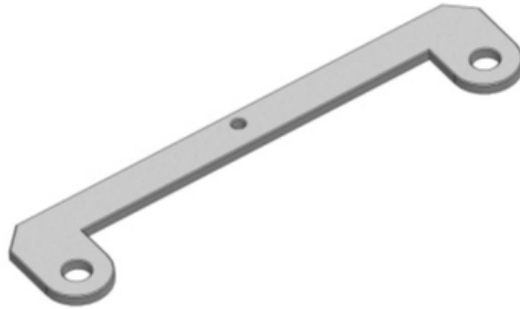


Figure 14 : barre d'ancrage

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.

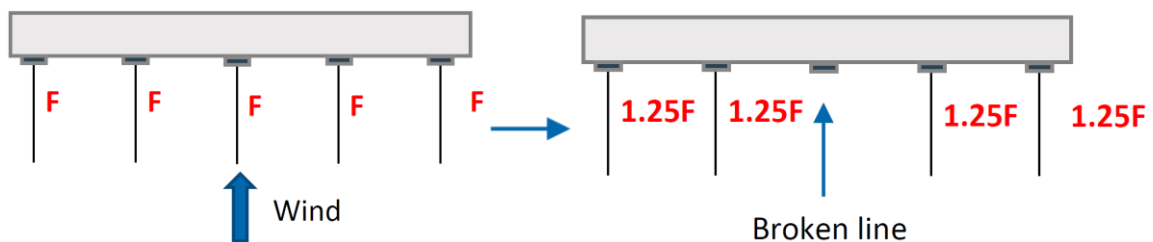


Figure 15 : Cas accidentel avec des lignes élastiques

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 7 : 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** permet 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 8 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  $\alpha$  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  $\beta$  entre les deux lignes d'ancrages connectées au même point d'ancrage.

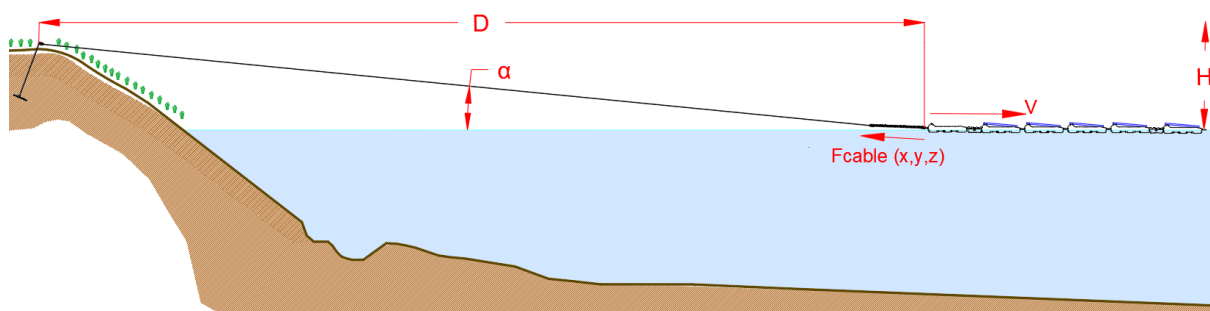


Figure 16 : Schéma d'un ancrage en berge

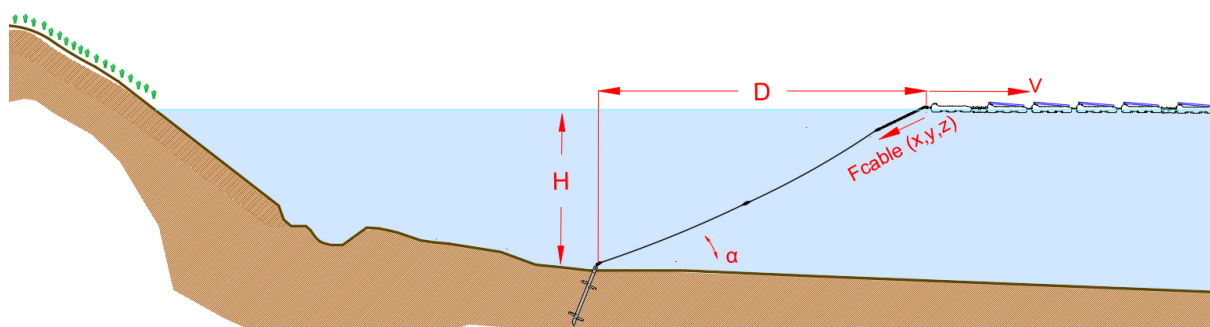
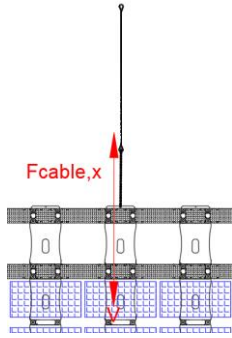
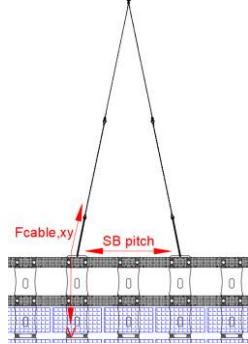


Figure 17 : Schéma d'un ancrage au fond

Tableau 8 : 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	
$\alpha$	$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{H}{D}\right)$	
$\beta$	-	$\beta = 2 \times \sin^{-1}\left(\frac{\text{Spreader bar pitch}}{2 \times D}\right)$
<b>Effort par ligne d'ancrage</b>		
$F_{cable,x}$	$F_{cable,x} = V$	
$F_{cable,y}$	$F_{cable,y} = 0$	$F_{cable,y} = V \times \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)$
$F_{cable,xy}$	$F_{cable,xy} = V$	$F_{cable,xy} = \frac{V}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}$
$F_{cable,z}$	$F_{cable,z} = F_{cable,xy} \times \tan(\alpha)$	
$F_{cable,xyz}$	$F_{cable,xyz} = \frac{F_{cable,xy}}{\cos(\alpha)}$	



## 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.

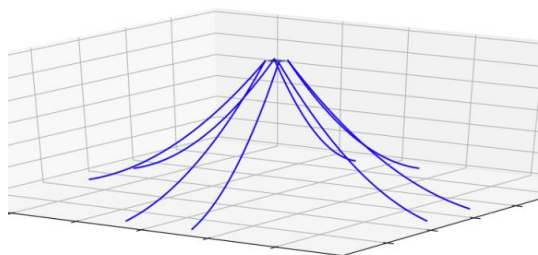


Figure 18 : Lignes d'amarrage caténaires

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 plus 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 réalisé 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.

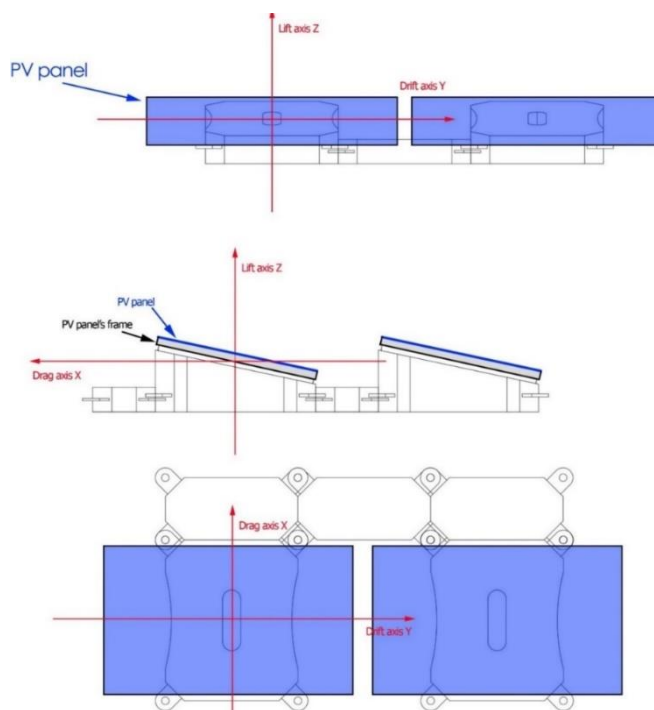


Figure 19 : Repère de référence (x, y, z)

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

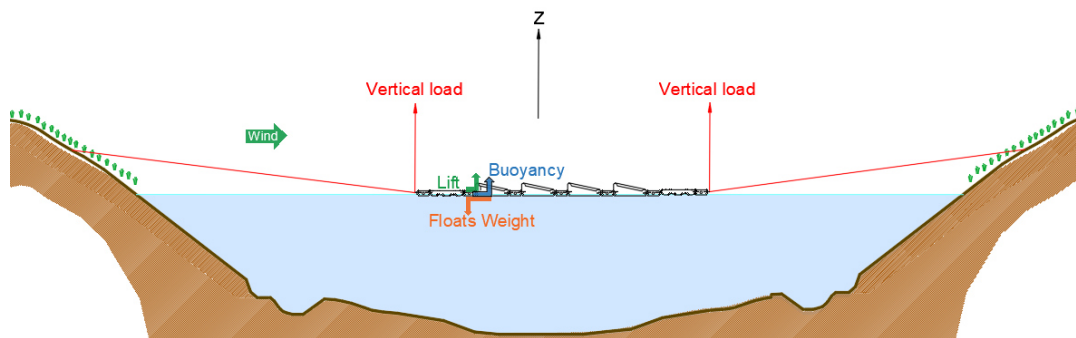


Figure 20 : Schéma des efforts verticaux appliqués dans le cas d'un ancrage en berge

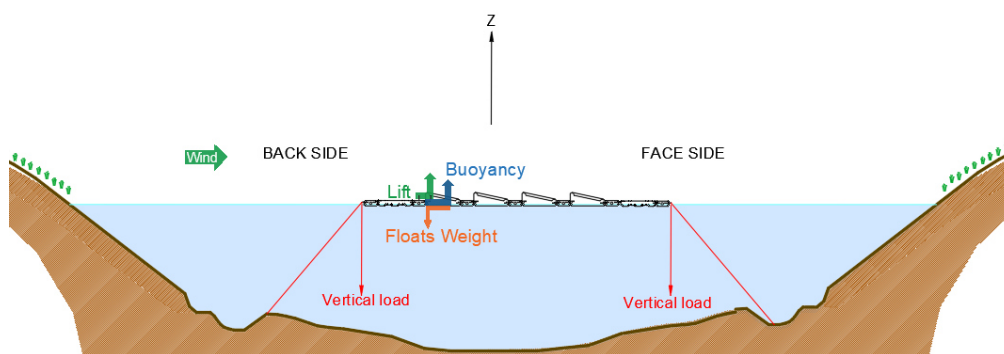


Figure 21 : Schéma des efforts verticaux appliqués dans le cas d'un ancrage au fond

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 et enfin un calcul *as built* sera effectué.

