

Conception de la solution DIKWE

Gaspard FOURESTIER

Ingénieur R&D

Clément LE GALL

Responsable BE

Grégoire CORRE

Responsable technique

Visite technique AFGC
18 novembre 2025



wave-op

La digue Carnot.

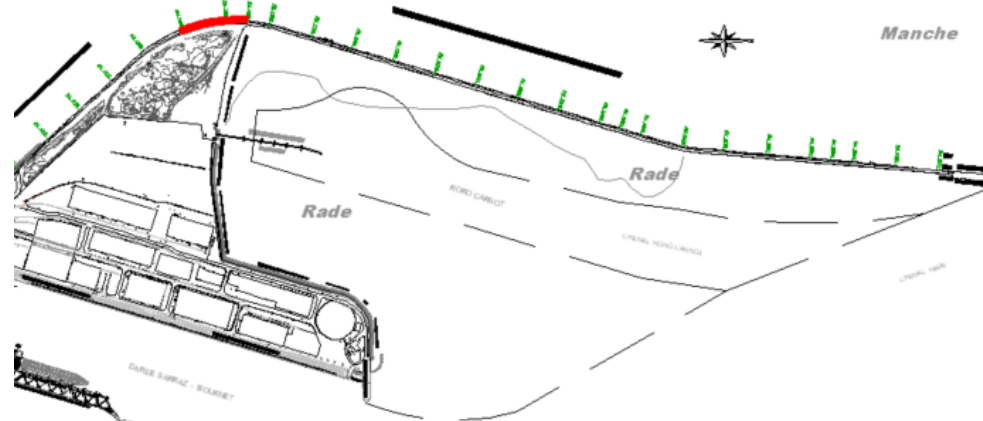
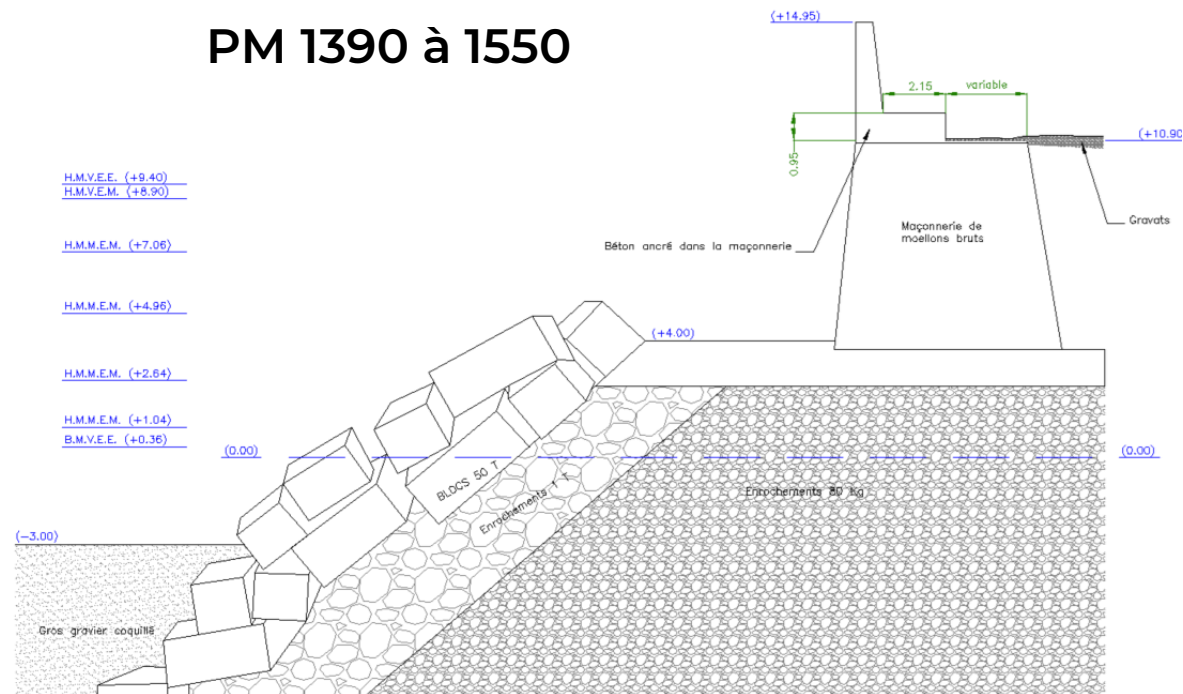


Historique

- **1878** : Déclaration d'utilité publique de la création d'un port en eau profonde protégé par une forte digue.
- **1879-1889** : Construction de la digue jusqu'au PM2120. Inauguration le 4 juin 1889 par le président de la République Sadi Carnot.
- **1922-1958** : Prolongations successives jusqu'au caisson d'extrémité au PM 3242



PM 1390 à 1550



Structure de la digue

Etude AVP de BRL (2015)

PORT DE BOULOGNE-SUR-MER – MISSION DE MAITRISE D'ŒUVRE RELATIVE
A LA REHABILITATION DE LA DIGUE CARNOT



Maintenance

Travaux de confortement de la carapace

- Reprise des risbermes
- Béton cyclopéen en tête de carapace
- Mise en œuvre de géoblocs en crête de talus
- Rechargements de blocs 33 T et 50 T

1999



2022

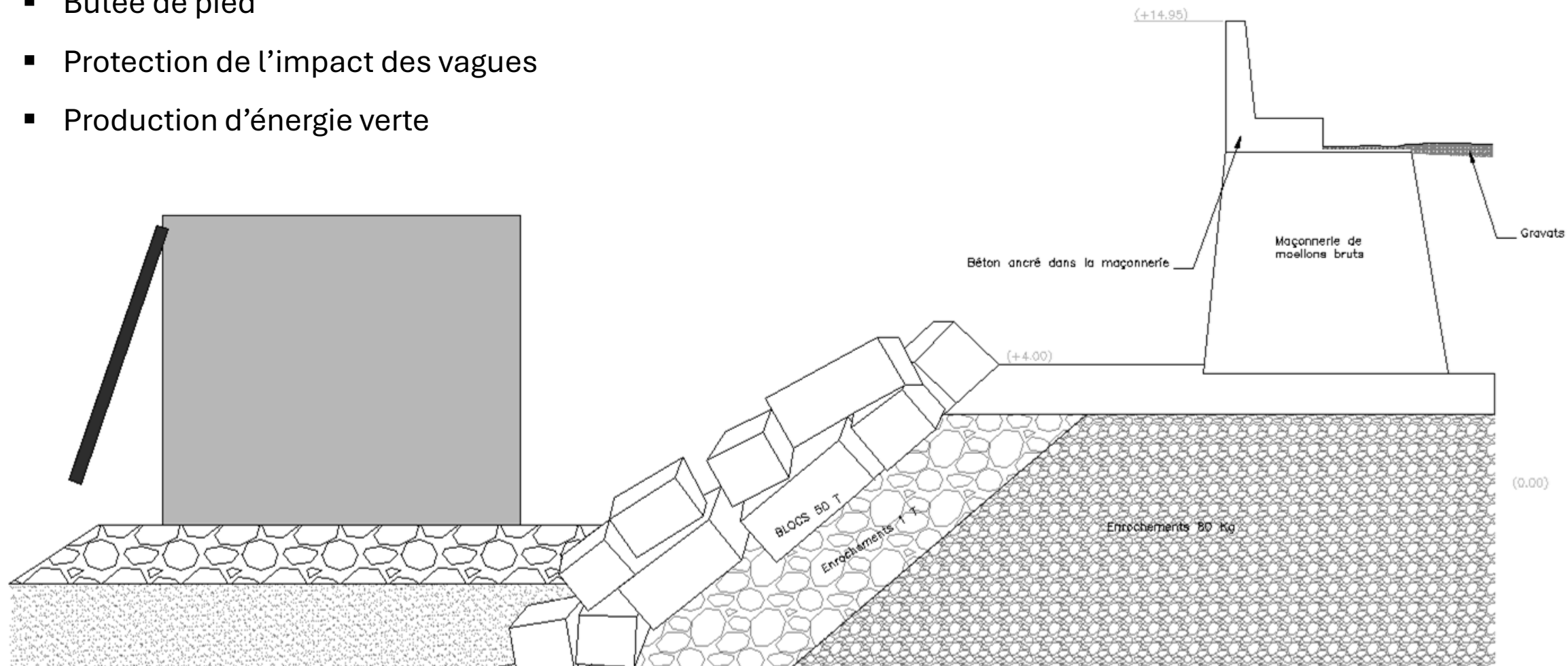


2017



Proposition WAVE OP

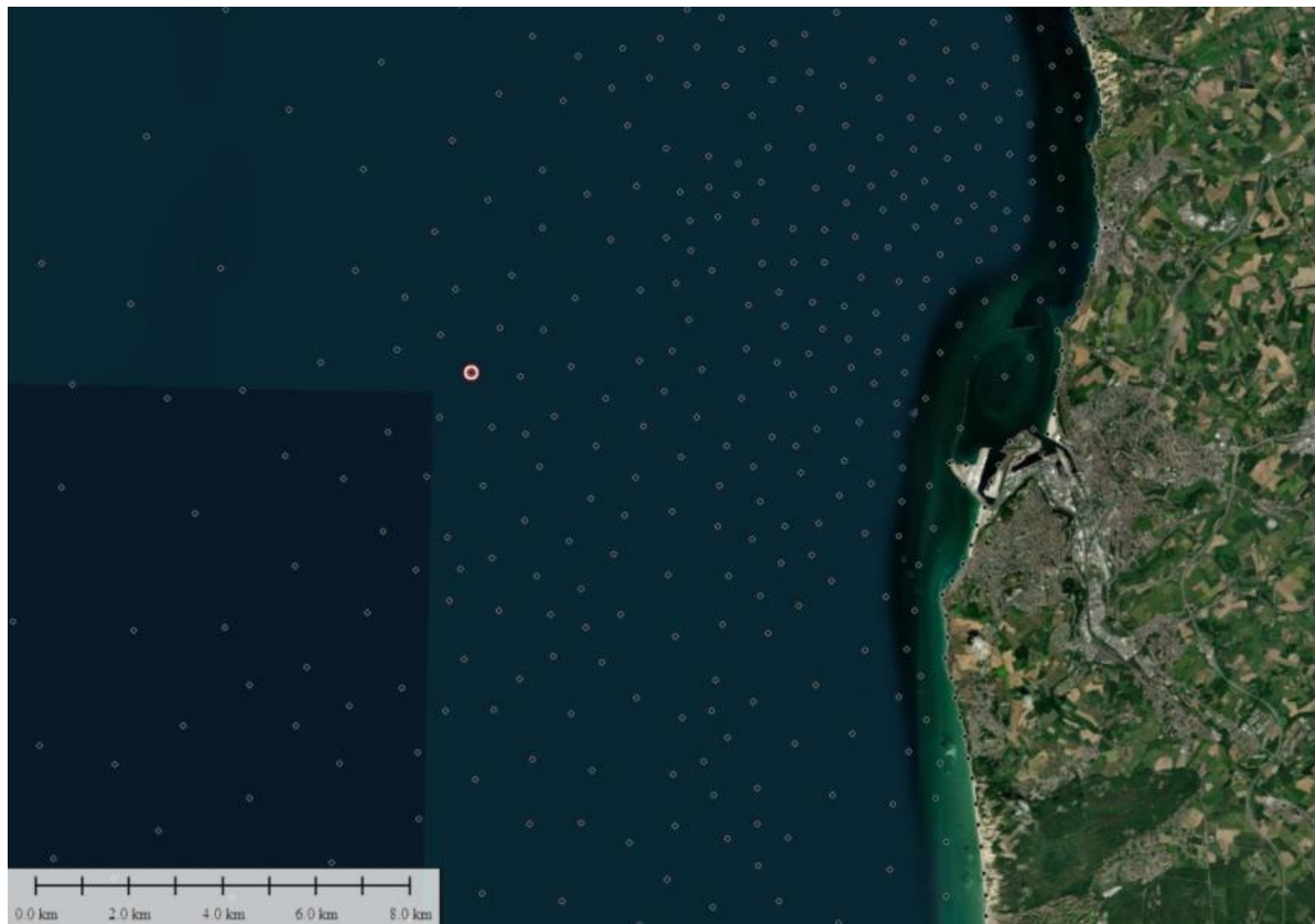
- Butée de pied
- Protection de l'impact des vagues
- Production d'énergie verte



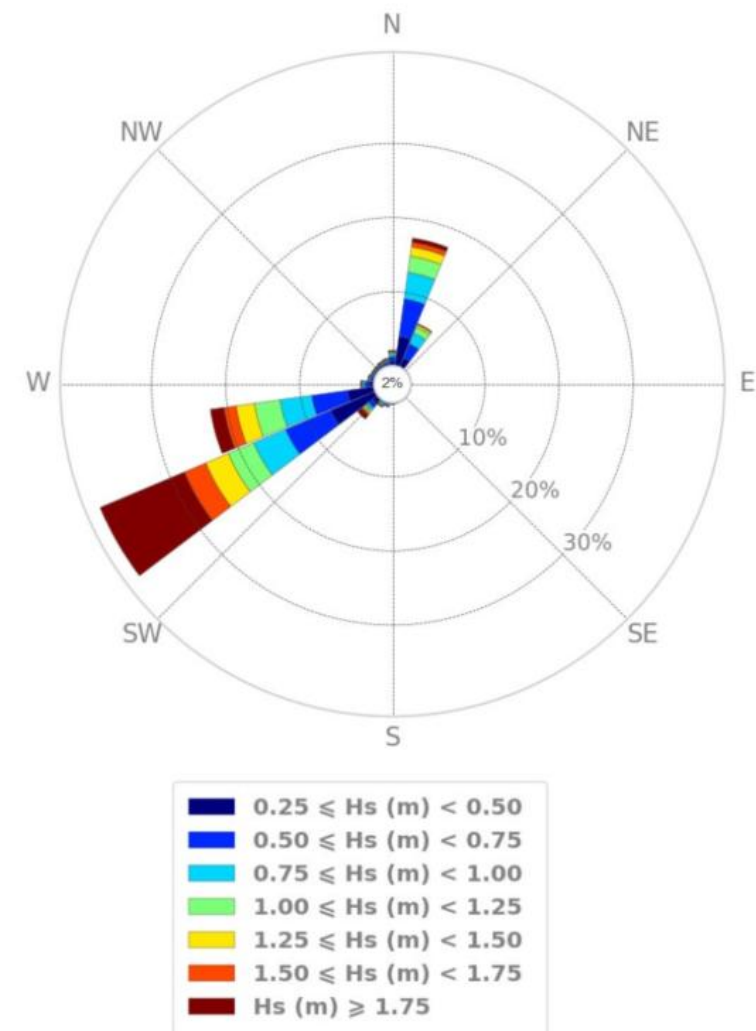
Etudes de site



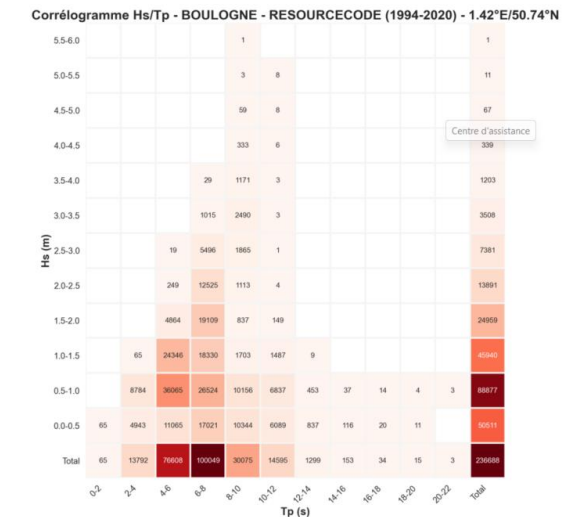
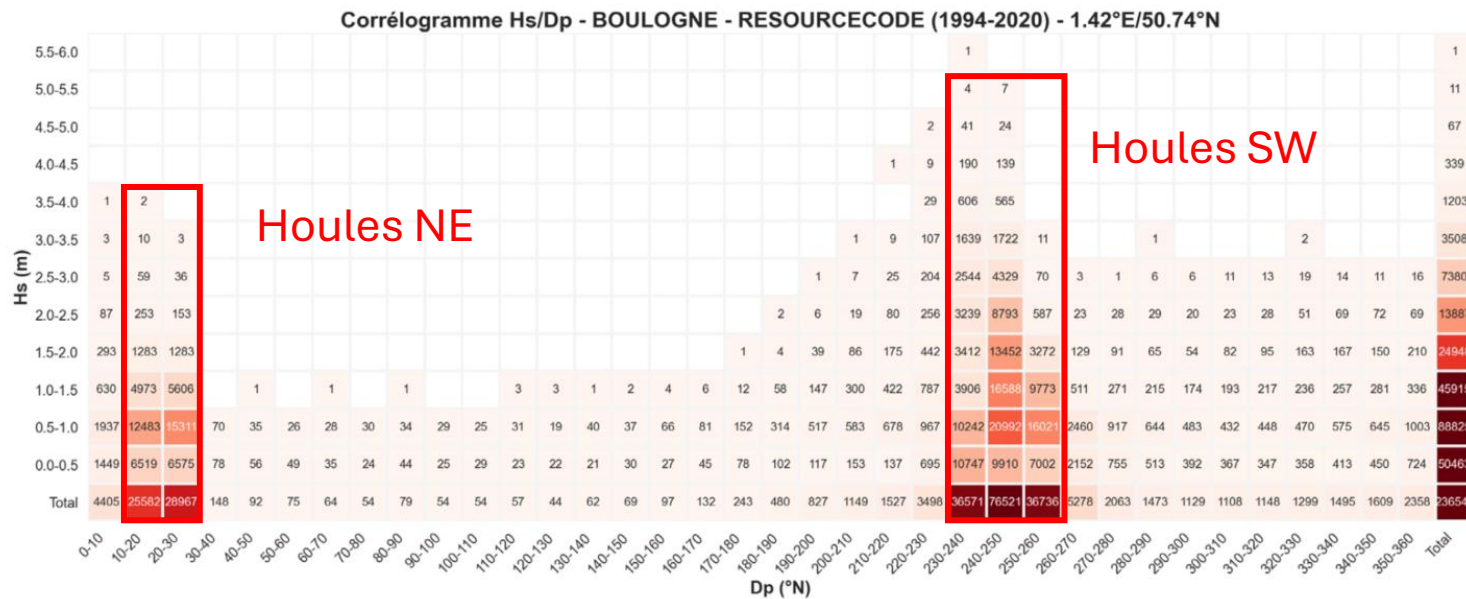
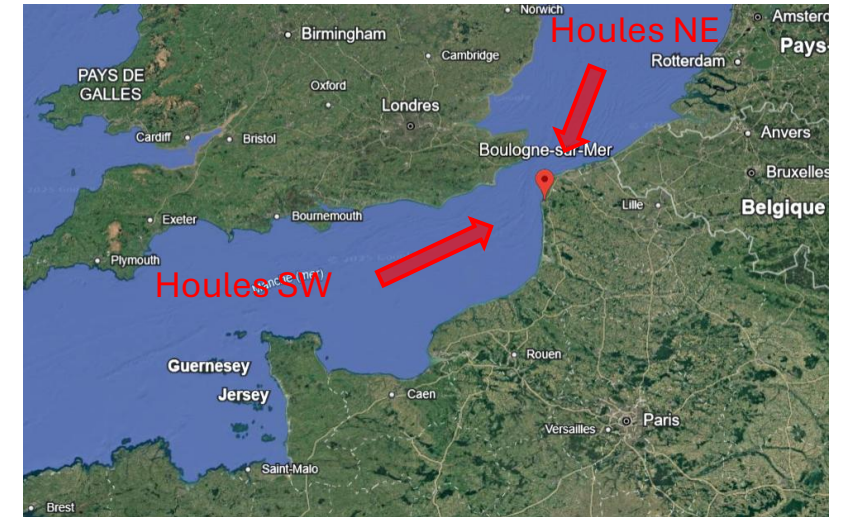
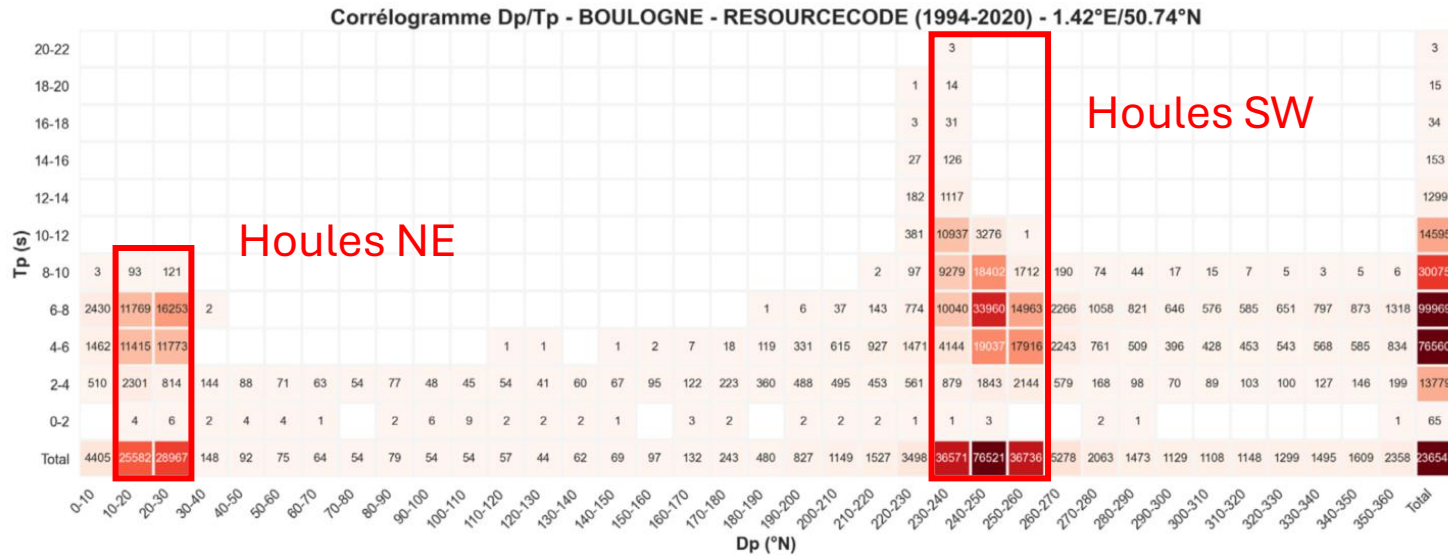
Conditions métocéan



Localisation du point d'extraction RESOURCECODE



Conditions métocéan



Emplacement du pilote

Juin 2024 : ETUDE DE PROPAGATION DE LA HOULE A BOULOGNE-SUR-MER



Objectif : déterminer l'emplacement des 3 modules qui maximise la production électrique

Recherche de l'emplacement qui minimise l'incidence de la houle pour :

- Maximiser la conversion électrique
- Limiter les efforts latéraux sur les modules

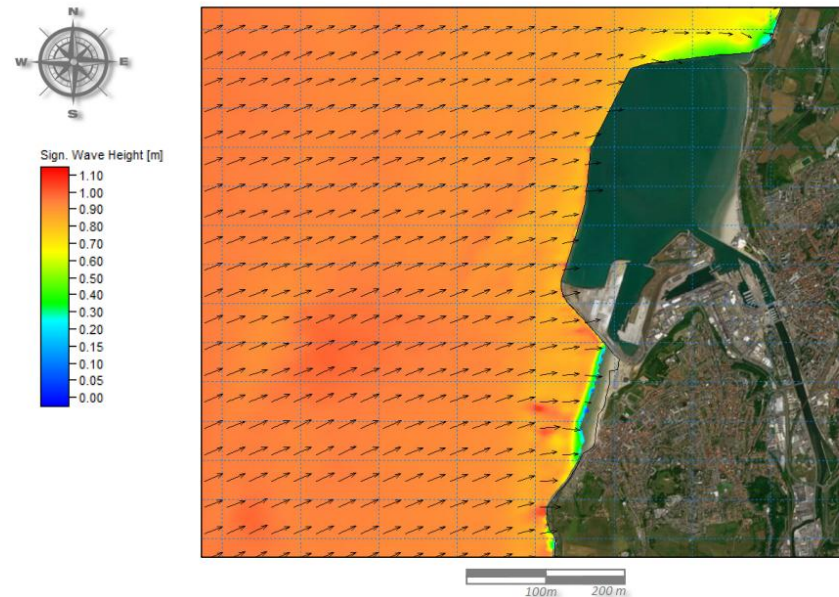


Linéaire étudié

Segment 17

Caractéristiques de la houle au large:
Hs=1m, Tp=8s, Dp=245°N, Niveau Moyen

Figure M3



Segment	Angle d'incidence des houles les plus fréquentes (°)	Angle d'incidence maximal sur l'ensemble des cas testés (°)
0	12	24
1	10	22
2	9	21
3	7	19
4	4	16
5	3	15
6	3	9
7	4	16
8	3	15
9	2	13
10	2	13
11	5	18
12	3	14
13	3	13
14	4	15
15	3	13
16	3	12
17	1	10
18	3	12
19	6	15

Scénarios de dimensionnement

Hypothèses pour scenario centennal :

- H_s (hauteur de vague significative) : 6 m (Tr 100 ans)
- T_p : 10 s
- h (hauteur d'eau) : 9.00 mCM (PMVE)
- Surcote : 60cm (Tr 1 an)
- Montée des eaux : 30 cm



Scénario période de retour centennale avant propagation :

- $H_s = 6$ m
- $T_p = 10$ s
- $h = 9.90$ mCM
- $D_n = 245^\circ$



Scénario période de retour centennale propagé à l'ouvrage:

Segment	H_s moyen (période de retour 100 ans) (m)	H_{max} (période de retour 100 ans) (m)	Angle d'incidence à la normale du segment ($^\circ$)
0	4.6	7.4	10
1	4.6	7.7	8
2	4.7	7.8	6
3	4.7	7.0	5
4	4.7	7.0	3
5	4.8	7.1	1
6	4.7	6.8	2
7	4.7	7.9	0
8	4.8	7.1	1
9	4.7	7.2	0
10	4.8	7.0	0
11	4.8	8.6	3
12	4.7	7.1	0
13	4.9	6.5	0
14	4.7	7.8	6
15	4.9	7.4	6
16	4.9	7.5	6
17	4.8	7.4	4
18	4.7	7.9	6
19	4.7	8.0	9

$H_{max} = 7.9$ m retenue

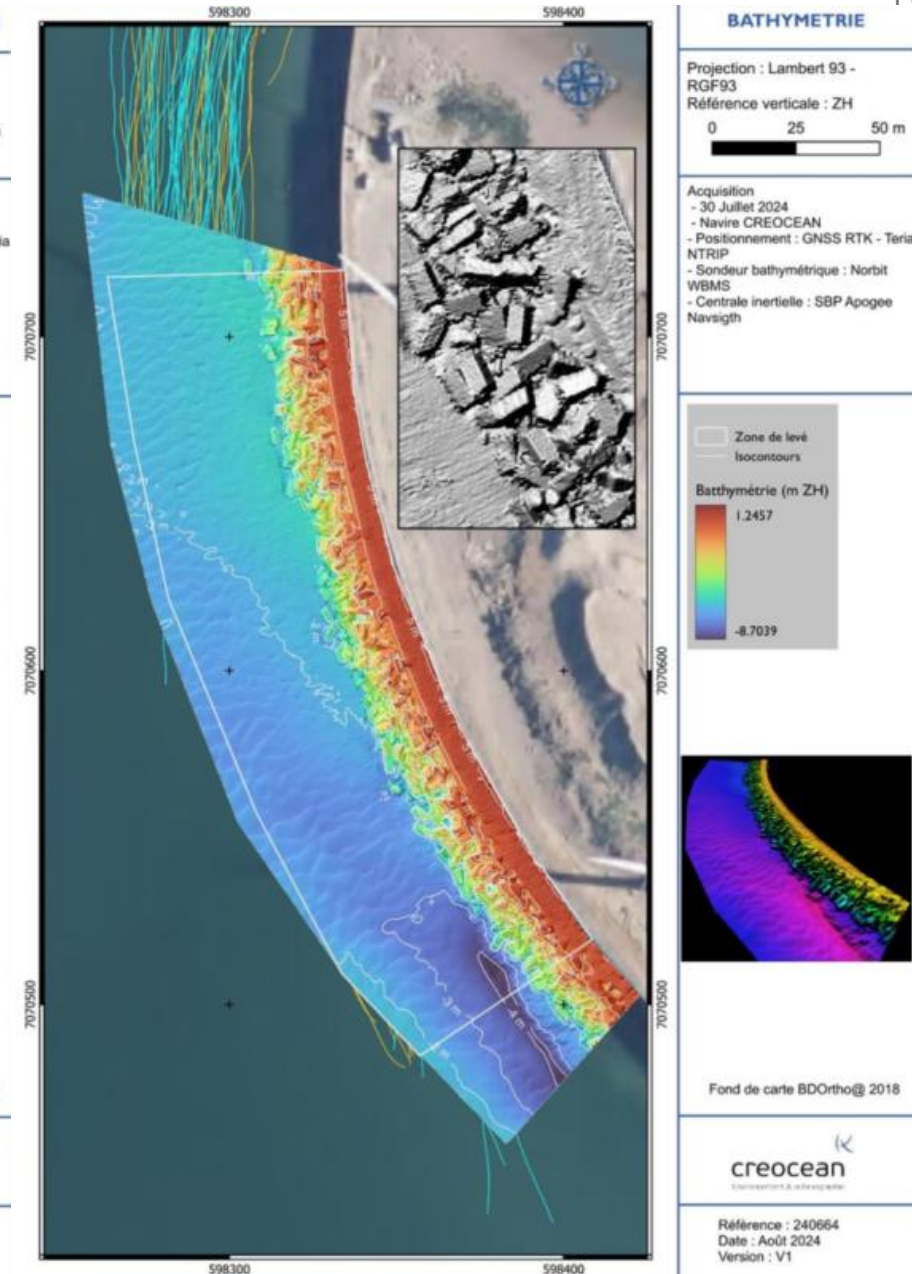
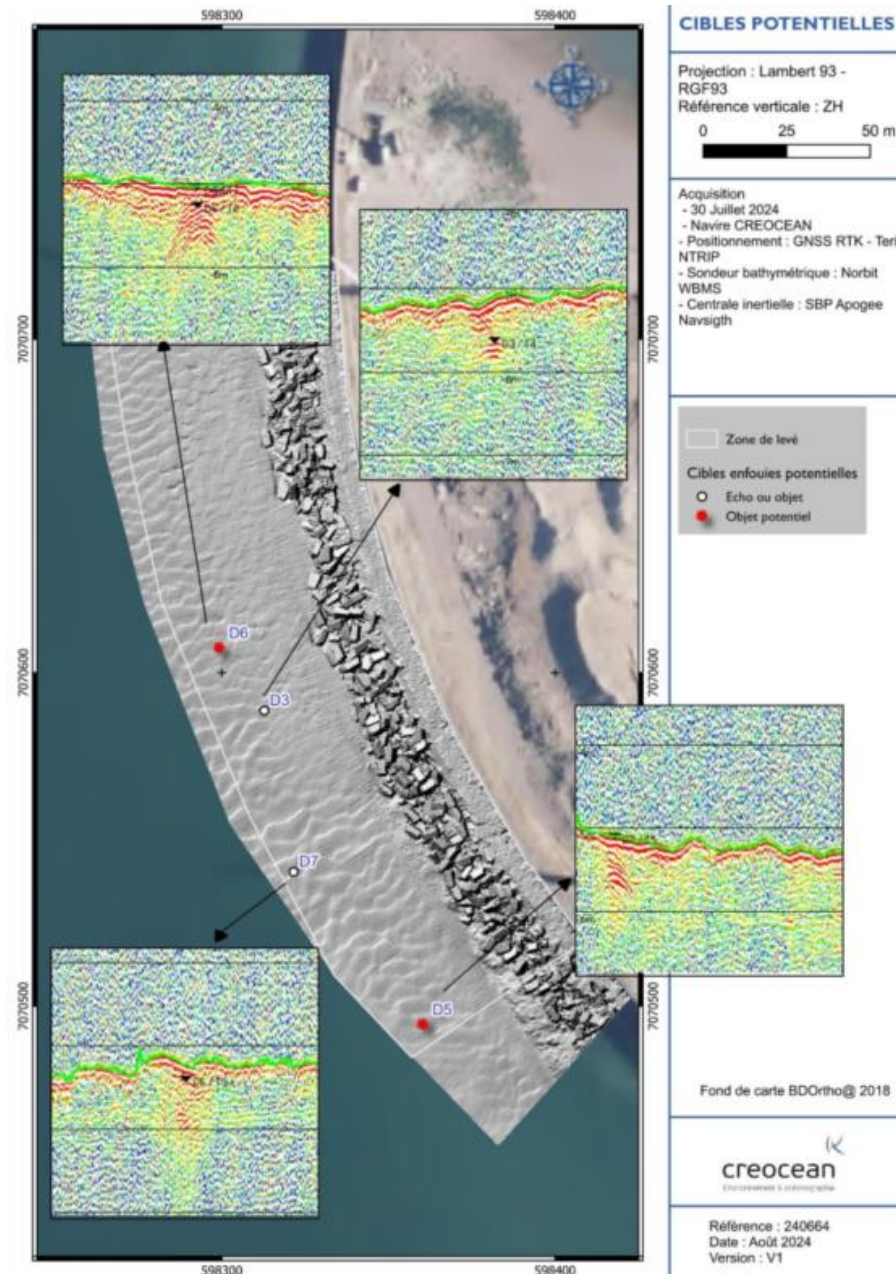
Géotechnique