### 6.1 Hypothèses

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

Tableau 9 : Hypothèses d'ancrage

Hypothèses d'ancrage		BACK	LEFT	RIGHT	FACE	
Ancrage au fond ou en berge	Ilot 1	En berge	Au fond	En berge	En berge	
	Ilot 2	En berge	Au fond	Au fond	En berge	
	Ilot 3	Au fond	En berge	Au fond	En berge	
	Ilot 4	En berge	En berge	Au fond	Au fond	
Ancrage simple ou mutualisé	Ilot 1	Simple	Simple	Simple	Mutualisé	
	Ilot 2	Simple	Mutualisé	Mutualisé	Mutualisé	
	Ilot 3	Simple	Mutualisé	Mutualisé	Mutualisé	
	Ilot 4	Mutualisé	Mutualisé	Mutualisé	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

NB : Dans les calculs, les points d'ancrage en berge ont été considérés à l'élévation +59.5m NGF. Leur positionnement sur le plan est approximatif étant donné que les bords du lacs n'ont pas été sondés. Une nouvelle bathymétrie sera nécessaire pour l'étude détaillée.



## 6.2 Résultats principaux

Le tableau ci-dessous résume les résultats des calculs :

Tableau 10 : Résultats des calculs d'ancrage

Ilot 1	BACK	LEFT	RIGHT	FACE	Total
Efforts environnementaux	677.16 kN	180.93 kN	174.24 kN	354.15 kN	
Nombre de barre d'ancrage	70	26	27	39	162
Nombre d'ancre	70	26	27	21	144
Distance D	20 m	25 m	20 m	20 m	
Effort max dans la ligne	10.65 kN	7.95 kN	7.11 kN	10.02 kN	

Ilot 2	BACK	LEFT	RIGHT	FACE	Total
Efforts environnementaux	454.44 kN	134.72 kN	92.37 kN	243.37 kN	
Nombre de barre d'ancrage	42	26	20	26	114
Nombre d'ancre	42	13	10	13	78
Distance D	20 m	20 m	20 m	20 m	
Effort max dans la ligne	11.92 kN	6.11 kN	5.44 kN	10.33 kN	

Ilot 3	BACK	LEFT	RIGHT	FACE	Total
Efforts environnementaux	194.74 kN	52.65 kN	51.73 kN	96.90 kN	
Nombre de barre d'ancrage	20	11	12	14	57
Nombre d'ancre	20	6	7	7	40
Distance D	20 m	20 m	20 m	20 m	
Effort max dans la ligne	11.35 kN	5.33 kN	5.08 kN	7.67 kN	

Ilot 4	BACK	LEFT	RIGHT	FACE	Total
Efforts environnementaux	167.67 kN	42.68 kN	41.14 kN	78.96 kN	
Nombre de barre d'ancrage	19	9	10	11	49
Nombre d'ancre	10	5	6	11	32
Distance D	20 m	20 m	20 m	20 m	
Effort max dans la ligne	9.74 kN	5.28 kN	4.85 kN	8.37 kN	

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

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

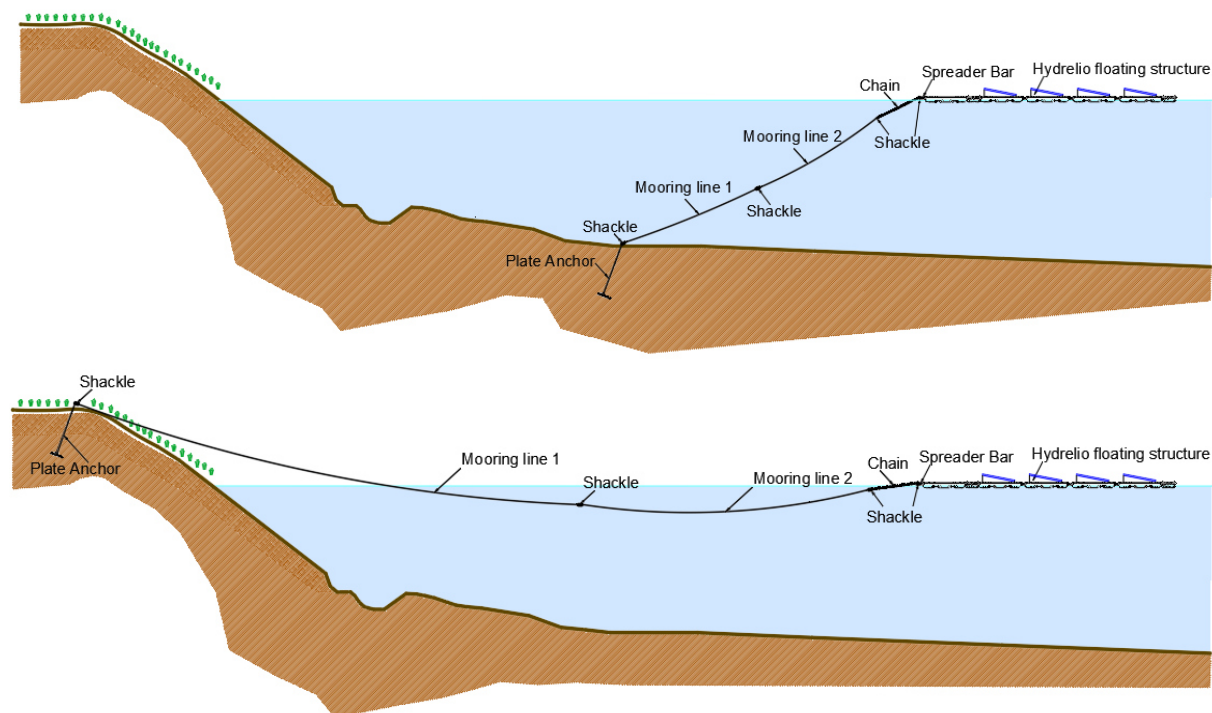


Figure 22 : Schéma du système d'ancrage usuel pour ARTINS

## 6.3 Nomenclature

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

Tableau 11: Nomenclature du système d'ancrage

Composant	Ilot
Point d'ancrage	294 pcs
Barre d'ancrage	382 pcs
Câble acier (SWL > 11.98 kN)	3 820 m
Cordage polyester (SWL > 11.98 kN) Elongation $\Delta L \geq 1\text{m}$ à l'effort de design dans la ligne	5 730 m
Chaine (SWL > 11.98 kN)	573 m
Manille (SWL > 11.98 kN)	1528 pcs

## 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 12 : Mouvements maximums de l'îlot

Direction du mouvement	Ilot 1	Ilot 2	Ilot 3	Ilot 4
Mouvement vers l'avant	1.39 m	1.39 m	2.17 m	1.39 m
Mouvement vers la gauche	1.39 m	2.17 m	2.17 m	2.17 m
Mouvement vers l'arrière	1.42 m	1.39 m	1.42 m	2.17 m
Mouvement vers la droite	1.94 m	2.17 m	1.39 m	1.39 m

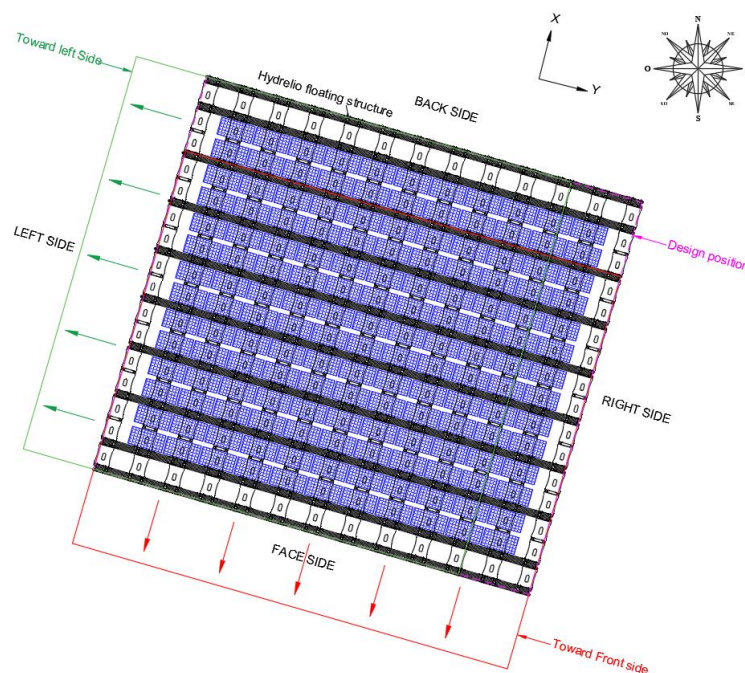



Figure 23 : Schéma des mouvements de l'îlot

# Annexe 1 : Note de calcul de la pression dynamique



	<b>Note de calcul</b> <b>Pression dynamique</b>		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
<b>CONFIDENTIEL</b>	Client: WPD	Date: 30/06/2021		
	Code projet: WFR105_ ARTINS	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 au besoin 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

	<b>Note de calcul</b> <b>Pression dynamique</b>		<b>Écrit par:</b> JH	
			<b>Approuvé par:</b>	
<b>CONFIDENTIEL</b>	<b>Client:</b> WPD	<b>Date:</b> 30/06/2021		
	<b>Code projet:</b> WFR105_ ARTINS	<b>Revision:</b> Rev2		

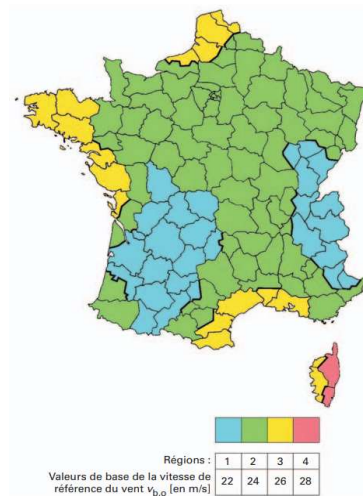
## 1. VENT DE REFERENCE

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:

<b>Departement</b>	41_LOIR-ET-CHER
<b>Municipalité</b>	ARTINS



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

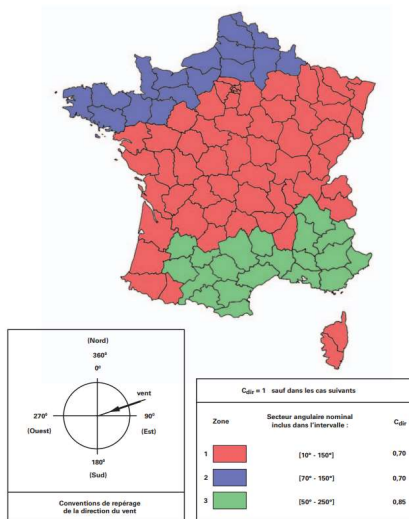
$C_{dir}$  is the directional factor, see Note 2.

$C_{season}$  is the season factor, see Note 3.