creocean

Juin 2024 : Campagne
géophysique

Équipement :

- Sondeur de sédiments 3D
- Sondeur bathymétrique multifaisceaux



Géotechnique

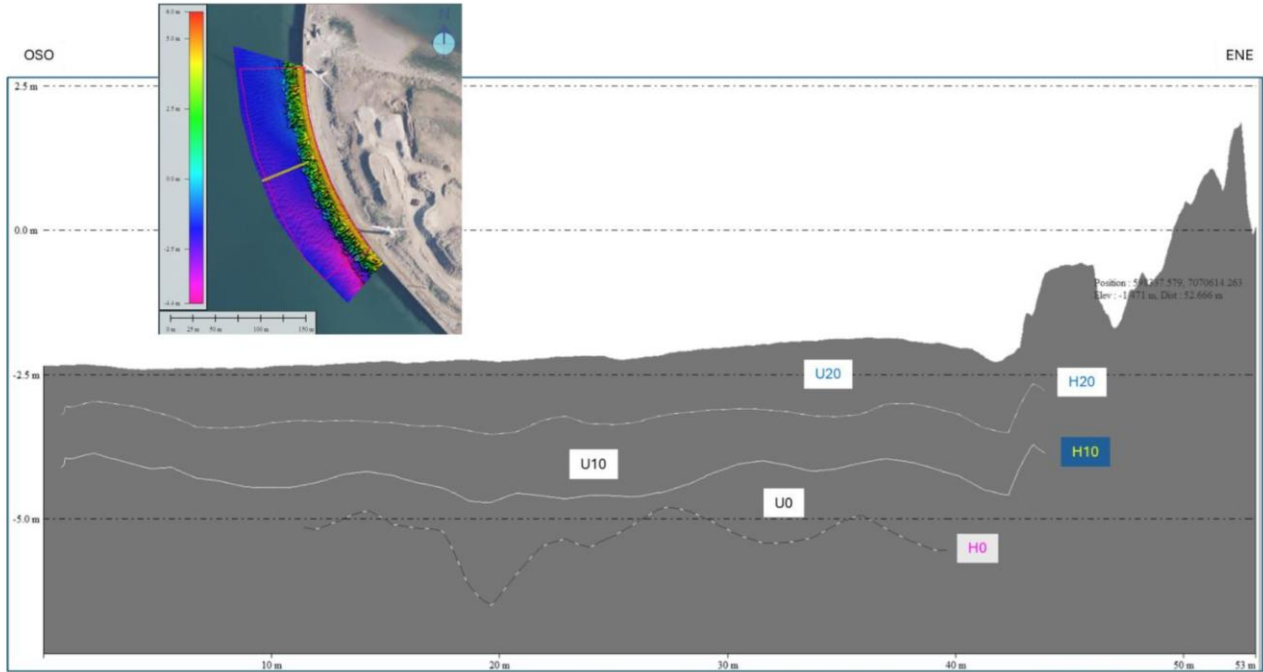
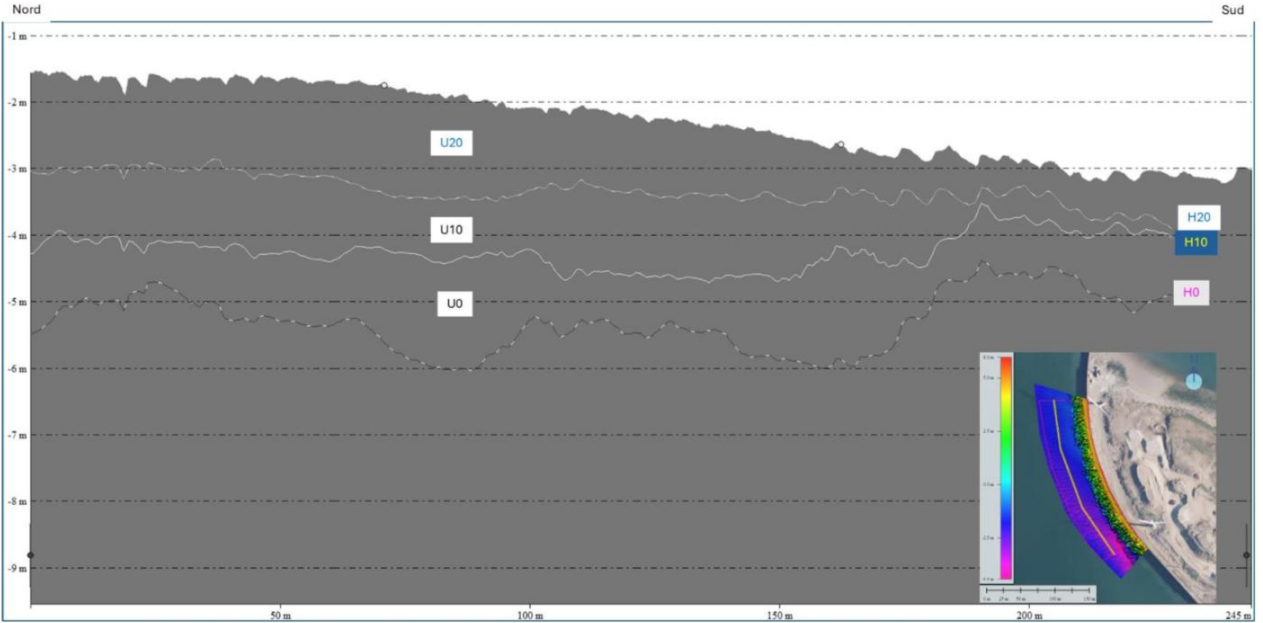
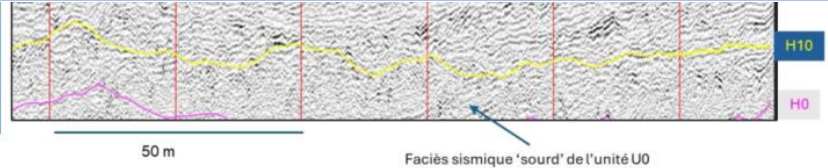


creocean

Juin 2024 : Campagne géophysique



Horizon	Unité	Caractéristiques	Nature potentielle	Epaisseur
Fond marin				
	U20 (Figure 18)	Enchevêtrement/Superposition de structure en lentille et faciès sismique lité parallèle	Sable fin	0 à 2.4 m
H20		Surface érosive		
	U10 (Figure 19)	Faciès lité à chaotique	Sable fin grossier	à 0 à 1.6 m
H10		-		
	U0 (Figure 20)	Faciès non visible – réflecteurs discontinus localement		Minimum : 0 à 2.8 m
H0		-	Supposé sableux au regard des informations existantes à proximité – possibilité de présence de grès	

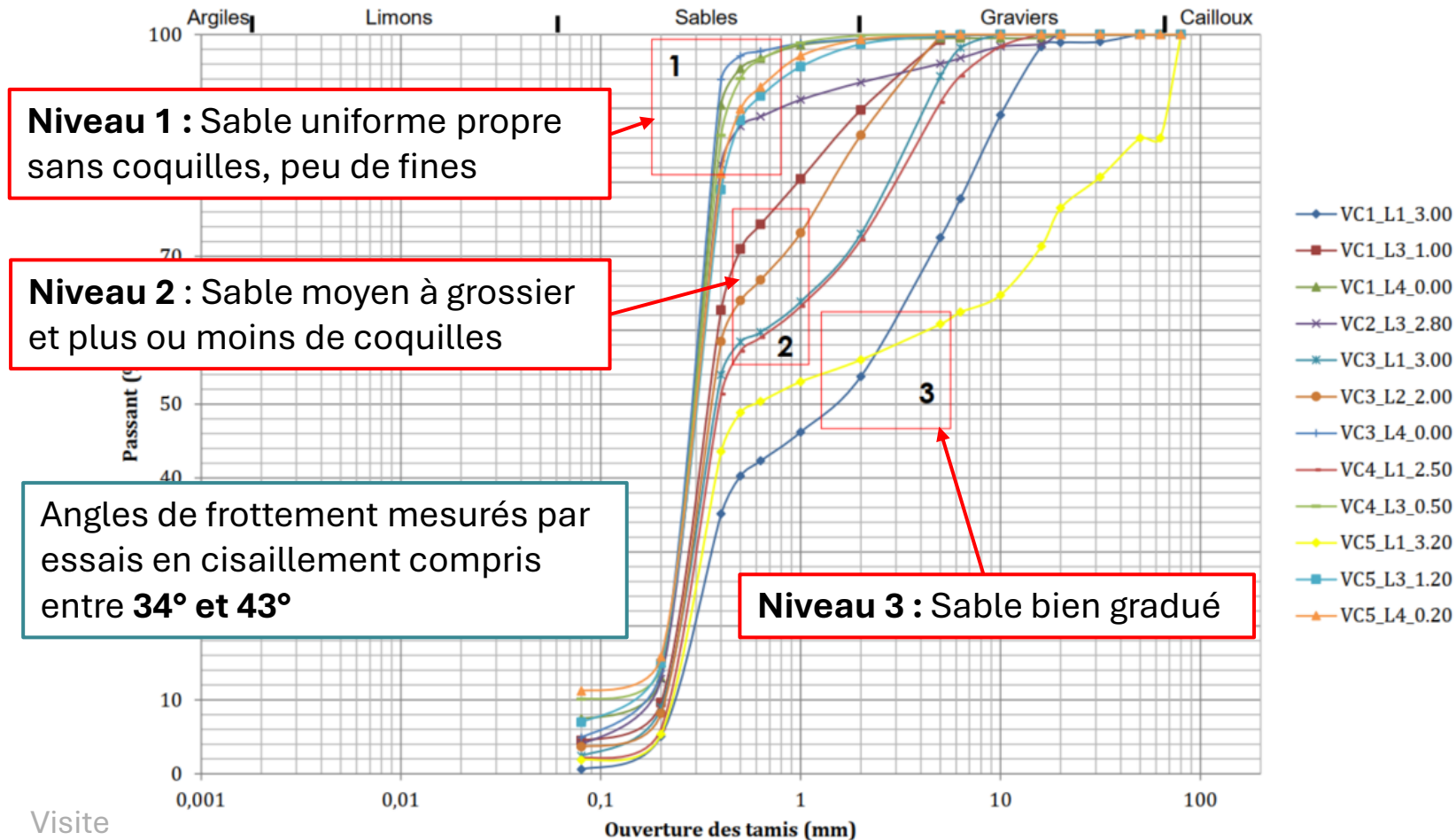
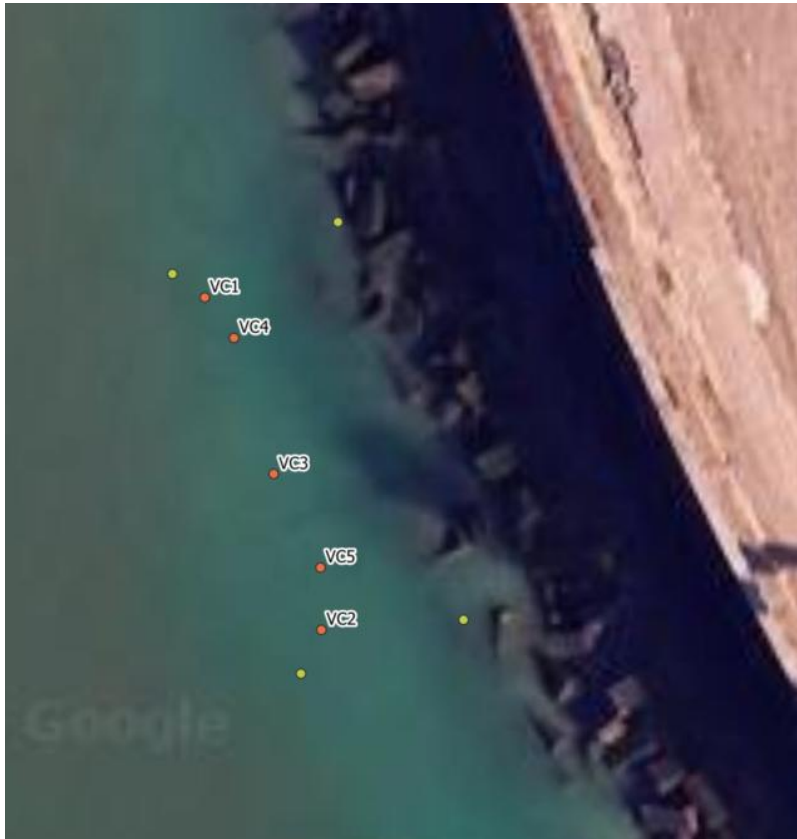