	<b>Note de calcul</b> <b>Pression dynamique</b>		<b>Ecrit par:</b> JH	
			<b>Approuvé par:</b>	
<b>CONFIDENTIEL</b>	<b>Client:</b> WPD	<b>Date:</b> 30/06/2021		
	<b>Code projet:</b> WFR105_ ARTINS	<b>Revision:</b> 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.

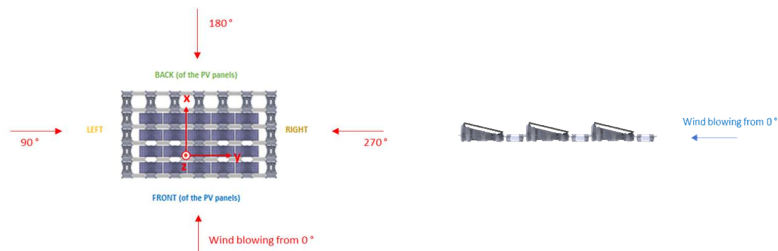
L'orientation de l'îlot est:

	Repère selon l'annexe nationale (0° = North)	Repère C&T (0° = avant des panneaux)
Orientation de l'îlot	165°	0°


Tous les îlots sont orienté à 165°, excepté l'îlot 2, orienté à 167°.

Les résultats suivants sont pour une orientation de 165° mais les résultats pour l'îlot 2 (167°) sont disponible à la fin.

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°.

	<b>Note de calcul</b> <b>Pression dynamique</b>		Écrit par: JH	
			Approuvé par:	
	Client: WPD	Date: 30/06/2021		
<b>CONFIDENTIEL</b>	Code projet: WFR105_ ARTINS	Revision: Rev2		

Ainsi, on obtient:

Direction de vent (0°= avant des panneaux)	Direction de vent (0°=Nord)	C <sub>dir</sub>	Direction de vent (0°= avant des panneaux)	Direction de vent (0°=Nord)	C <sub>dir</sub>
0°	165°	1.00	180°	345°	1.00
20°	185°	1.00	200°	5°	1.00
40°	205°	1.00	220°	25°	1.00
60°	225°	1.00	240°	45°	0.70
80°	245°	1.00	260°	65°	0.70
90°	255°	1.00	270°	75°	0.70
100°	265°	1.00	280°	85°	0.70
120°	285°	1.00	300°	105°	0.70
140°	305°	1.00	320°	125°	0.70
160°	325°	1.00	340°	145°	1.00

## 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 exceedance 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.

	<b>Note de calcul</b> <b>Pression dynamique</b>		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
	Client: WPD	Date: 30/06/2021		
<b>CONFIDENTIEL</b>	Code projet: WFR105_ ARTINS	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'excedance p de:

Probabilité annuelle d'excedance (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'excedance durant la durée de vie de la centrale.

La probabilité d'excedance 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'excedance 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:

<i>T/N</i>	1	2	5	10	20	50	100
<i>E</i>	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'excedance durant la durée de vie de la centrale est :

$$E = 0.393$$

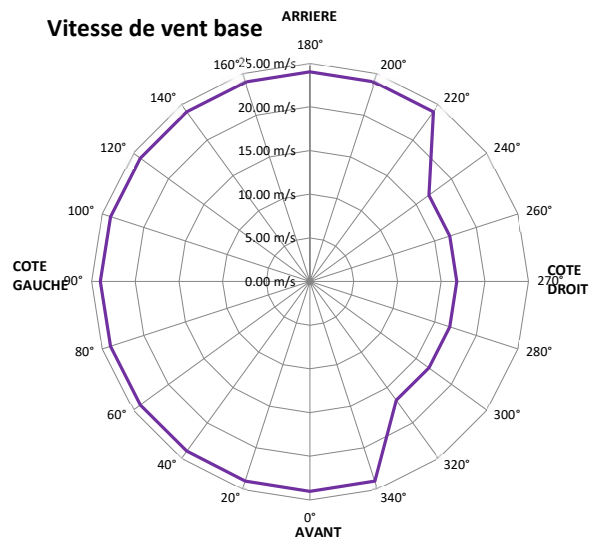



	<b>Note de calcul</b> <b>Pression dynamique</b>		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
<b>CONFIDENTIEL</b>	Client: WPD	Date: 30/06/2021		
	Code projet: WFR105_ ARTINS	Revision:	Rev2	

## 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	0.70	1.00	1.00	16.80 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	1.00	1.00	1.00	24.00 m/s



	<b>Note de calcul</b> <b>Pression dynamique</b>		<b>Écrit par:</b> JH	
			<b>Approuvé par:</b>	
<b>CONFIDENTIEL</b>	<b>Client:</b> WPD	<b>Date:</b> 30/06/2021		
	<b>Code projet:</b> WFR105_ ARTINS	<b>Revision:</b> 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)

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

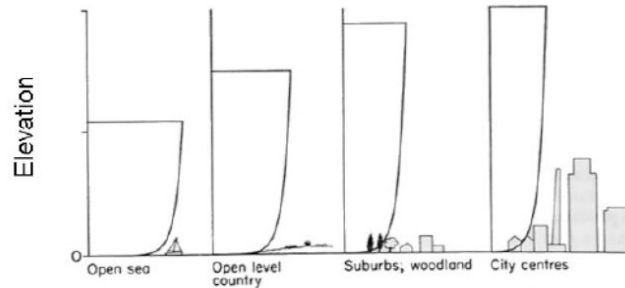
where:

$c_r(z)$  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 du 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

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

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

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.

	<b>Note de calcul</b> <b>Pression dynamique</b>		<b>Écrit par:</b> JH	
			<b>Approuvé par:</b>	
<b>CONFIDENTIEL</b>	<b>Client:</b> WPD	<b>Date:</b> 30/06/2021		
	<b>Code projet:</b> WFR105_ ARTINS	<b>Revision:</b> 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

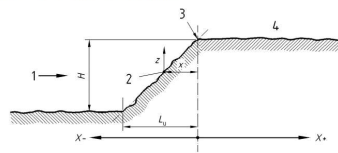
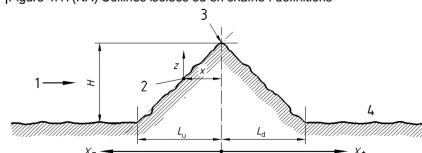


Figure 4.17(NA) Collines isolées ou en chaîne : définitions



c) Le coefficient d'orographie  $c_o(z) = v_m(z) / v_m(z)$  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  $|X| < k_{rod}L$ , il est défini comme suit :

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

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

où :

- $S_{max}$  est un coefficient donné dans le tableau 4.7(NA) en fonction de la forme de l'obstacle et du rapport  $H/L$
- $\Phi$  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
- $\alpha$  et  $k_{rod}$  sont des coefficients définis dans le tableau 4.7(NA)


Forme de l'obstacle	$S_{max}$	$\alpha$	$k_{rod}$	
			$X < 0$	$X > 0$
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.

	<b>Note de calcul Pression dynamique</b>		Écrit par: JH	
			Approuvé par:	
<b>CONFIDENTIEL</b>	Client: WPD	Date: 30/06/2021		
	Code projet: WFR105_ ARTINS	Revision:	Rev2	

D'après ces définitions, on obtient :

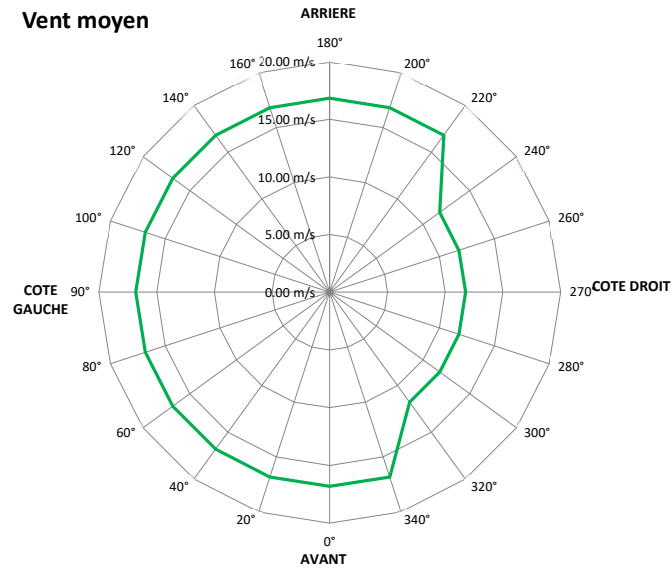
Direction de vent	$\phi$	X	Type	$S_{max}$	$\alpha$	$K_{red}$	$C_o (0.5)$
0°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
20°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
40°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
60°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
80°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
90°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
100°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
120°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
140°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
160°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
180°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
200°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
220°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
240°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
260°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
270°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
280°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
300°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
320°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00
340°	#DIV/0!	0.00 m	0	#N/A	#N/A	#N/A	1.00

	<b>Note de calcul</b> <b>Pression dynamique</b>		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
<b>CONFIDENTIEL</b>	Client: WPD	Date: 30/06/2021		
	Code projet: WFR105_ ARTINS	Revision:	Rev2	


### 3.3. CONCLUSION SUR LA VITESSE MOYENNE

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

Direction de vent	V <sub>0</sub>	Cr (0.5)	Co (0.5)	V <sub>m</sub> (0.5)	Direction de vent	V <sub>0</sub>	Cr (0.5)	Co (0.5)	V <sub>m</sub> (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°	16.80 m/s	0.701	1.000	11.77 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°	24.00 m/s	0.701	1.000	16.82 m/s





	<b>Note de calcul</b> <b>Pression dynamique</b>		<b>Écrit par:</b> JH	
			<b>Approuvé par:</b>	
<b>CONFIDENTIEL</b>	<b>Client:</b> WPD	<b>Date:</b> 30/06/2021		
	<b>Code projet:</b> WFR105_ ARTINS	<b>Revision:</b> 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.

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

where:

$\rho$  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

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{V_m(z)} = \frac{k_1}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{for } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4.7)$$

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

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.