Géotechnique

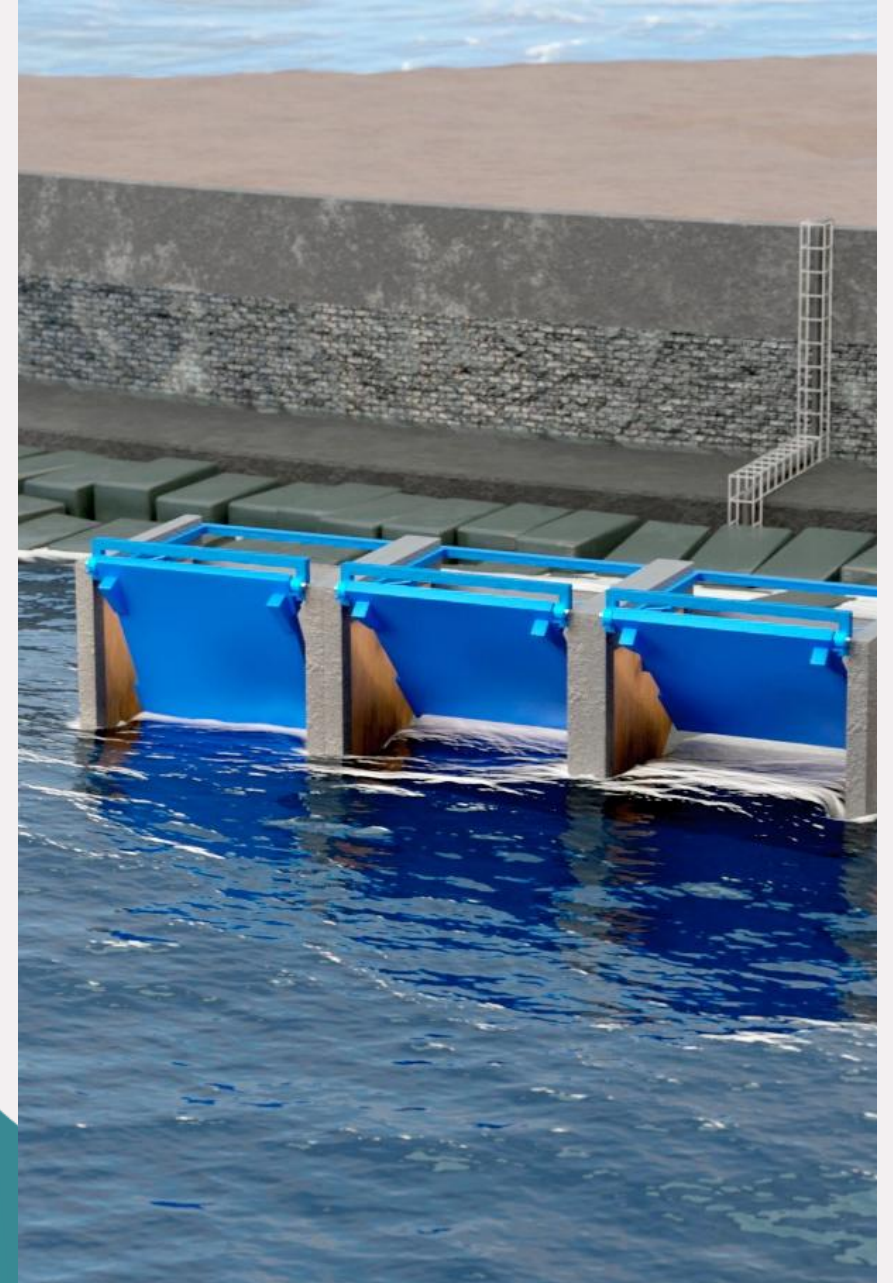


Avril 2025 : Campagne géotechnique

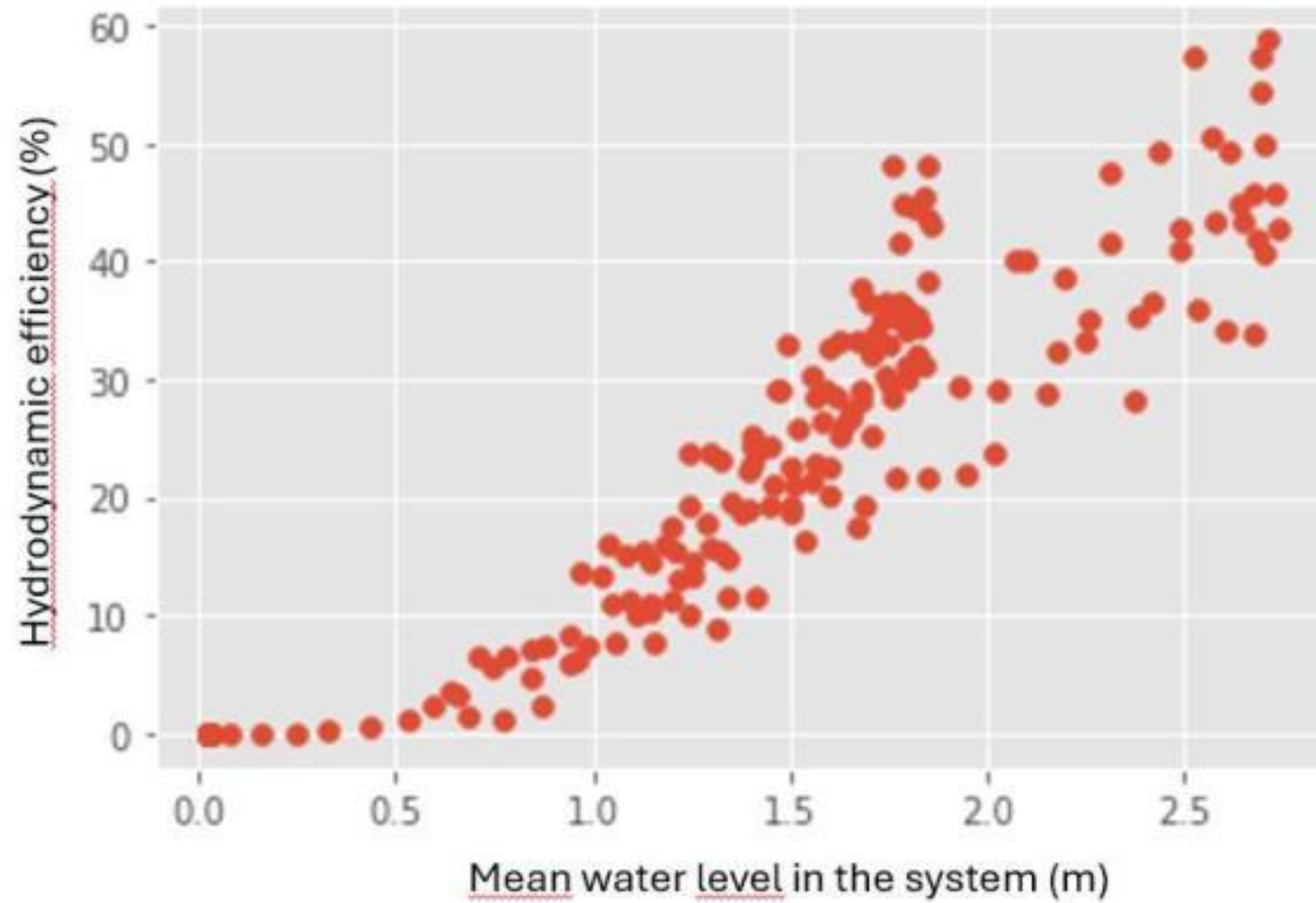
- 5 sondages carottés au vibrocore.
- Refus entre 3,5 et 5,8m par rapport au fond bathymétrique.
- Analyses de laboratoire réalisés sur des échantillons prélevés dans les sondages



Calcul du potentiel houlomoteur



Résultats de Dikwe phase 2



Principe de la modélisation

Couplage fort entre vagues et volet mobile

Outil modélisation dynamique

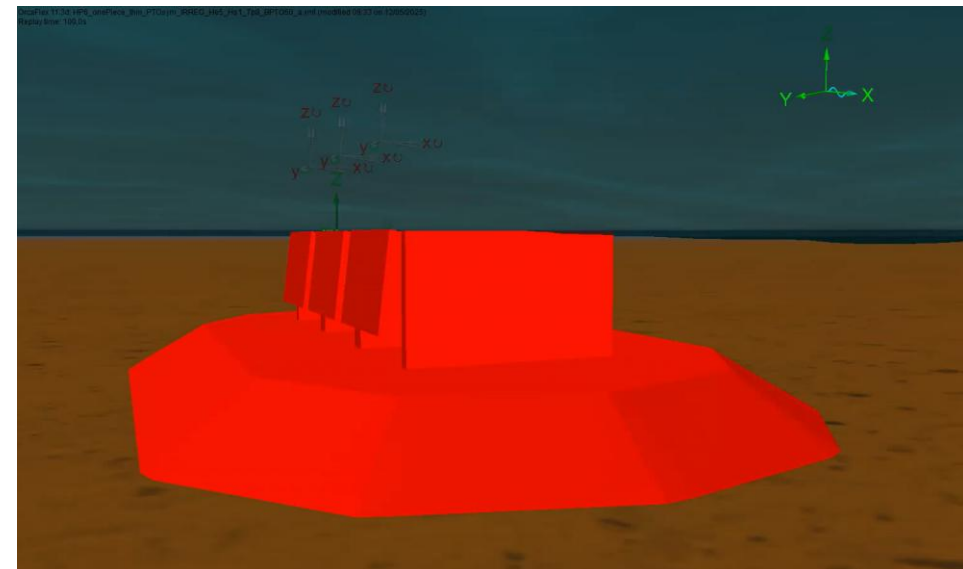
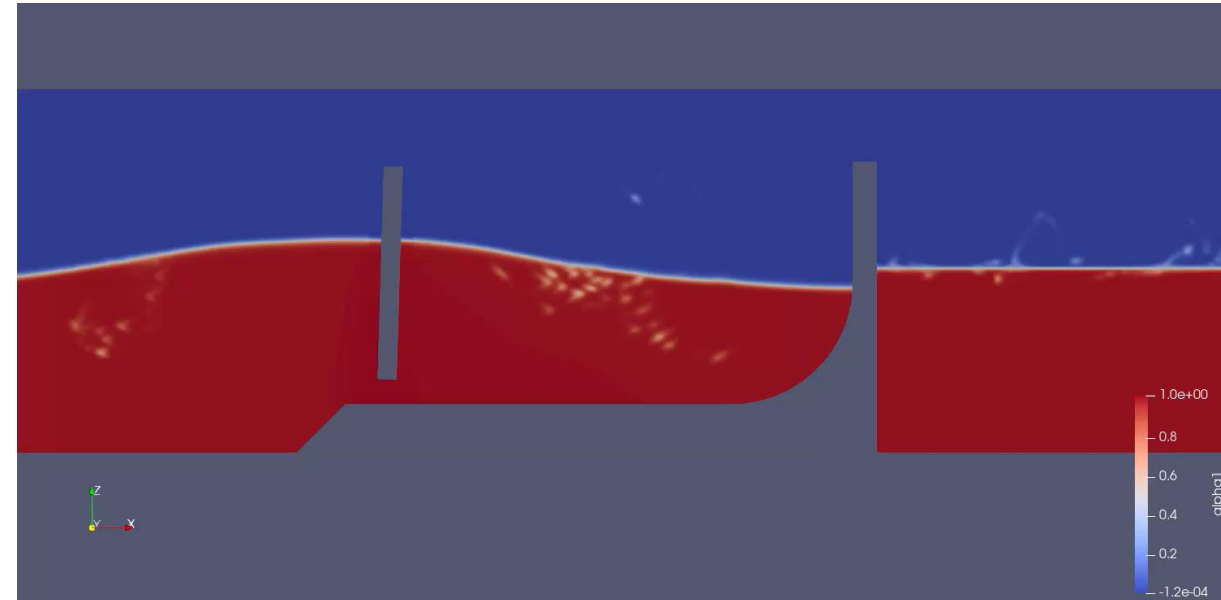
Simulation fine de tous les mouvements du fluide

→ complexe et coûteuse

Code « potentiel »

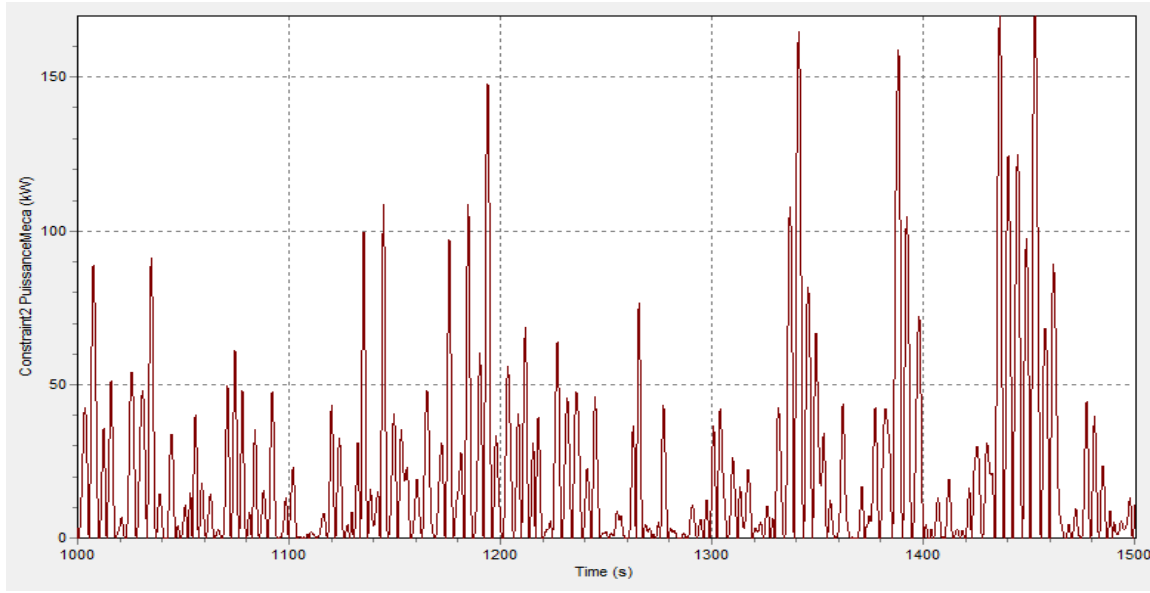
Hypothèse :

- Fluide parfait
- Petits angles
- Comportement linéaire

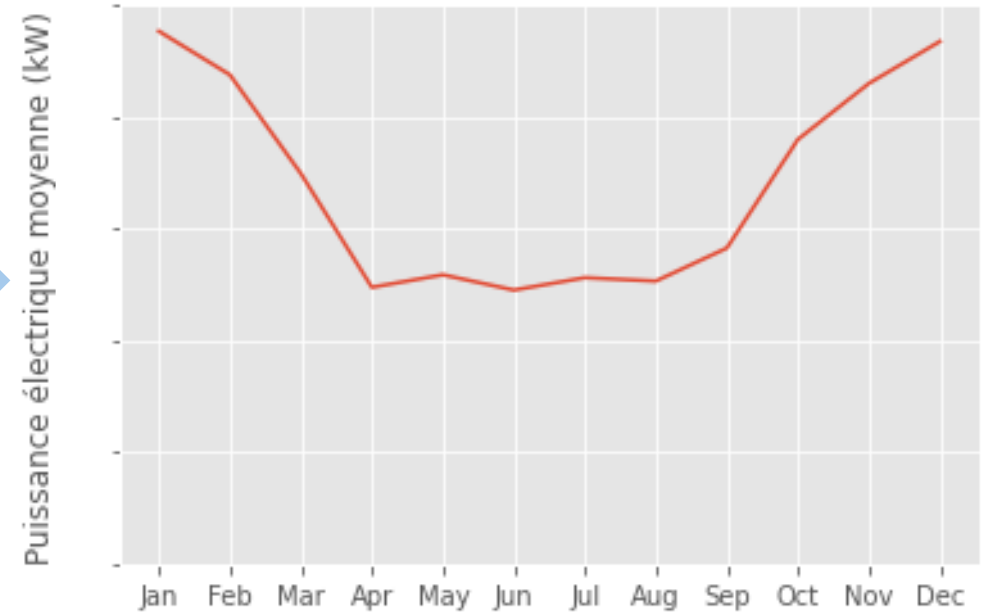
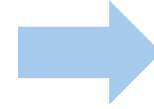


Calcul du potentiel énergétique

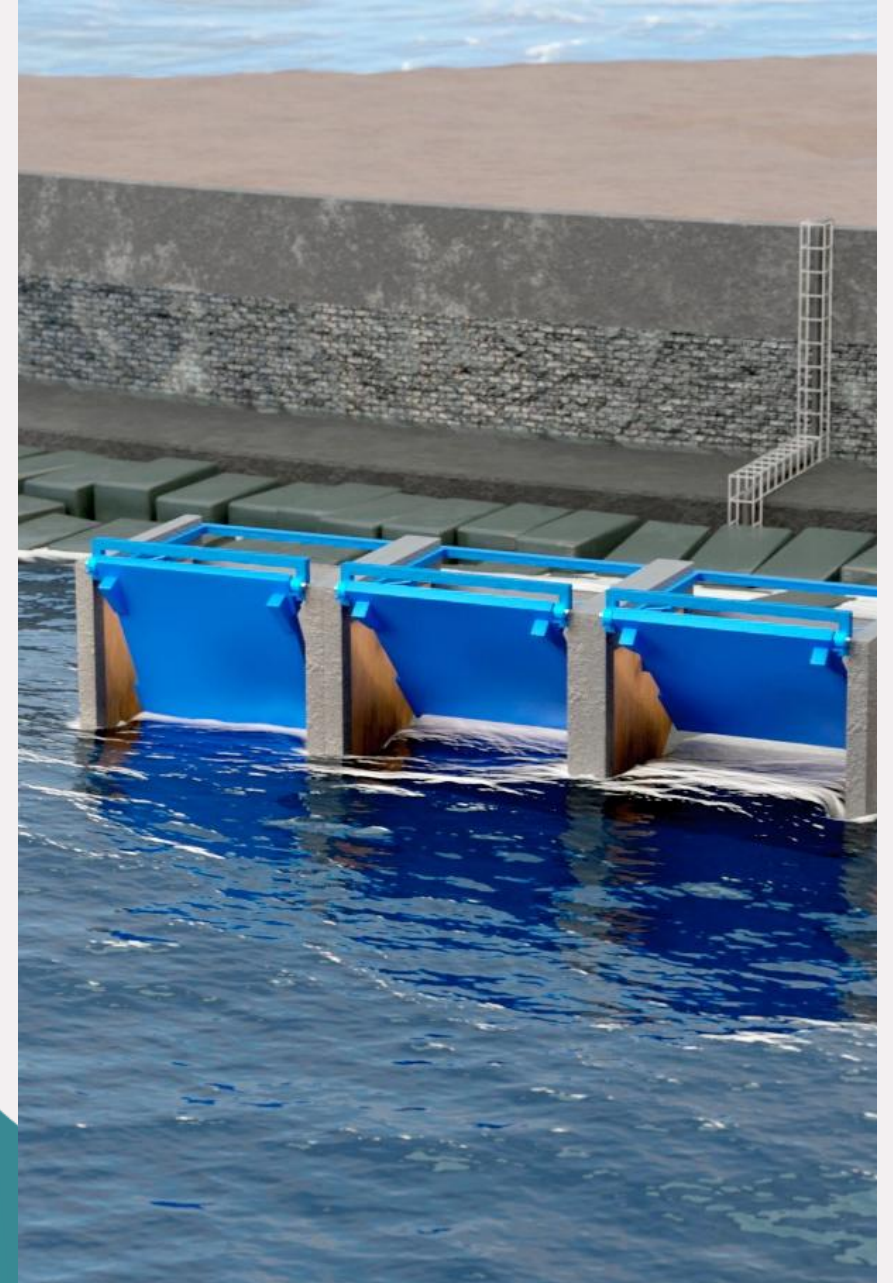
$$\text{Couple}_{PTO} \times \text{Vitesse} = \text{Puissance}$$



Ressource code (Base de données de rejeux d'état de mer fait par l'Ifremer) : de 1994 à 2020

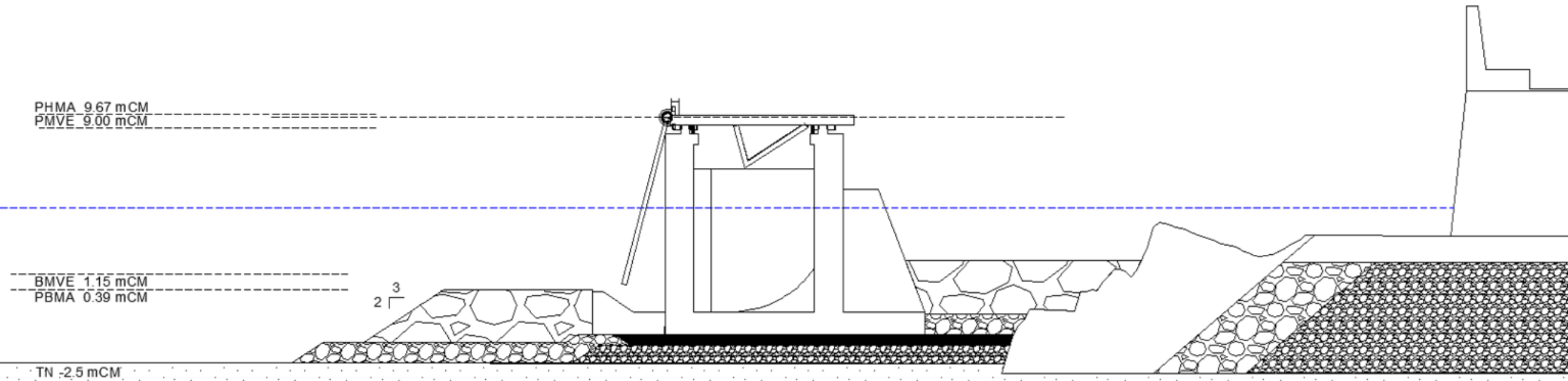


Conception des modules

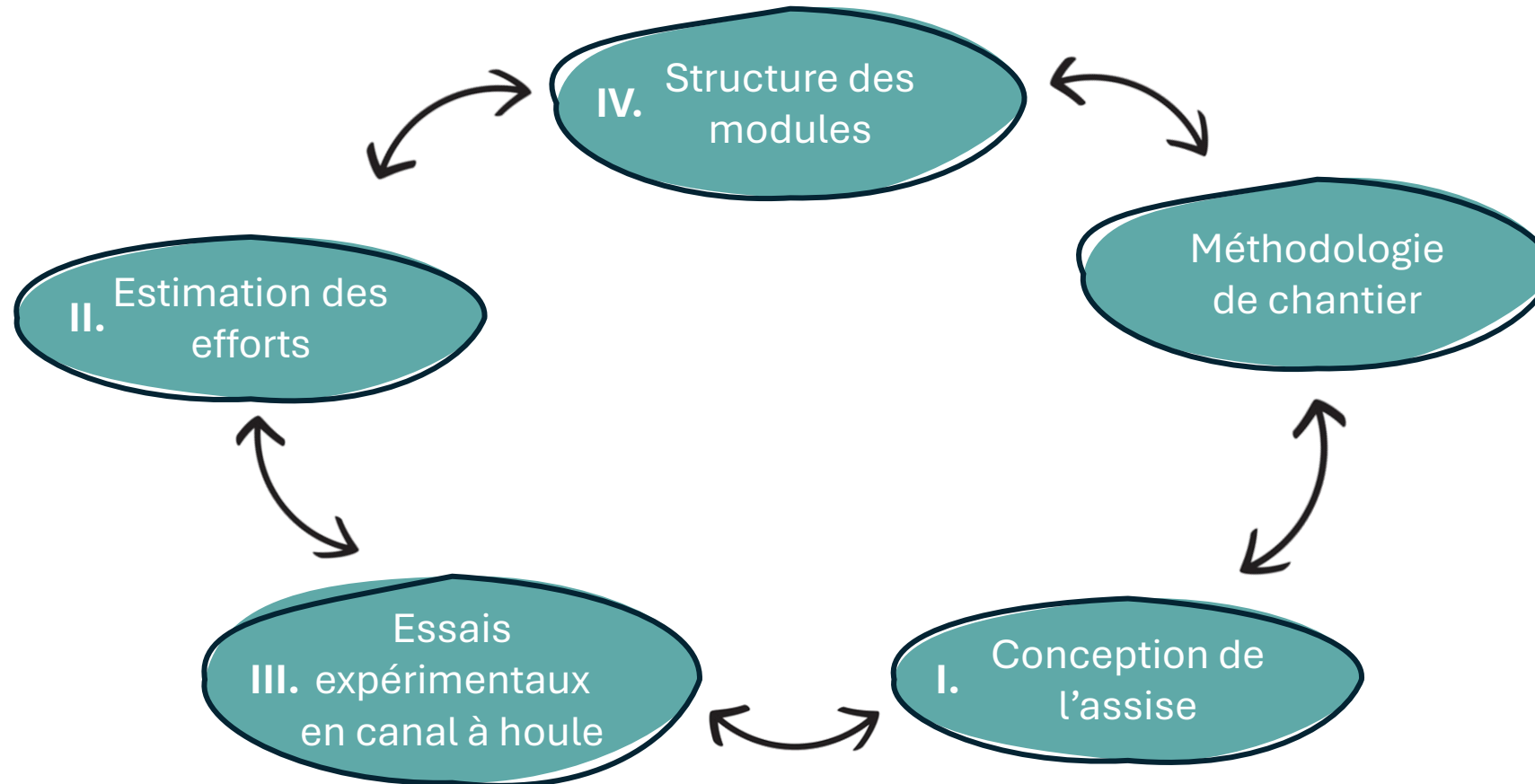


Géométrie de la solution

- Modules de 10m de haut, 7m de large
- Flap constamment immergé
- Installation au plus proche du talus
- Installation sur assise granulaire



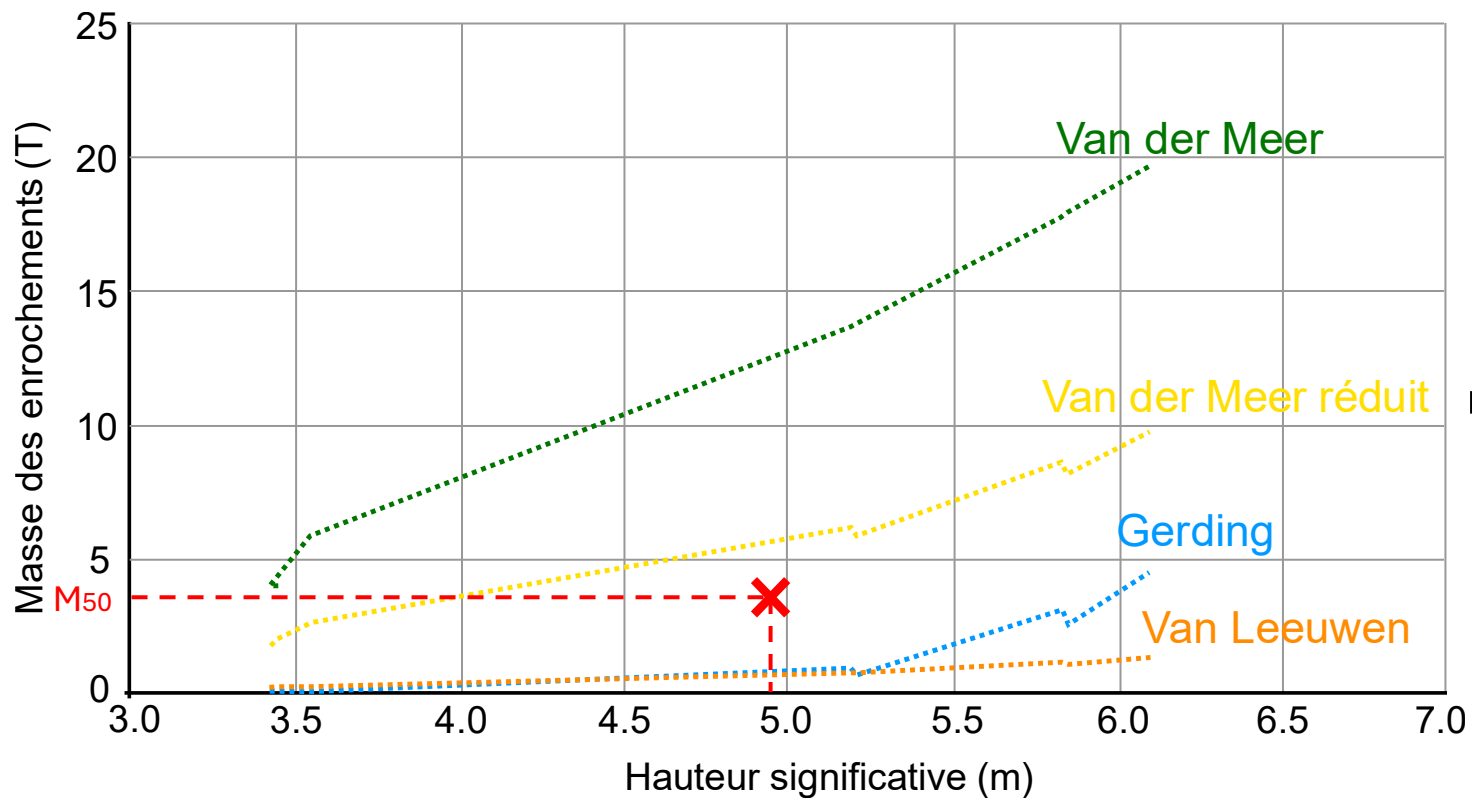
Conception de la solution



Conception de l'assise

GUIDE ENROCHEMENT

Dimensionnement de la carapace de la protection anti-affouillement



Choix de conception : carapace **en 2.4 – 4.8 T**



Dimensionnement des couches filtres et des couches d'assise selon les règles de stabilité et de perméabilité du guide enrochement.