$c_0$  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 :

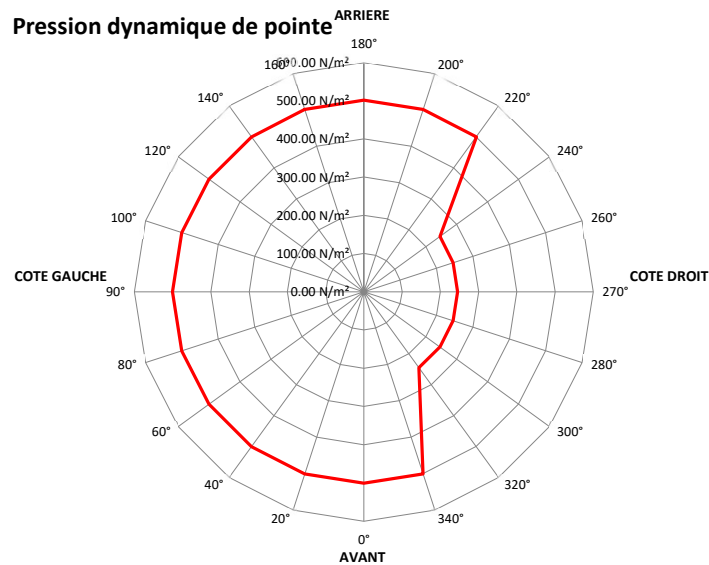
$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$


	<b>Note de calcul</b> <b>Pression dynamique</b>		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
<b>CONFIDENTIEL</b>	Client: WPD	Date: 30/06/2021		
	Code projet: WFR105_ ARTINS	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	$V_b$	$V_m(0.5)$	$I_v(0.5)$	$\rho$	$q_p(0.5)$
0°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
20°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
40°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
60°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
80°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
90°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
100°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
120°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
140°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
160°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
180°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
200°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
220°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>
240°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m <sup>2</sup>
260°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m <sup>2</sup>
270°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m <sup>2</sup>
280°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m <sup>2</sup>
300°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m <sup>2</sup>
320°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m <sup>2</sup>
340°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m <sup>2</sup>

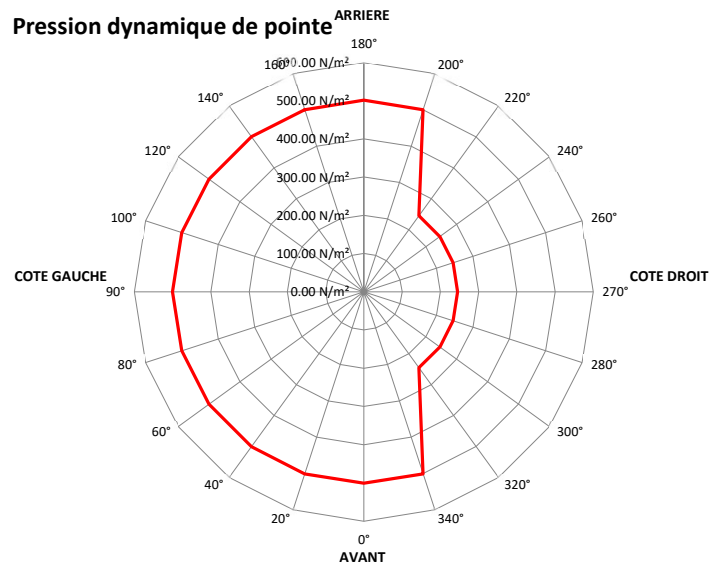


	<b>Note de calcul</b> <b>Pression dynamique</b>		Ecrit par: JH	
			Approuvé par:	
<b>CONFIDENTIEL</b>	Client: WPD	Date: 30/06/2021		
	Code projet: WFR105_ ARTINS	Revision:	Rev2	


### 4.3. CONCLUSION SUR LA PRESSION DYNAMIQUE (pour l'ilot 2 orienté à 167°)

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

Direction du vent	$V_b$	$V_m(0.5)$	$I_v(0.5)$	$\rho$	$q_p(0.5)$
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°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 N/m²
240°	16.80 m/s	11.77 m/s	245.29	1.225	245.29 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°	24.00 m/s	16.82 m/s	500.60	1.225	500.60 N/m²



# Annexe 2 : Note de calcul sur la génération des vagues

	<b>Note de calcul</b> <b>Génération de vagues</b>		<b>Ecrit par:</b> JH	
			<b>Approuvé par:</b>	
<b>CONFIDENTIEL</b>	<b>Client:</b> WPD	<b>Date:</b> 13/07/2021		
	<b>Code projet:</b>	<b>WFR105</b>	<b>Revision:</b> V6indA	

# 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. Seulement les résultats pour l'îlot 1 sont présentés dans ce document.

## 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 <sup>2</sup>	36.76 m/s	180°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s
20°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s	200°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s
40°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s	220°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s
60°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s	240°	405.53 N/m <sup>2</sup>	25.73 m/s
80°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s	260°	405.53 N/m <sup>2</sup>	25.73 m/s
90°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s	270°	405.53 N/m <sup>2</sup>	25.73 m/s
100°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s	280°	405.53 N/m <sup>2</sup>	25.73 m/s
120°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s	300°	405.53 N/m <sup>2</sup>	25.73 m/s
140°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s	320°	405.53 N/m <sup>2</sup>	25.73 m/s
160°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s	340°	827.62 N/m <sup>2</sup>	36.76 m/s

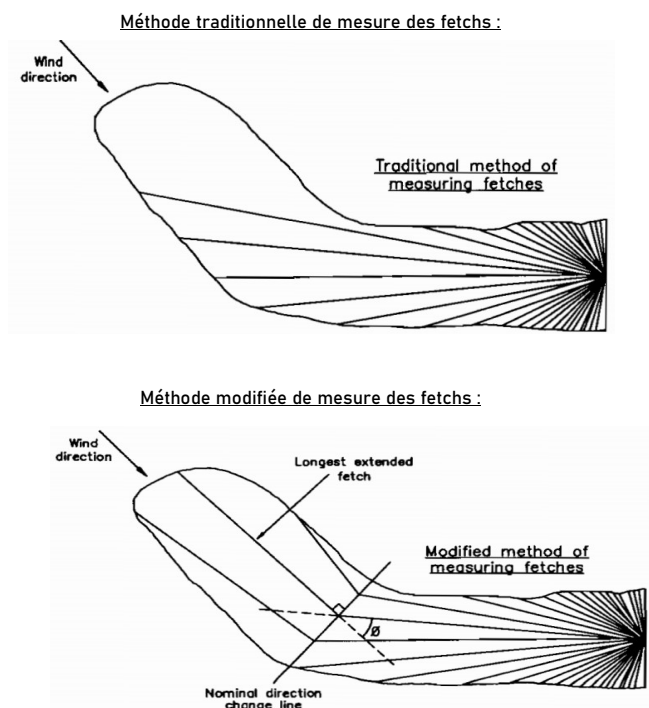


## 1.2. Fetch

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 °	55 m	180 °	20 m
20 °	55 m	200 °	20 m
40 °	55 m	220 °	20 m
60 °	55 m	240 °	20 m
80 °	55 m	260 °	20 m
90 °	45 m	270 °	27 m
100 °	45 m	280 °	27 m
120 °	45 m	300 °	27 m
140 °	45 m	320 °	27 m
160 °	45 m	340 °	27 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.

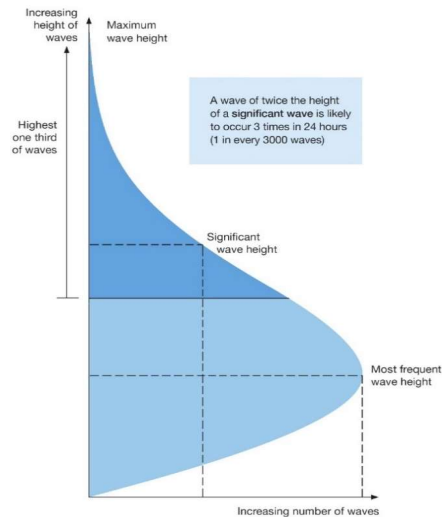
## 2.1. Hauteur de vague significative

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

Où:

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

$\lambda$  = 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/s<sup>2</sup>

## 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

$\lambda$  = longueur d'onde

$\alpha$  = 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

$\lambda$  = 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

$\lambda$  = 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 supérieure 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/s<sup>2</sup>

$F$  = 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 °	2.83 min	28.95 m/s	180 °	1.42 min	30.09 m/s
20 °	2.83 min	28.95 m/s	200 °	1.42 min	30.09 m/s
40 °	2.83 min	28.95 m/s	220 °	1.42 min	30.09 m/s
60 °	2.83 min	28.95 m/s	240 °	1.60 min	20.92 m/s
80 °	2.83 min	28.95 m/s	260 °	1.60 min	20.92 m/s
90 °	2.47 min	29.17 m/s	270 °	1.97 min	20.68 m/s
100 °	2.47 min	29.17 m/s	280 °	1.97 min	20.68 m/s
120 °	2.47 min	29.17 m/s	300 °	1.97 min	20.68 m/s
140 °	2.47 min	29.17 m/s	320 °	1.97 min	20.68 m/s
160 °	2.47 min	29.17 m/s	340 °	1.74 min	29.75 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/s<sup>2</sup>

$F$  = 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 °	0.69 s	180 °	0.50 s
20 °	0.69 s	200 °	0.50 s
40 °	0.69 s	220 °	0.50 s
60 °	0.69 s	240 °	0.43 s
80 °	0.69 s	260 °	0.43 s
90 °	0.64 s	270 °	0.47 s
100 °	0.64 s	280 °	0.47 s
120 °	0.64 s	300 °	0.47 s
140 °	0.64 s	320 °	0.47 s
160 °	0.64 s	340 °	0.55 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	$\lambda$	$h/\lambda$	Condition de site	Direction de vent	$\lambda$	$h/\lambda$	Condition de site
0 °	0.73 m	1/7	Deep Water	180 °	0.39 m	1/7	Deep Water
20 °	0.73 m	1/7	Deep Water	200 °	0.39 m	1/7	Deep Water
40 °	0.73 m	1/7	Deep Water	220 °	0.39 m	1/7	Deep Water
60 °	0.73 m	1/7	Deep Water	240 °	0.29 m	1/7	Deep Water
80 °	0.73 m	1/7	Deep Water	260 °	0.29 m	1/7	Deep Water
90 °	0.65 m	1/7	Deep Water	270 °	0.35 m	1/7	Deep Water
100 °	0.65 m	1/7	Deep Water	280 °	0.35 m	1/7	Deep Water
120 °	0.65 m	1/7	Deep Water	300 °	0.35 m	1/7	Deep Water
140 °	0.65 m	1/7	Deep Water	320 °	0.35 m	1/7	Deep Water
160 °	0.65 m	1/7	Deep Water	340 °	0.47 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/s<sup>2</sup>

$F$  = fetch (en m)