Conception de l'assise

Elévation au centre d'un module

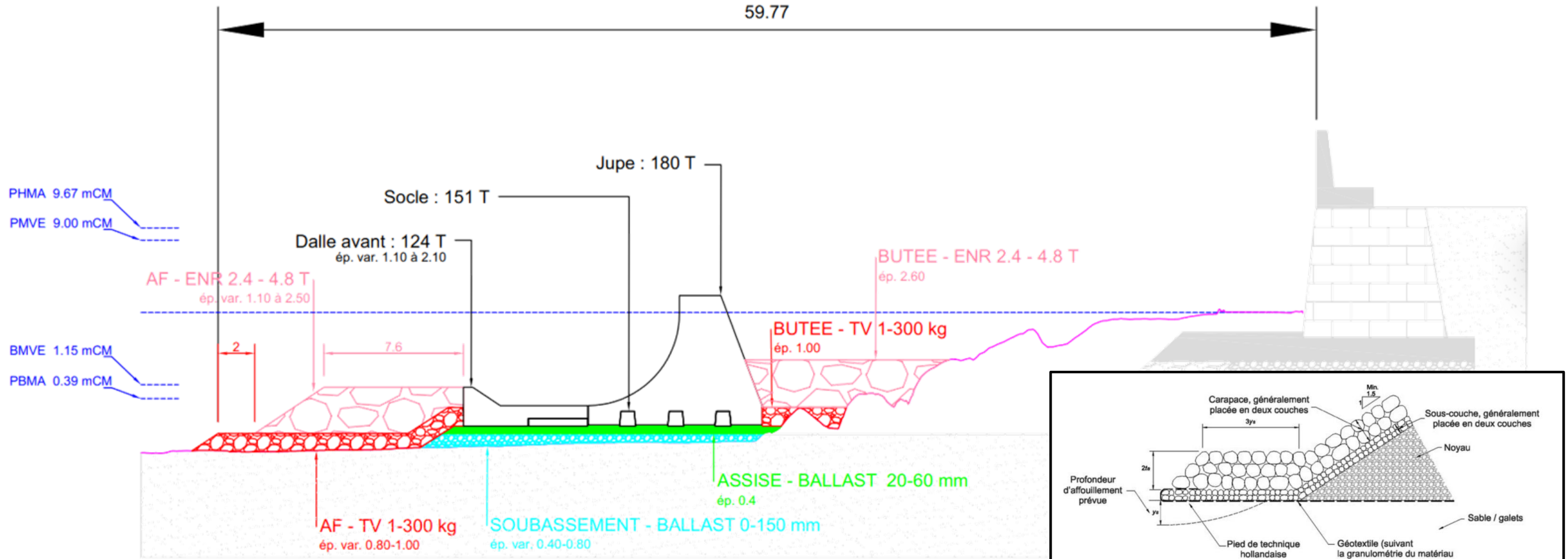


Figure 6.64 Détail d'un pied - 3d Fort potentiel d'affouillement, pas d'excavation

Géotechnique

Vérification de la capacité portante de l'assise

EN1997-1 ANNEXE D.4

Contrainte de rupture



Surcharge



$$q_u = 0.5\gamma'(B - 2e)N_\gamma i_\gamma + qN_q i_q$$

Angle de frottement interne



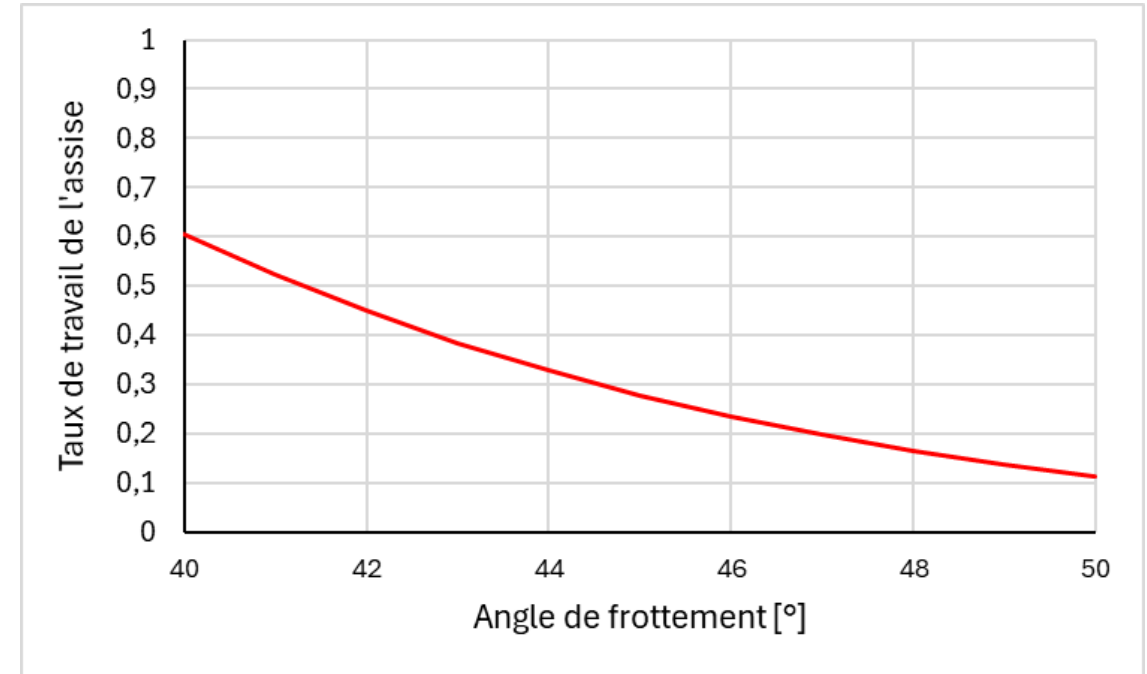
$$N_q = e^{\pi \tan \varphi_a} \tan^2(\pi/4 + \varphi_a/2)$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \varphi_a$$

$$i_q = (1 - \tan \theta)^2$$

$$i_\gamma = (1 - \tan \theta)^3$$

Inclinaison de la charge



Géotechnique

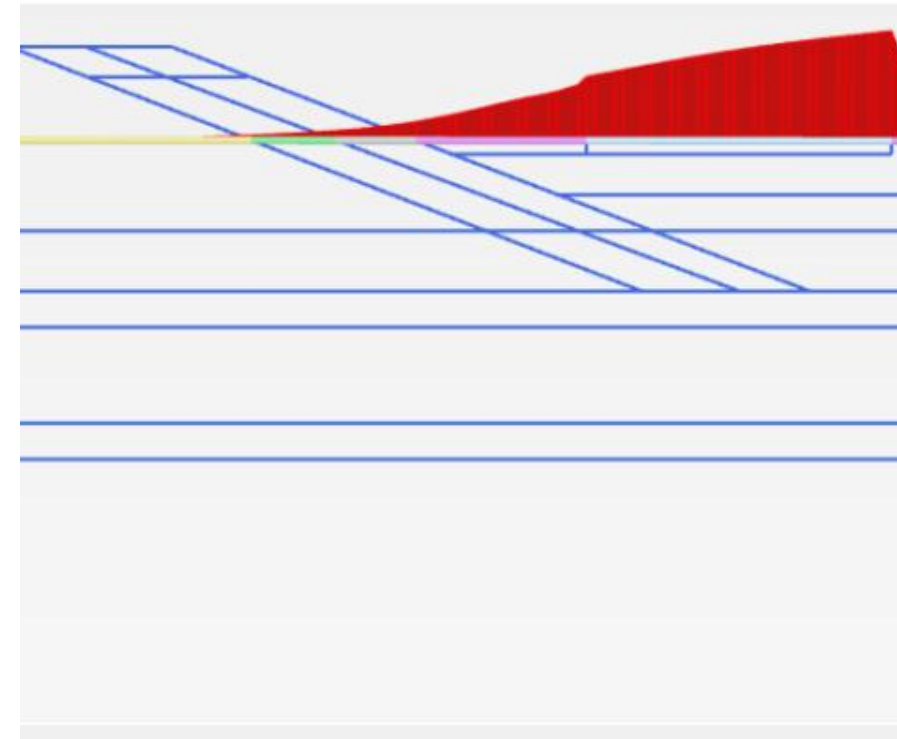
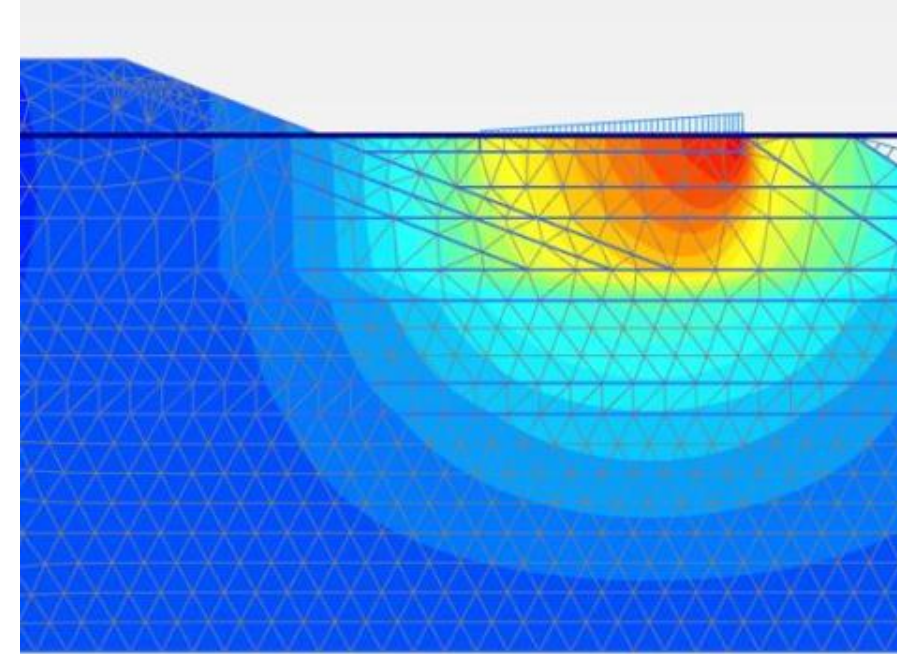
Calculs de stabilité géotechniques



Objectifs :

- Stabilité aux grands glissements
- Tassements de consolidation
- Interaction assise / digue Carnot

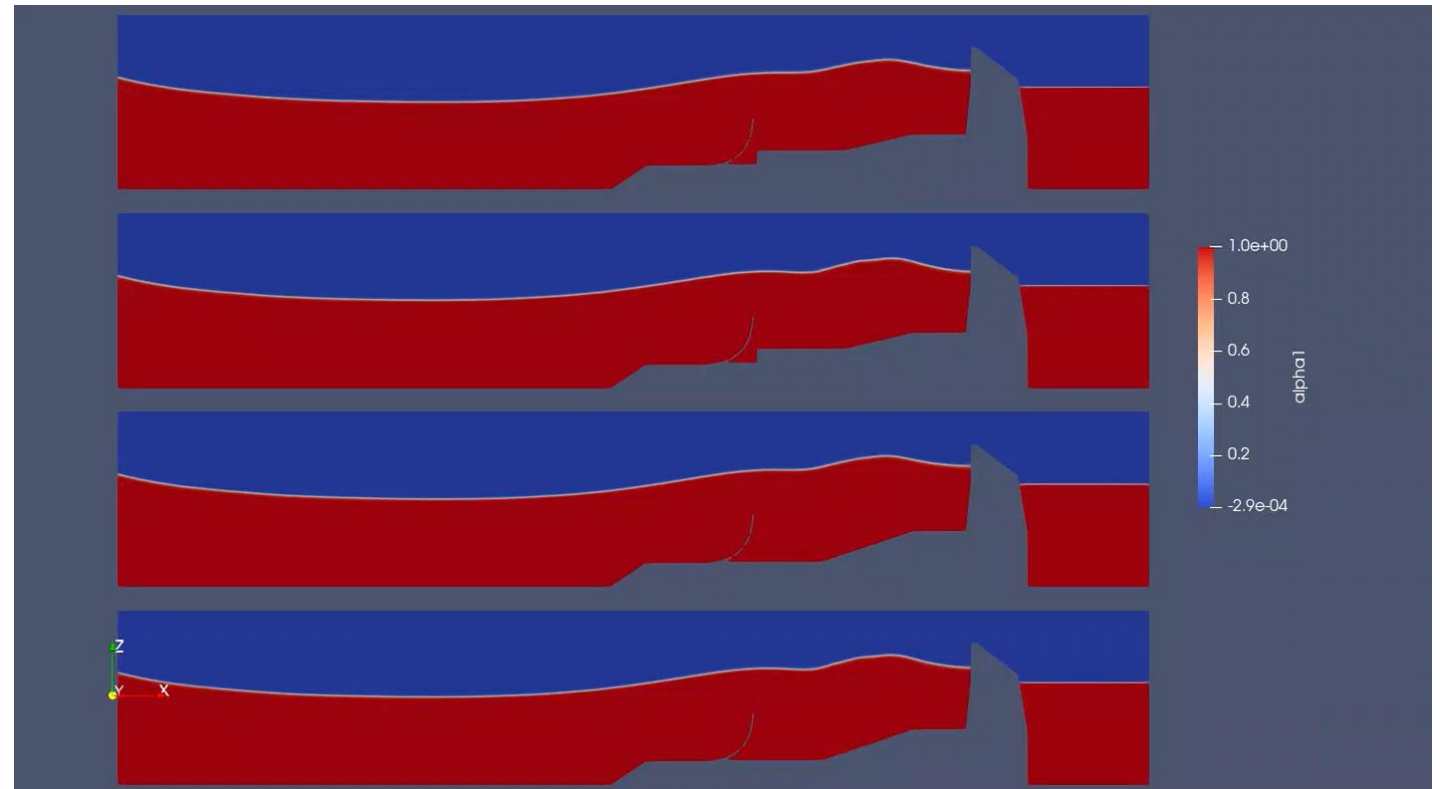
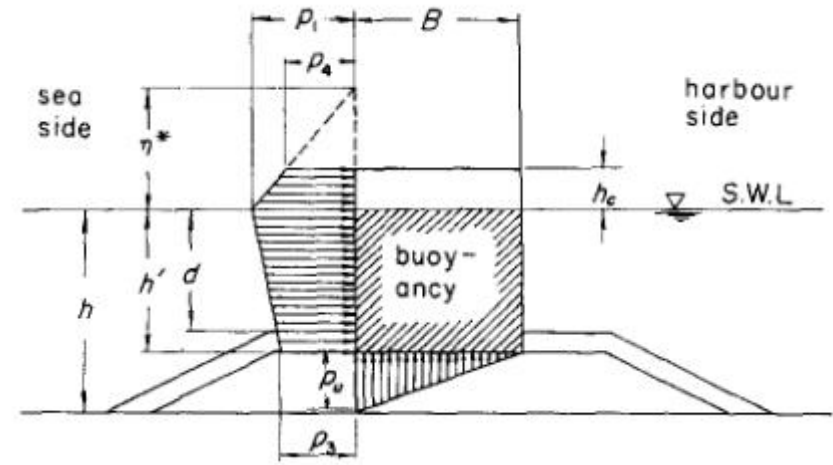
- ➔ Tous les facteurs de sécurité obtenus en phase d'exploitation > 1.0
- ➔ Tassement instantané : 4 cm
Tassement différé : 20.2 cm
- ➔ Distorsion angulaire maximale sous les modules $\sim 1/300$
- ➔ Validation du renforcement de la digue Carnot par l'assise