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

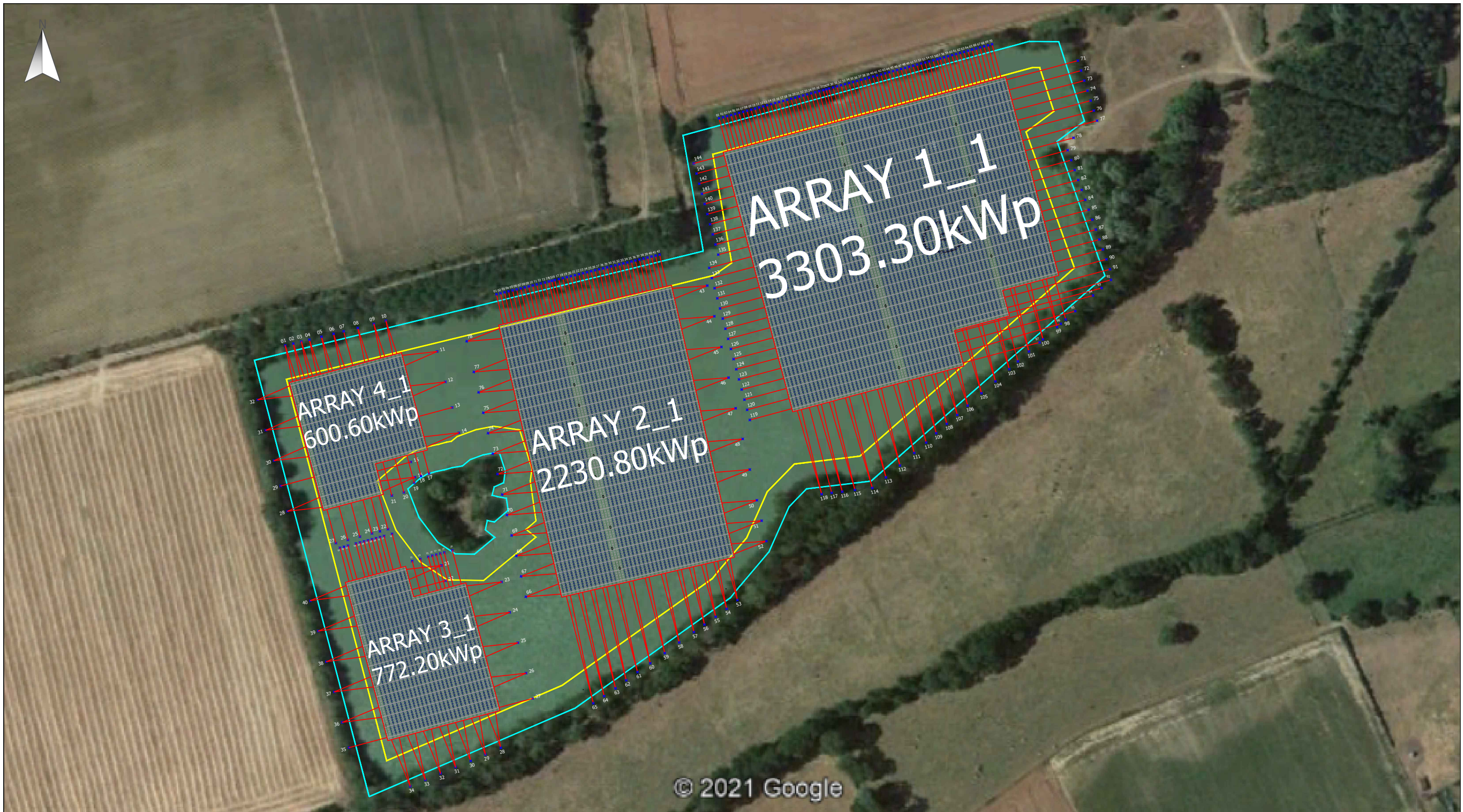
Ainsi on obtient:

Direction de vent	Hauteur significative de vague	Direction de vent	Hauteur significative de vague
0 °	0.10 m	180 °	0.05 m
20 °	0.10 m	200 °	0.05 m
40 °	0.10 m	220 °	0.05 m
60 °	0.10 m	240 °	0.04 m
80 °	0.10 m	260 °	0.04 m
90 °	0.09 m	270 °	0.05 m
100 °	0.09 m	280 °	0.05 m
120 °	0.09 m	300 °	0.05 m
140 °	0.09 m	320 °	0.05 m
160 °	0.09 m	340 °	0.07 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





© 2021 Google



WFR105_ARTINS		FRANCE ARTINS		Anchoring design		
Scale X/XX	Format A3	Rev V6indA	Drawn AAP	Checked JH	Date 12/07/2021	Comments
All dimensions are in meter		----	----	----	----	
<b>CONFIDENTIAL</b>		----	----	----	----	

Legend :

- Junction boxes
- Floats HYDRELIO
- Mooring Lines
- PV panels
- Anchoring Point



# DIAGNOSTIC RELATIF A LA PRESENCE D'EMBACLES ET IMPLICATIONS SUR LE DIMENSIONNEMENT DES ANCRAGES DE PANNEAUX PHOTOVOLTAIQUES FLOTTANTS A ARTINS

Note technique



Version A - Novembre 2020





BRL ingénierie

1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001  
30001 NIMES CEDEX 5

Date du document	13/05/2020
Contact	Nicolas Fraysse

Titre du document	Diagnostic relatif a la presence d'embacles et implications sur le dimensionnement des ancrages de panneaux photovoltaïques flottants a artins
Référence du document :	NT Embacles panneaux photovoltaïques flottants .docx
Indice :	A

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
13/05/2020	A		N Fraysse	N.Fraysse





# DIAGNOSTIC RELATIF A LA PRESENCE D'EMBACLES ET IMPLICATIONS SUR LE DIMENSIONNEMENT DES ANCRAGES DE PANNEAUX PHOTOVOLTAIQUES FLOTTANTS A ARTINS

## Note technique

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>SITE DE PROJET.....</b>	<b>8</b>
2.1	DONNEES GEOMETRIQUES .....	9
2.2	DONNEES BATHYMETRIQUES .....	10
2.3	CONTEXTE HYDRAULIQUE.....	11
	2.3.1.1 Zone inondable .....	11
	2.3.1.2 Niveaux d'eau.....	12
<b>3</b>	<b>PRESENCE ET TYPOLOGIE DES EMBACLES.....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU PROJET .....</b>	<b>14</b>
4.1	IMPLANTATION DU PROJET.....	14
4.2	STRUCTURES FLOTTANTES PREVUES .....	15
4.3	RAPPEL DES MODALITES D'ANCRAGE ET D'AMARRAGE : .....	16
<b>5</b>	<b>SYNTHESE DES DIMENSIONNEMENTS.....</b>	<b>17</b>
5.1	SYNTHESE DES DIMENSIONNEMENTS .....	17
	Combinaison à l'ELS caractéristique.....	17
	Combinaison à l'ELU fondamental.....	17
5.2	VERIFICATION DES EFFORTS APORTEES PAR LES EVENTUELS EMBACLES .....	19
<b>6</b>	<b>CONCLUSION – SYNTHESE .....</b>	<b>20</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCES.....</b>	<b>21</b>

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de Artins .....	8
Figure 2: Localisation du plan d'eau concerné par l'étude .....	8
Figure 3: Dimensions du site (Geoportail) .....	9
Figure 4: Périmètre du plan d'eau (Geoportail).....	9
Figure 5: Carte topographique de la zone (Geoportail) .....	10
Figure 6: Bathymétrie du plan d'eau .....	10
Figure 7: Cartes du zonage réglementaire (PPRI du Loir).....	12
Figure 12: Croquis du plan d'amarrage 2 (orientation des panneaux Est/Ouest) .....	14
Figure 17: Croquis du plan d'amarrage 3 (orientation des panneaux Est/Ouest) .....	15
Figure 9: Structure sur laquelle repose les panneaux photovoltaïques. ....	15
Figure 10: Schéma en coupe d'un bateau Zimmermann .....	15
Figure 19: Croquis de la longueur de la ligne au niveau d'eau haut .....	16
Figure 20: Croquis de la longueur de la ligne au niveau d'eau bas .....	16





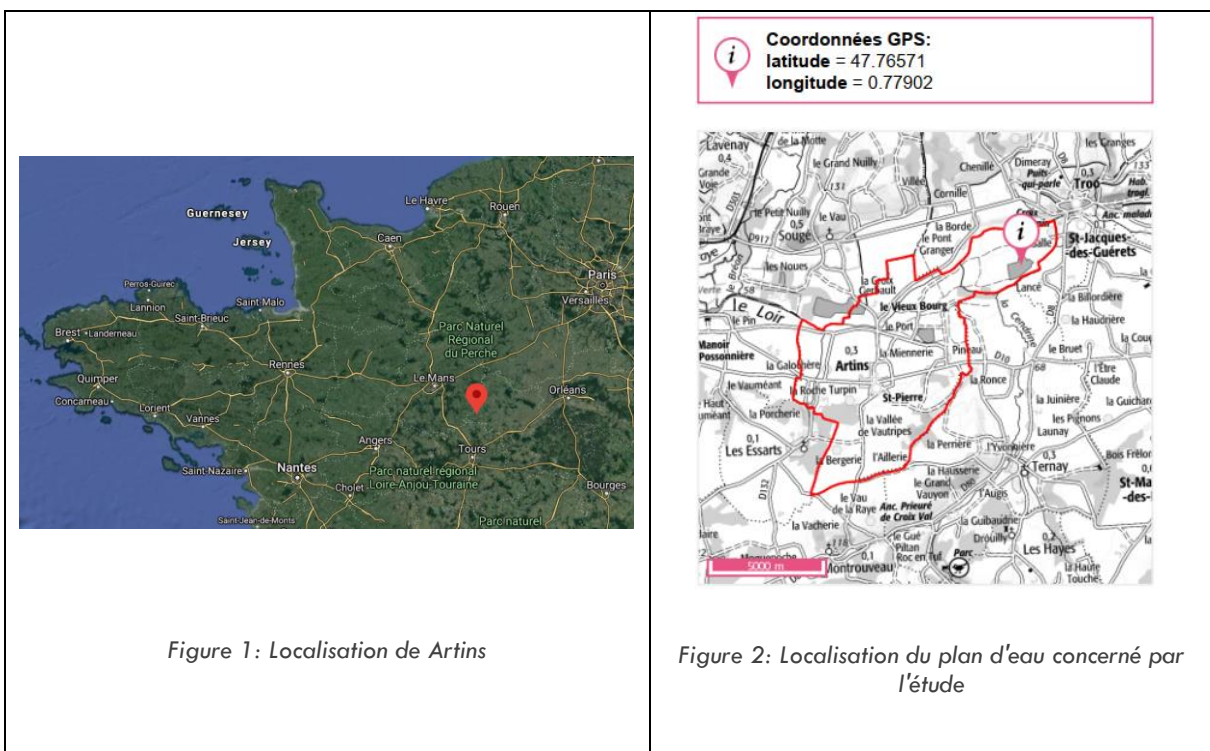
# 1 INTRODUCTION

WPD France développe un projet de parc photovoltaïque flottant au sein d'un lac de carrière de la commune de Artins. En parallèle des évaluations environnementales la conception technique du projet est réalisée. Lors du dimensionnement des amarrages s'est posée la question des embâcles et de leur potentielle incidence sur le dimensionnement des ouvrages et la tenue des pieux d'amarrages et différents organes physiques du projet.

**La présente note fait le point sur la problématique des embâcles et sur la sensibilité du projet vis-à-vis de ce phénomène, en particulier sur la pertinence des dimensionnements.**

## 2 SITE DE PROJET

La zone d'étude se situe à Artins dans le département du Loir-et-Cher (41).



Le site de l'étude est une ancienne carrière sablière fermée en 2003, transformée en plan d'eau en 2005. Les caractéristiques du plan d'eau sont les suivantes :

- Superficie totale : 13 ha
- Superficie en eau : 9 ha
- Usage : Chasse et pêche

Le site étudié se trouve à proximité immédiate du Loir.



## 2.1 DONNEES GEOMETRIQUES



Figure 3: Dimensions du site (Geoportail)

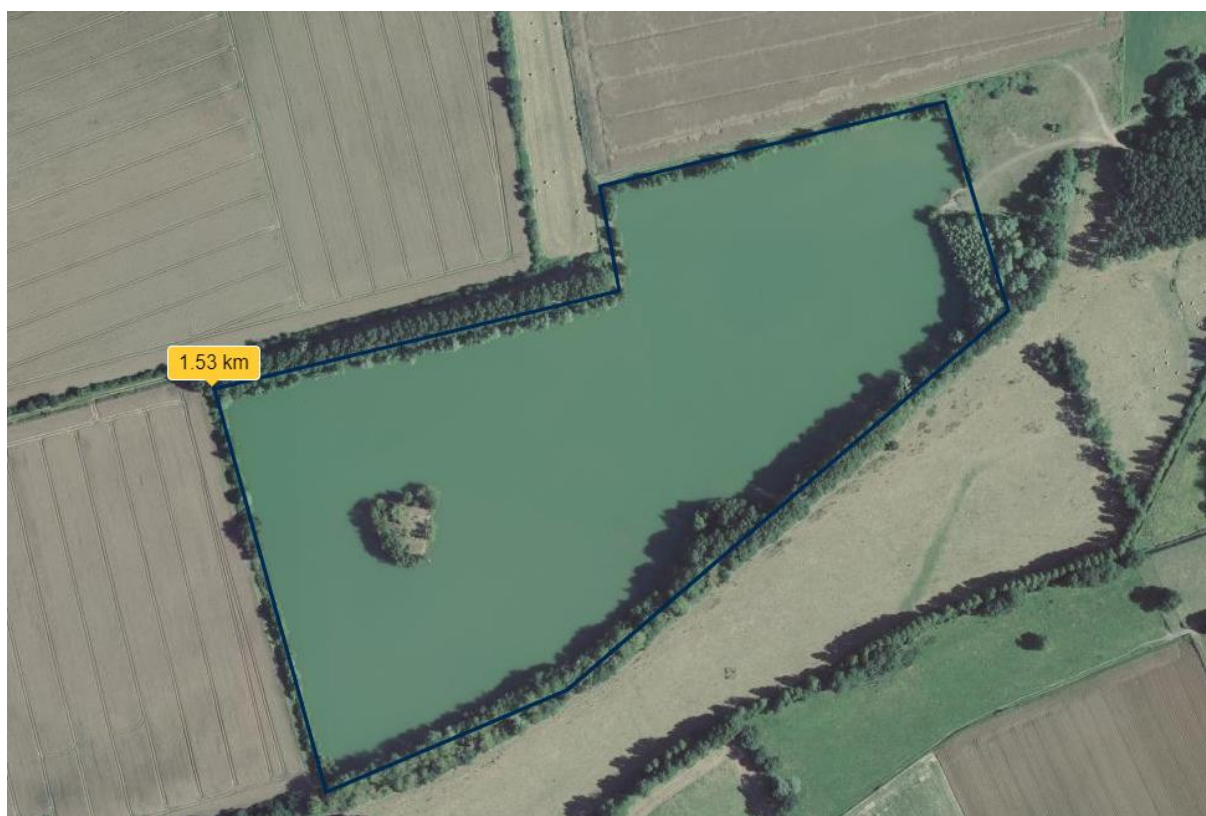


Figure 4: Périmètre du plan d'eau (Geoportail)

Nota : les longueurs ci-dessus sont approximatives.



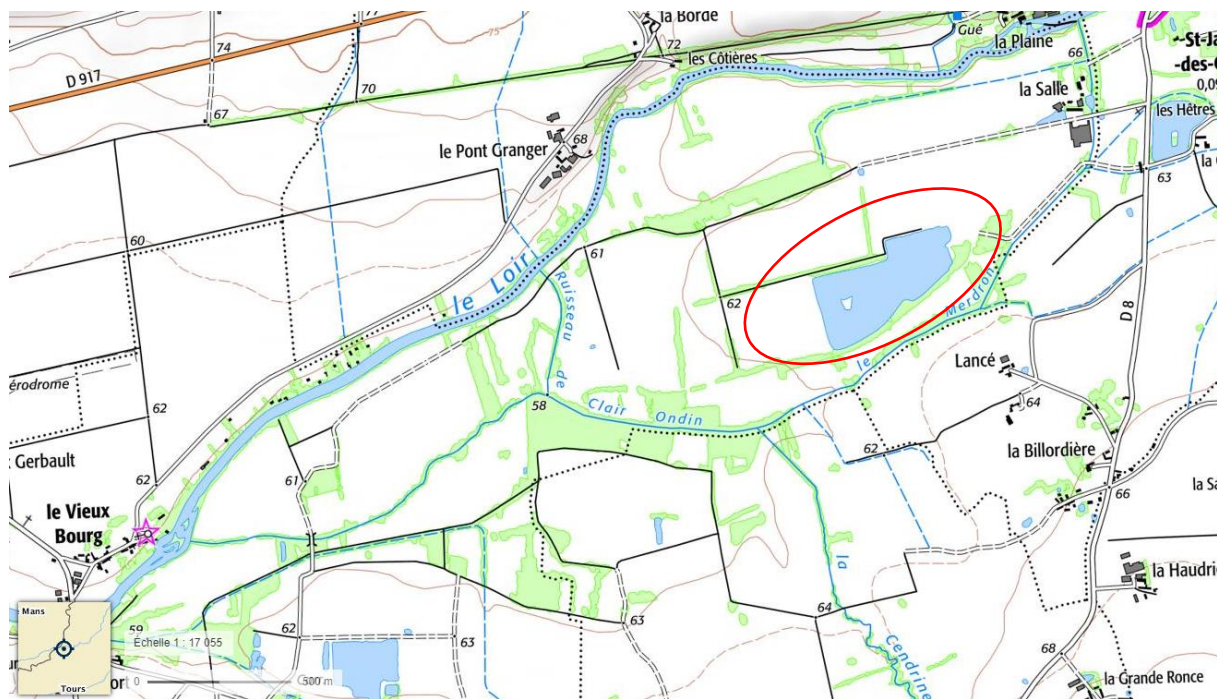


Figure 5: Carte topographique de la zone (Geoportail)

D'après la carte topographique IGN, les terrains aux bords du plan d'eau sont à la côte +62.00 m NGF.

## 2.2 DONNEES BATHYMETRIQUES

Lors des levés réalisés le 05/02/2020 l'altitude du plan d'eau était de 60.48 m NGF.

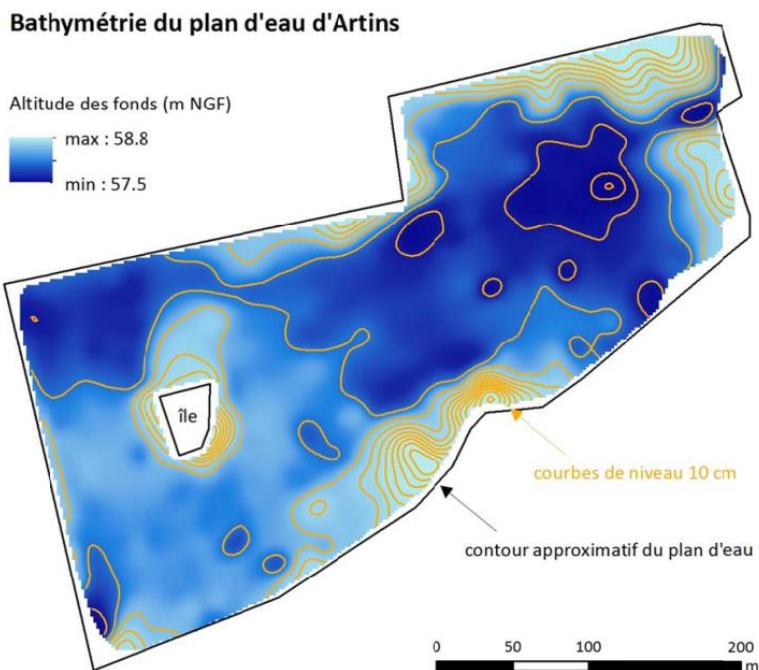


Figure 6: Bathymétrie du plan d'eau

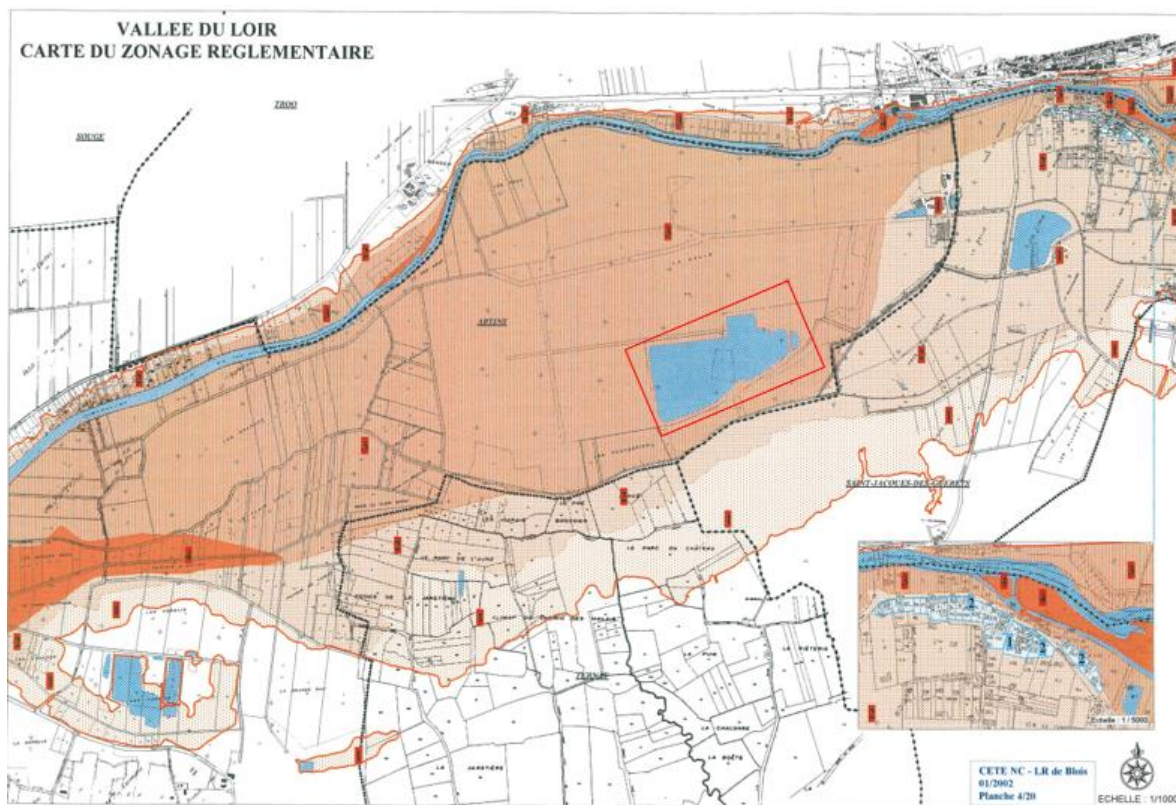




## 2.3 CONTEXTE HYDRAULIQUE

### 2.3.1.1 Zone inondable

Le site se trouve à proximité immédiate du Loir. Le plan d'eau étudié est inondable lors de crue, il est en zone 3 (aléa fort). Cet aléa est caractérisé par une profondeur de submersion supérieure à 2 m avec une vitesse de courant nulle à faible ou une profondeur de submersion comprise entre 1 et 2 m avec une vitesse de courant moyenne à forte.



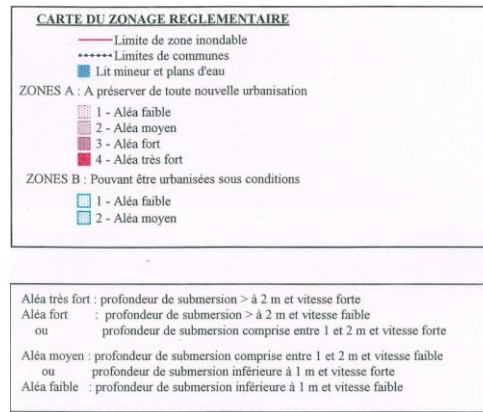


Figure 7: Cartes du zonage réglementaire (PPRI du Loir)

Les vitesses de courants sont caractérisées de vitesses faibles lorsqu'elles ne dépassent pas 1m/s d'après le règlement du PPRI. Etant donné l'éloignement par rapport au lit mineur de la rivière **on retiendra la valeur de 1m/s pour le calcul des efforts induits par le courant**. Cette valeur sécuritaire n'intègre qu'une faible part de la chute des vitesses de courant associée à l'augmentation brutale de la tranche d'eau au niveau de la gravière lors de l'événement de référence PPRI (tranche d'eau passant de 2,5 à 7 m, donc vitesse réduite du même facteur 2,8).

### 2.3.1.2 Niveaux d'eau

D'après le rapport [3] un aléa très fort (zone 4) induit une submersion moyenne de 2.5 m. De façon sécuritaire, la valeur de 2.50 m de submersion des terres est retenue pour une zone 3 (aléa fort). Les terres se situant alors à une altitude de +62.00 m NGF en bord du plan d'eau seraient alors submergées, le niveau d'eau atteindrait alors 64.50 m NGF.

Les niveaux extrêmes considérés sont donc :

- Niveau haut : +64.50 m NGF
- Niveau bas : +57.50 m NGF



### 3 PRESENCE ET TYPOLOGIE DES EMBACLES

Un embâcle est une accumulation hétérogène de bois mort et déchets divers, façonnée par le courant et entravant plus ou moins le lit mineur du cours d'eau (végétation, rochers, bois...).



Embâcle à Lormaye, source photo : CD 28

Embâcle à Lormaye, source photo : CD 28



Cette première définition sous-entend que la gravière d'Artins, située hors lit mineur est par principe peu soumise à cet aléa.

Deux questions se posent :

- Quelle est la probabilité qu'en cas de crues majeure (centennale) du Loir et ses affluents des débris flottants viennent s'accumuler dans les bassins au point de perturber les installations ?
- En cas d'embâcle, le dimensionnement de l'effet des accumulations de bois mort contre les radeaux est-il bien appréhendé dans le dimensionnement des systèmes d'ancrage du projet photovoltaïque flottant de la gravière d'Artins ?

Nous avons choisi une approche de type « arbre de risques » consistant à décomposer chaque événement de l'enchaînement de circonstances conduisant à la constitution d'un embâcle au niveau des radeaux flottants, puis à sa rupture.

Pour qu'il y ait embâcle sur les installations, il faut que ces embâcles soient « produits » par l'écoulement à l'amont de ces installations, et qu'ils soient transportés jusqu'aux bassins.

Le bassin du Loir à l'amont d'Artins est plutôt marqué par un couvert agricole, peu boisé, ce qui est plutôt défavorable à la création d'embâcles. Les ripisylves quoique assez réduites ont un entretien qui peut être variable et à ce titre la probabilité de production d'embâcles est de probabilité élevée.

A la question de la taille possible des embâcles pouvant atteindre la gravière d'Artins, il est possible de répondre en se basant sur les profondeurs d'eau en crue de référence qui ne dépassent pas 2,5m. La probabilité que des embâcles de grande taille atteignent la gravière est très faible. L'éloignement relativement réduit de la gravière par rapport au Loir (env 500m), principal cours d'eau des environs d'Artins est compensé par la situation de celle-ci à l'intrado d'une courbe du Loir, par essence peu favorable au passage d'embâcles.

**En conclusion, quoique très faible, voire négligeable, la possibilité d'embâcles quoique de petite taille, ne peut être complètement écartée. Cette faible probabilité est confirmée par l'absence d'observation d'accumulation au droit du site.**

**Un calcul de vérification peut toutefois être conduit, en mesure de précaution.**



## 4 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU PROJET

### 4.1 IMPLANTATION DU PROJET

A présent stade de réflexion, en application de la logique ERC, deux bornes d'occupation du plan d'eau ont été envisagées pour le projet. Le taux d'occupation est calé entre 60% et 90%.

Du fait de la configuration du site il est défini deux zones afin de calculer les efforts plus facilement. Dans le schéma ci-dessous le plan d'eau est recouvert de panneaux solaires. Ceux-ci sont positionnés à 7.5 m des berges, ce qui permet d'assurer un recouvrement du plan d'eau égal à 90%.

Il est considéré que la largeur des radeaux est de 3.92 m et que l'espacement entre deux lignes de bateaux est de 0.40 m selon les spécifications du fabricant Zimerman.



Figure 8: Croquis du plan d'amarrage 2 (orientation des panneaux Est/Ouest)

Afin de recouvrir le plan d'eau à 60% de panneaux photovoltaïques, il est proposé de maintenir le positionnement des « bateaux » à 7.5 m des berges et de ne recouvrir qu'une seule partie du plan d'eau.

Le plan d'amarrage dimensionnant pour ce cas de figure est le suivant :





Figure 9: Croquis du plan d'amarrage 3 (orientation des panneaux Est/Ouest)



## 4.2 STRUCTURES FLOTTANTES PREVUES

Les structures flottantes de projet considérées sont de type radeau Zimmerman. Les dimensions supposées des panneaux photovoltaïques sont de 2.00 x 1.00 m. Les bateaux Zimmermann sont assemblés pour obtenir « un radeau ».

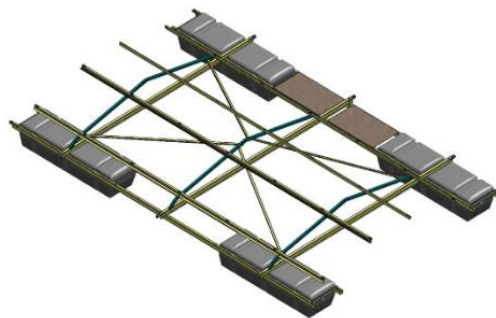


Figure 10: Structure sur laquelle repose les panneaux photovoltaïques.

La figure ci-dessous présente les dimensions utilisées dans la présente étude.

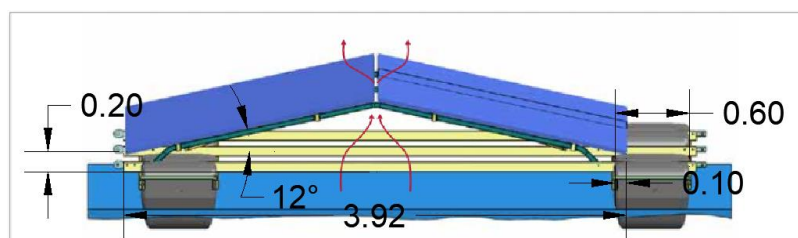


Figure 11: Schéma en coupe d'un bateau Zimmermann

En sus des dimensions présentes sur le schéma, un tirant d'eau de 0.40 m est considéré pour les flotteurs. Compte tenu de la géométrie des ouvrages, notamment de l'écartement des flotteurs, la surface de flotteurs directement exposée au courant, donc aux embâcles est de : 0.27 m<sup>2</sup>/ml.

## 4.3 RAPPEL DES MODALITES D'ANCRAGE ET D'AMARRAGE :

Le principal mode d'amarrage prévu est sur pieux périphériques, disposés en berge.

D'après les niveaux d'eau établis en &2.3.1.2, les longueurs de lignes (tendues dans les cas extrêmes) sont de :

- Niveau d'eau haut : 8.70 m

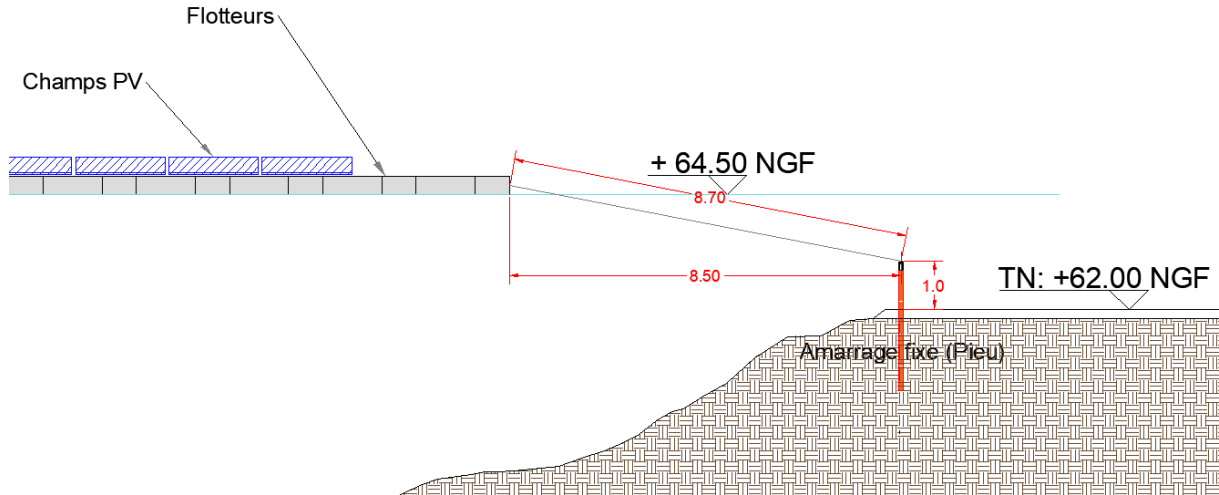


Figure 12: Croquis de la longueur de la ligne au niveau d'eau haut

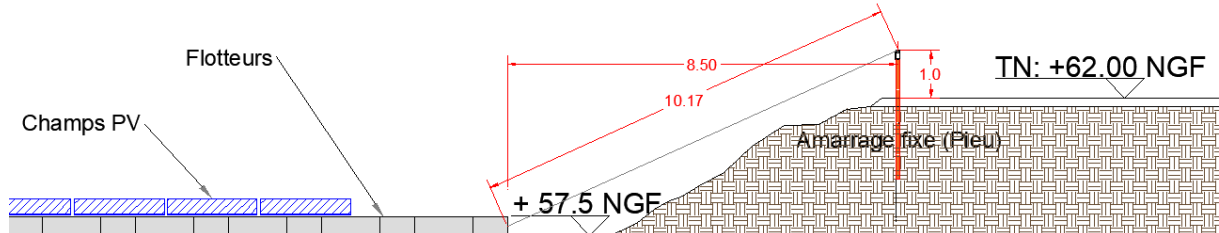


Figure 13: Croquis de la longueur de la ligne au niveau d'eau bas

Analyse de la sensibilité des structures flottantes :

Vis-à-vis de la sensibilité intrinsèque de la structure vis-à-vis des embâcles, les radeaux de type Zimmerman sont donc peu sensibles : les éventuelles accumulations contre les flotteurs sont facilement « éjectées » par le dessous des flotteurs lorsque la pression augmente (cas d'une accumulation croissante).



# 5 SYNTHÈSE DES DIMENSIONNEMENTS

## 5.1 SYNTHÈSE DES DIMENSIONNEMENTS

La note de calcul de dimensionnement des ancrages indiquée en référence détaille les calculs ici synthétisés.

Les actions du vent et des courants sont calculées en application des recommandations ROSA 2000 pour le dimensionnement des ancrages et amarrages de bateaux. Pour le site, ils sont établis de la façon suivante :

- La vitesse du vent moyen de référence pour le dimensionnement est prise à 86,5 km/h (en rafale, sur 1 minute à 2 m du sol).

Selon l'interprétation a maxima de l'alea PPRI concernant la gravière d'Artins :

- Le niveau d'eau retenu (64,5 mNGF) est localement calé à 2,5M au-dessus du Terrain Naturel (62)
- La vitesse de courant retenue est de 1 m/s,

Les actions calculées pour le vent (W) et le courant (COU) sont considérées concomitantes.

Action	Type	Coefficient de pondération pour passer de ELS à ELU $\gamma_d$
W (vent)	Variable	1.5
COU (courant)	Variable	1.5

Combinaison à l'ELS caractéristique

ELS :  $W + COU$

Combinaison à l'ELU fondamental

ELU :  $1.5*W + 1.5*COU$

La configuration la plus défavorable est considérée selon l'implantation maximale à 90% d'occupation dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Zone 1 : En moyenne les lignes de bateaux font 158 m (max = 215 m), le nombre de ligne est de 62.
- Zone 2 : En moyenne les lignes de bateaux font 152 m (max = 215 m), le nombre de ligne est de 63.

Les bateaux sont considérés comme formant un ensemble (un grand radeau) solidaire.

Les efforts calculés sont rappelés ci-dessous dans le cas défavorable d'un remplissage à 90% du plan d'eau :





Le tableau ci-dessous récapitule les efforts induits par le vent et le courant à l'ELS et l'ELU pour un remplissage à 90% du plan d'eau montre le caractère très réduit des efforts du courant par rapport à celui du vent et aux efforts totaux de dimensionnement (efforts courant = 3% du total des efforts).

		ELS	ELU
Zone 1	Vent (kN)	805.7	1208.6
	Courant (kN)	29	43.5
	Total (kN)	834.7	1252.1
Zone 2	Vent (kN)	773.2	1159.8
	Courant (kN)	20.5	30.8
	Total (kN)	793.7	1190.6
Zone 1+ 2	Total (kN)	1628.4	2442.7

En synthèse, il est retrouvé les efforts globaux suivants :

	Effort à l'ELS (kN)	Effort à l'ELU (kN)
Plan d'eau recouvert à 90 % de panneaux photovoltaïques	1628.4	2442.7

18

Les efforts linéarisés (par ml de berge) sont rappelés ci-dessous :

	Effort à l'ELS (kN/ml)	Effort à l'ELU (kN/ml)
Plan d'eau recouvert à 90 % de panneaux photovoltaïques	10.6	15.9

- ⇒ Les valeurs des actions du vent et des courants sont prises en application des normes et règlements en vigueur, dans leur fourchette haute (valeur du courant selon PPRI prise à 1 m/s).
- ⇒ Cette approche est volontairement majorante et précautionneuse.
- ⇒ Les phénomènes d'embâcles sont considérés en tant qu'Etat Limite Ultime (phénomène accidentel) associés aux courants.
- ⇒ **Les efforts du courant dans le dimensionnement ne représentent que 3% des efforts totaux pris en compte.**
- ⇒ La valeur retenue de 1,5 pour passer de ELS à ELU englobe les éventuels efforts parasites associés aux embâcles.
- ⇒ **Une vérification est conduite ci-après pour démontrer que la réserve de sécurité est satisfaisante et intègre effectivement le risque d'embâcle.**



## 5.2 VERIFICATION DES EFFORTS APPORTES PAR LES EVENTUELS EMBACLES

De façon générale, les objets flottants à faible tirant d'eau offrent une prise très limitée aux embâcles, contrairement aux objets (piles de pont, arbres vifs, ...) occupant la totalité de la colonne d'eau. En dépit de cette très faible sensibilité intrinsèque, un calcul sécuritaire a été conduit ci-dessous.

Compte tenu de l'épaisseur de la tranche d'eau hors gravière lors de la crue de référence PPRI (2,5 m au-dessus du TN), il est considéré que les embâcles de plus de 2,5 m de tirant d'eau ne peuvent pas atteindre la gravière et ses flotteurs.

Compte tenu de l'épaisseur de la tranche d'eau dans la gravière lors de l'événement de référence (7 m entre le fond de bassin et la cote 64,5 m NGF), il est considéré que les éventuels embâcles peuvent aisément passer sous les flotteurs dès lors que les accumulations deviennent importantes.

Par mesure de précaution, il est considéré que la totalité de la première ligne de pontons est saturée d'embâcles. Les embâcles sont formés sur la première ligne de flotteurs. Les flotteurs étant tous identiques, il est considéré que si un embâcle passe la première ligne, il passera les lignes suivantes.

Il est considéré par excès que le chargement maximal de la première ligne de flotteur saturée par des embâcles offre une surface de prise au courant (0,54 m<sup>2</sup>/ml) égale au double du tirant d'eau des flotteurs (0,27 m<sup>2</sup>/ml).

Sur cette base, les efforts associés aux embâcles généralisés sur la première ligne de flotteurs sont inférieurs à 1kN et ne représentent que des efforts marginaux par rapport aux efforts cumulés associés au vent maximum et au courant maximum 2442kN.

Dans l'hypothèse extrême pour laquelle les 125 lignes de flotteurs étaient saturées de la même façon, les efforts additionnels associés aux embâcles représenteraient moins de 50kN, soit moins de 3% des efforts pris en compte pour le dimensionnement.

**En conclusion, la vérification de la tenue des ancrages en cas extrême de saturation de l'ensemble des flotteurs par des embâcles est favorable : les dispositifs calculés sont stables avec une large marge de sécurité vis-à-vis des embâcles dont l'effet en cas extrême ne saurait dépasser 3% d'augmentation des efforts alors que les coefficients globaux de sécurité sont de l'ordre de 50%.**



## 6 CONCLUSION – SYNTHÈSE

Un embâcle est une accumulation hétérogène de bois mort et déchets divers, façonnée par le courant et entravant plus ou moins le lit mineur du cours d'eau (végétation, rochers, bois...).



Embâcle à Lormaye, source photo : CD 28



Embâcle à Lormaye, source photo : CD 28

Cette première définition sous-entend que la gravière d'Artins, située hors lit mineur est par principe peu soumise à cet aléa.

Deux questions se posent :

- Quelle est la probabilité qu'en cas de crues majeure (centennale) du Loir et ses affluents des débris flottants viennent s'accumuler dans les bassins au point de perturber les installations ?
- En cas d'embâcle, le dimensionnement de l'effet des accumulations de bois mort contre les radeaux est-il bien appréhendé dans le dimensionnement des systèmes d'ancrage du projet photovoltaïque flottant de la gravière d'Artins ?

Sur base des analyses conduites, quoique très faible, voire négligeable, la possibilité d'embâcles quoique de petite taille, ne peut être complètement écartée. Cette faible probabilité est confirmée par l'absence d'observation d'accumulation au droit du site.

**En conclusion, la vérification de la tenue des ancrages en cas extrême de saturation de l'ensemble des flotteurs par des embâcles est favorable : les dispositifs calculés sont stables avec une large marge de sécurité vis-à-vis des embâcles dont l'effet en cas extrême ne saurait dépasser 3% d'augmentation des efforts alors que les coefficients globaux de sécurité sont de l'ordre de 50%.**

\*\*\*



## 7 REFERENCES

Les documents auxquels font références la présente note sont listés ci-dessous :

- [1] 20200207\_SAGE DU LOIR\_présentation\_ARTINS
- [2] Etude globale de réduction du risque inondation dans le bassin du Loir - Rapport de phase 2, Etat des lieux et diagnostic – 19/03/2012
- [3] PPRI-Loir-Notice explicative-03/2003
- [4] PPRI Loir- Fiche complémentaire-Nature et intensité des risques-10/2001
- [5] Levés bathymétriques de la gravière d'Artins-Dynamique Hydro-02/2020



**BRL**  
*Ingénierie*



[www.brl.fr/brli](http://www.brl.fr/brli)

*Société anonyme au capital de 3 183 349 euros  
SIRET : 391 484 862 000 19 - RCS : NÎMES B 391 484 862  
N° de TVA intracom : FR 35 391 484 862 000 19*

1105, avenue Pierre Mendès-France  
BP 94001 - 30 001 Nîmes Cedex 5  
FRANCE  
Tél. : +33 (0) 4 66 87 50 85  
Fax : +33 (0) 4 66 87 51 09  
e-mail : [brli@brl.fr](mailto:brli@brl.fr)