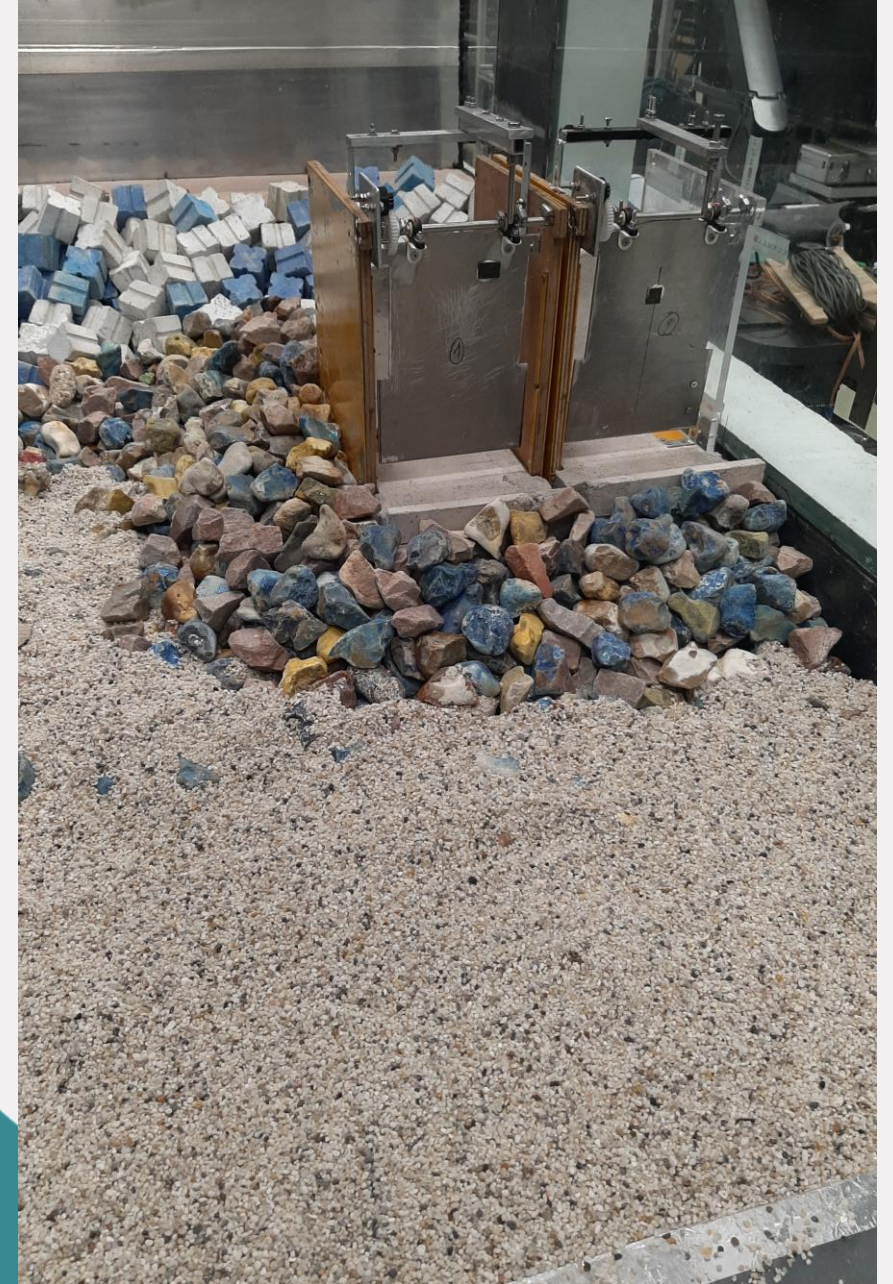
Efforts de houle extrêmes

- Modèle GODA
- Outils de modélisation dynamique (CFD) en 2D
 - 1 vague de design
 - Avec ou sans volet

Optimisation de la structure



**Validation
expérimentale.**

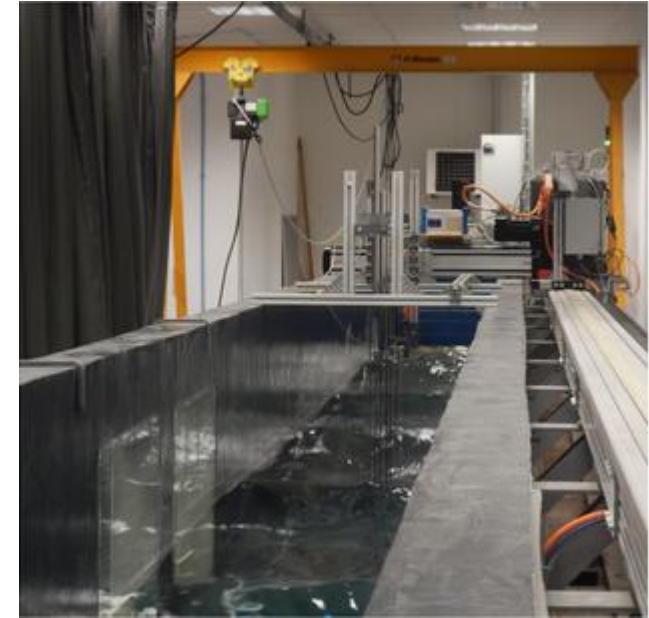


Validation expérimentale

2 campagnes d'une semaine au LOMC au Havre

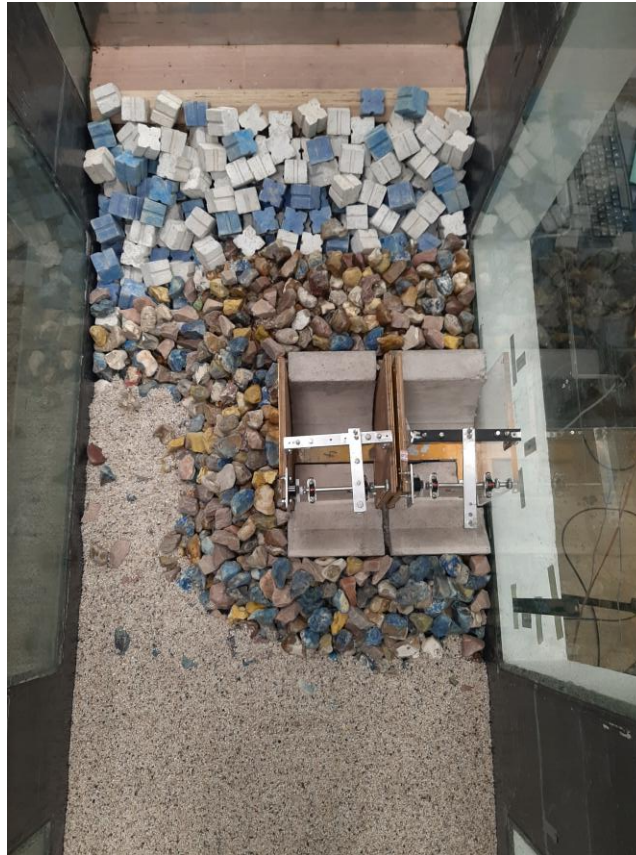
Canal :

- 35 m * 0.9 m * 1.2 m
 - Batteur capable de faire des vagues d'environ 25cm
-
- Campagne 1 :
 - recherche solution pour la stabilité des modules
 - Campagne 2 :
 - validation de la solution de stabilité
 - validation dimensionnement de l'assise



Description des tests

- Echelle 1/35
- Modélisation de 4 modules par symétrie
- Prise en compte d'effets 3D
- Mesures :
 - Élévation
 - Efforts
 - Mouvements du volet
 - Déplacements des blocs



Campagne 1 :

- Minimum d'environnement autour des modules
 - Digue
 - Assise
- Test de différentes solutions pour s'assurer de la stabilité
 - Réduction surface d'impact des vagues
 - Ajout de bûches
 - Ajout de masse

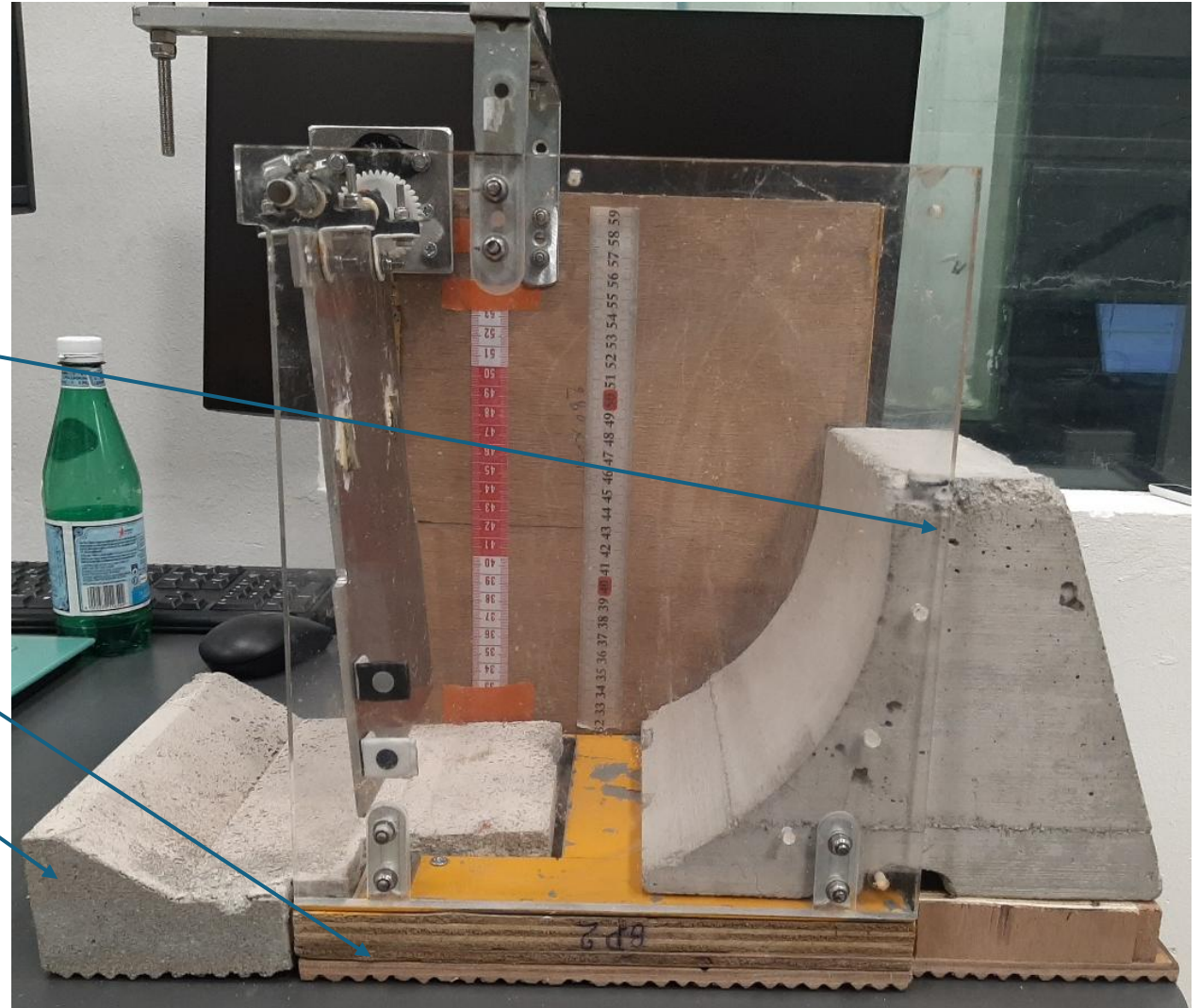


Campagne 2 :

Représentation de la solution retenue lors de la campagne 1:

- Masse
- Indentation

Ajout dalle avant



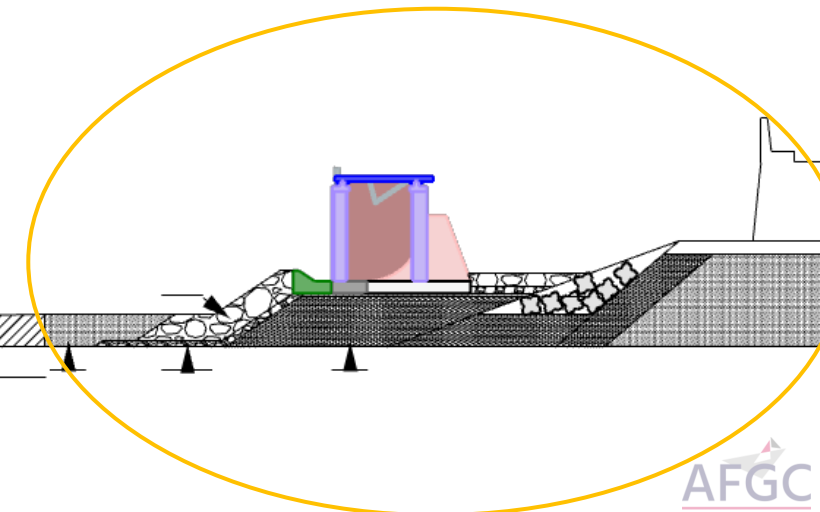
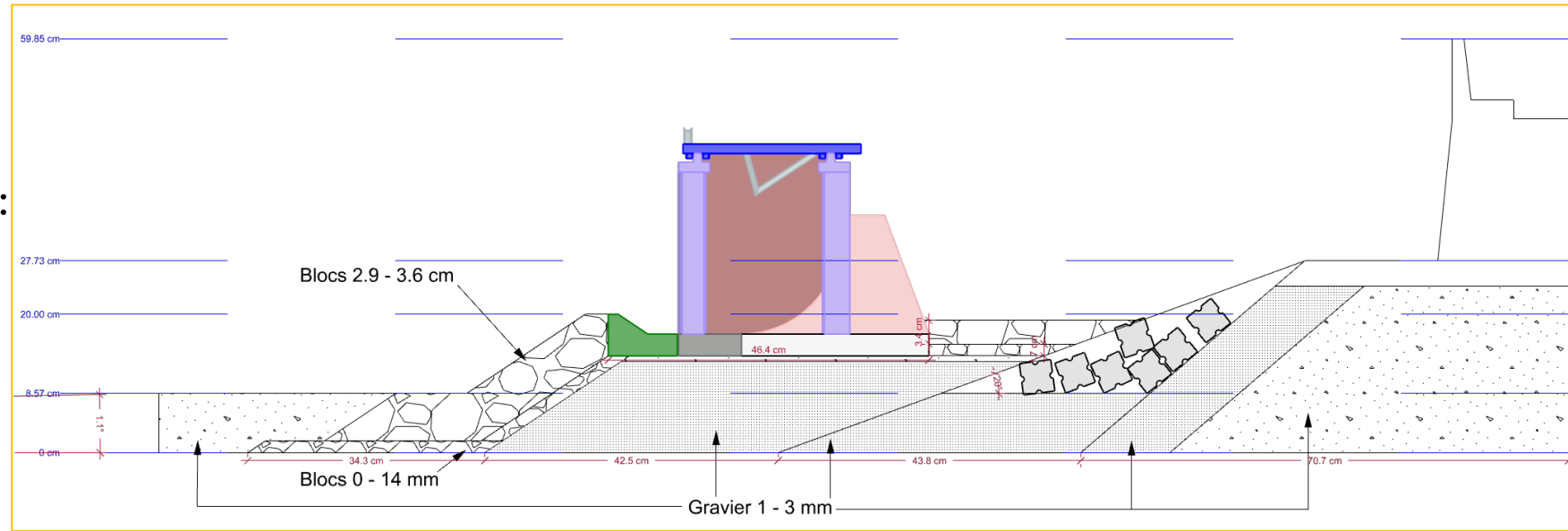
Campagne 2 :

Représentation de la solution retenue lors de la campagne 1:

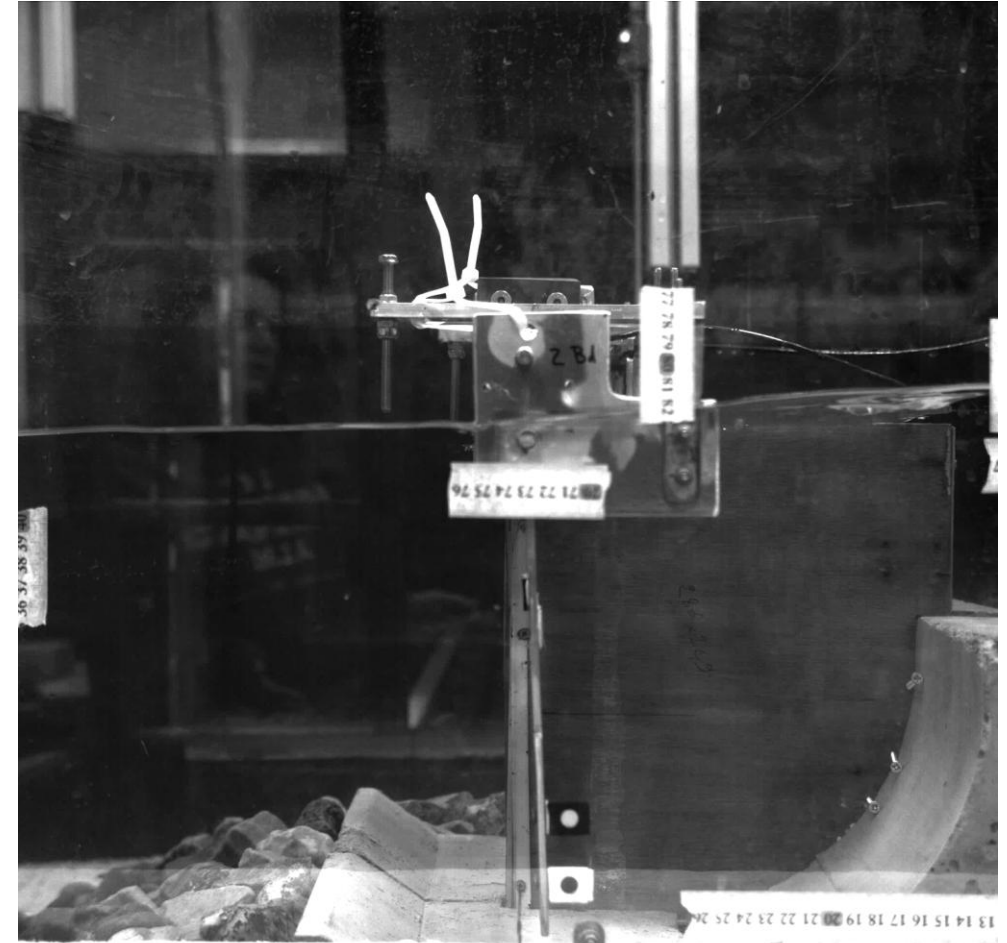
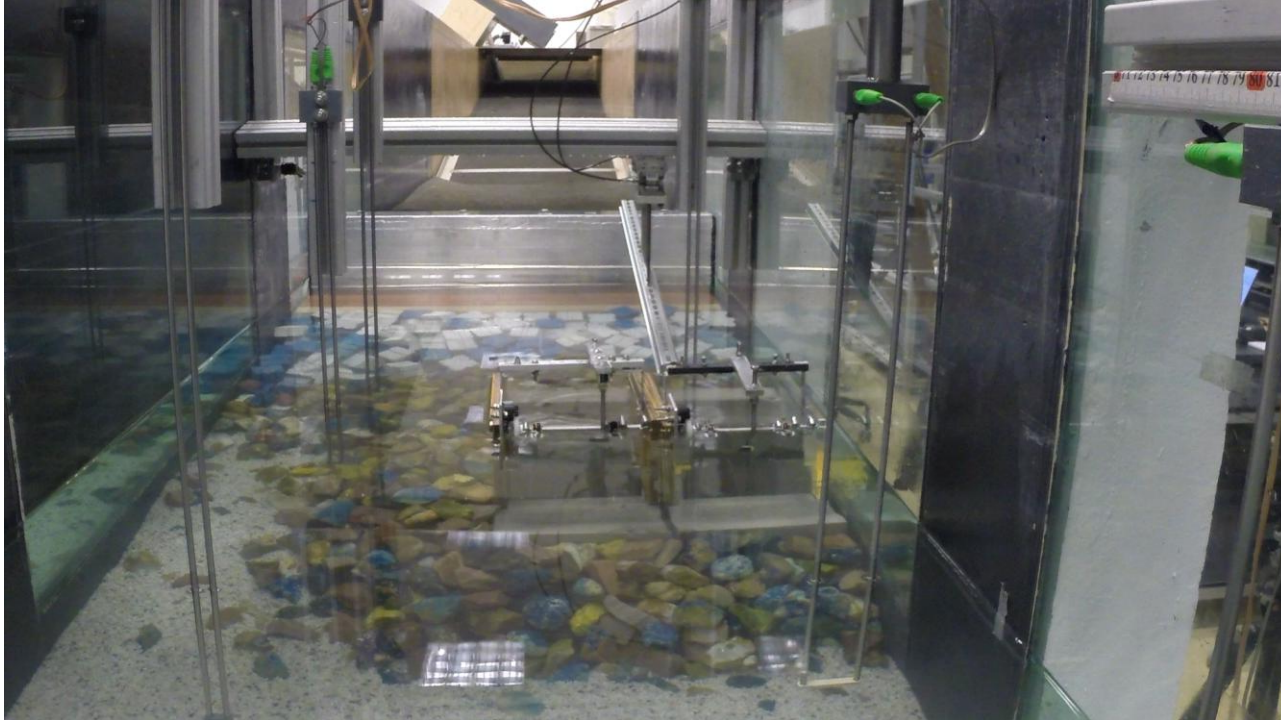
- Masse
- Indentation

Ajout dalle avant

Représentation de la bathymétrie



Tests



Dimensionnement enrochement

	Hs visé à -6 m CM (m)	Hs majorée (m)	Tp (s)	H eau (m CM)
SCENARIO 1	4	4,13	8	9,7
SCENARIO 2	4	4,13	8	10,2
SCENARIO 3	4,9	5,06	10	9,38
SCENARIO 4	4,9	5,06	10	9,88
SCENARIO 5	2,8	2,89	8	0,43
SCENARIO 6	2,9	3,00	8	0,93
SCENARIO 7	3	3,10	11	0,74
SCENARIO 8	3	3,10	11	1,24

Pour tous les scénarios testés :

- Blocs testés sur hypothèse 2.4 T - 4.8 T
 - Pas ou très peu de mouvements de blocs
 - Mouvement notable des blocs positionnés au coin extérieur de la dalle avant
-
- Dimensionnement des blocs **validé**
 - Recommandation chantier de positionner aux coins extérieurs des dalles les blocs les plus gros



Dimensionnement des butés

Mouvement du volet mesurés



Energie cinétique de design

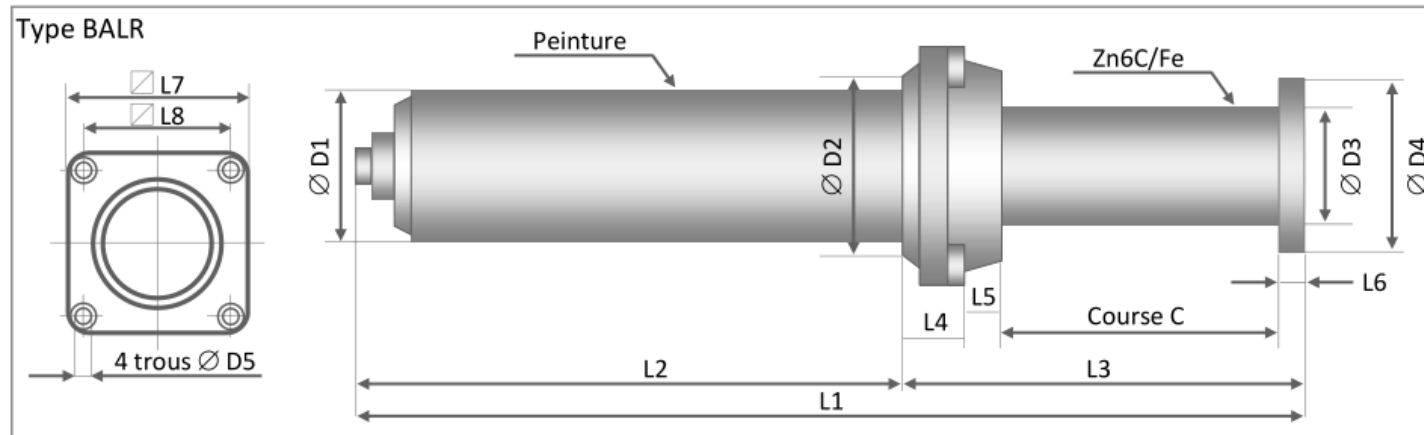


Choix modèle de butée

Calcul course et effort



Efforts sur la structure



Dimensionnement passerelle

Détermination des efforts environnementaux :

1 - Mesure d'effort sur une passerelle représentée grossièrement

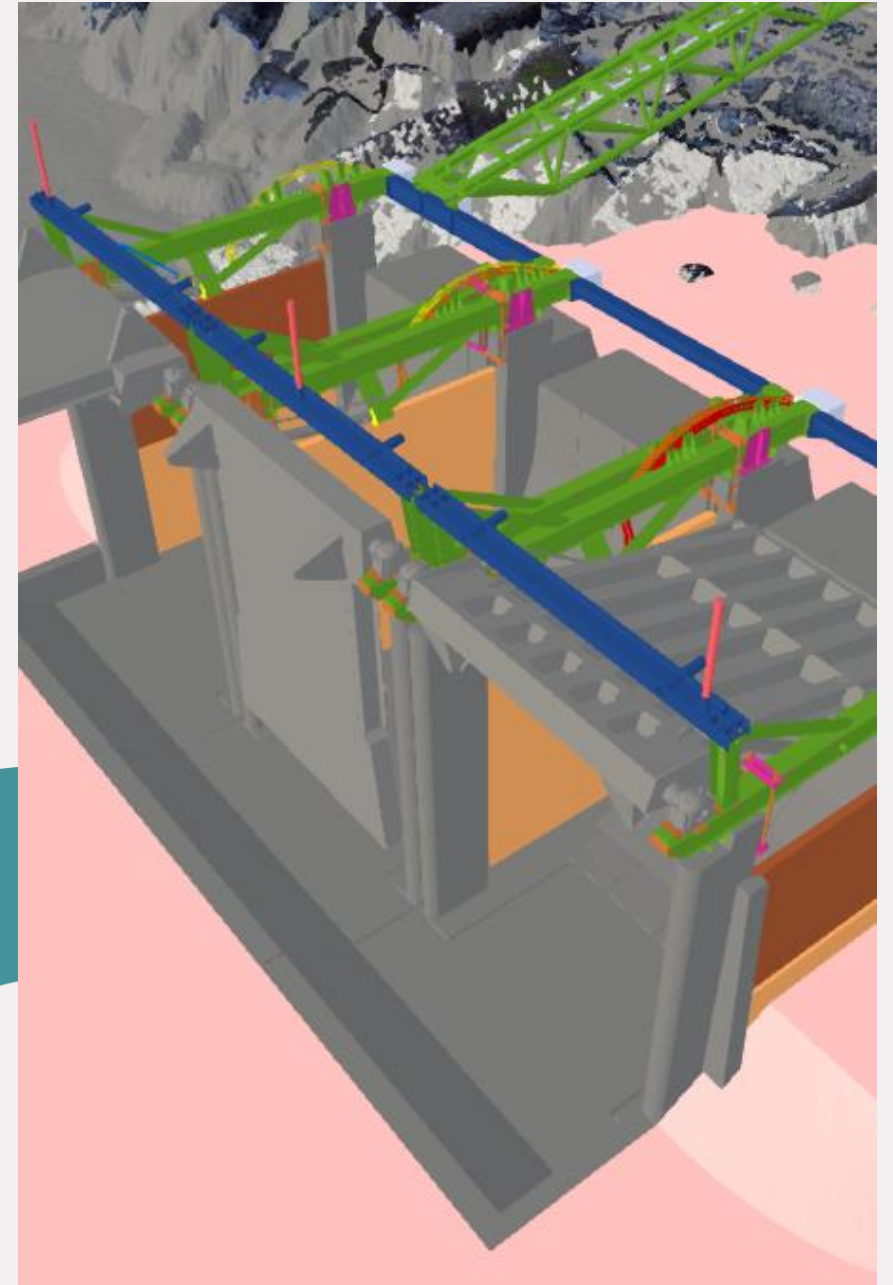
Mise à l'échelle

Coefficient pour tenir compte de la surface réelle de la passerelle

2 – Effort de houle calculés avec des éléments de Morrison



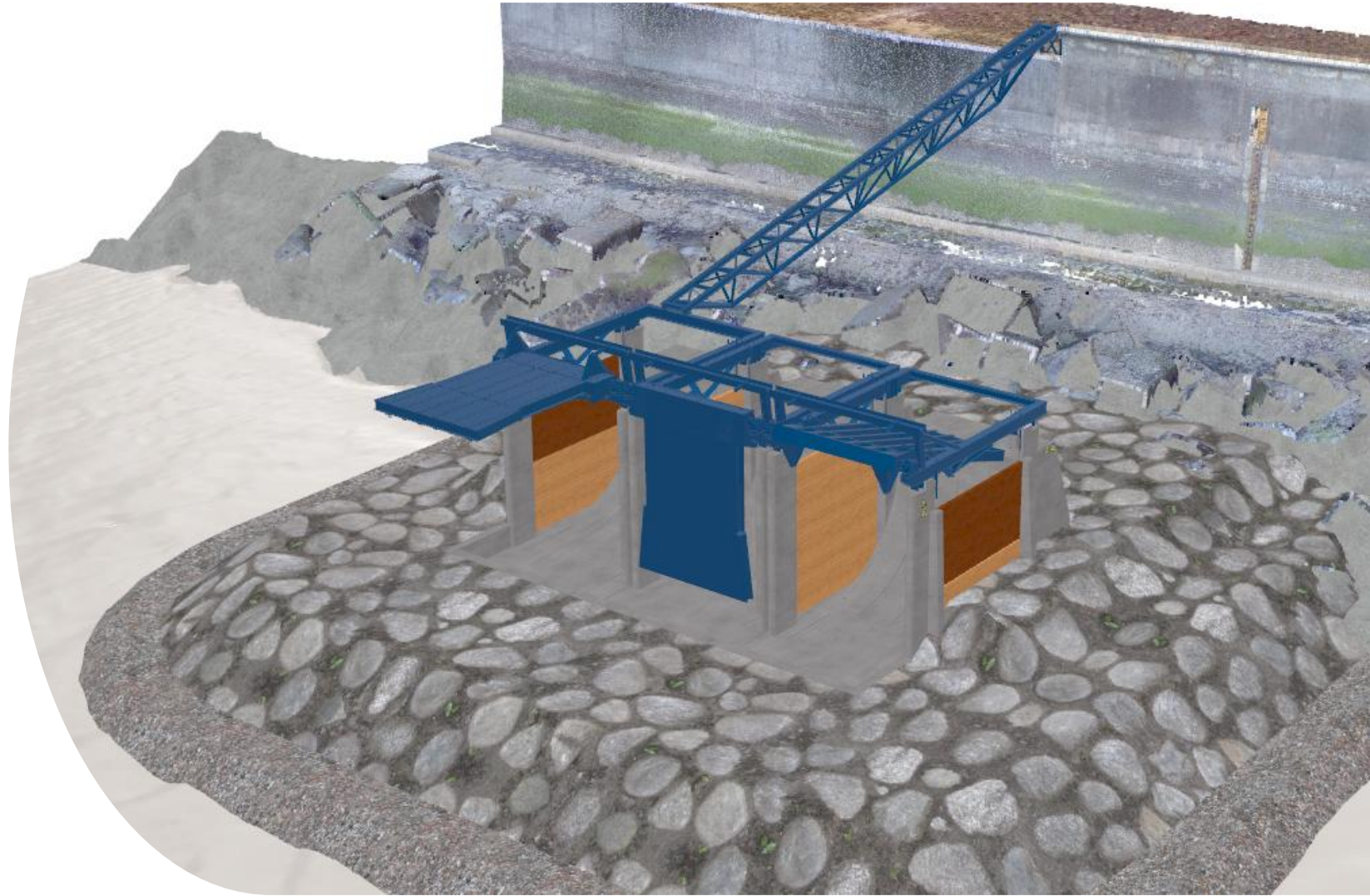
Bloc structure.



Structure des modules

Une solution structurelle hybride

- Bloc Structure en béton
- Bloc Energie en métal
- Cloisonnement en bois



Structure des modules

Décomposition des modules en sous-systèmes

Récupération de
l'énergie des vagues

7m

16m

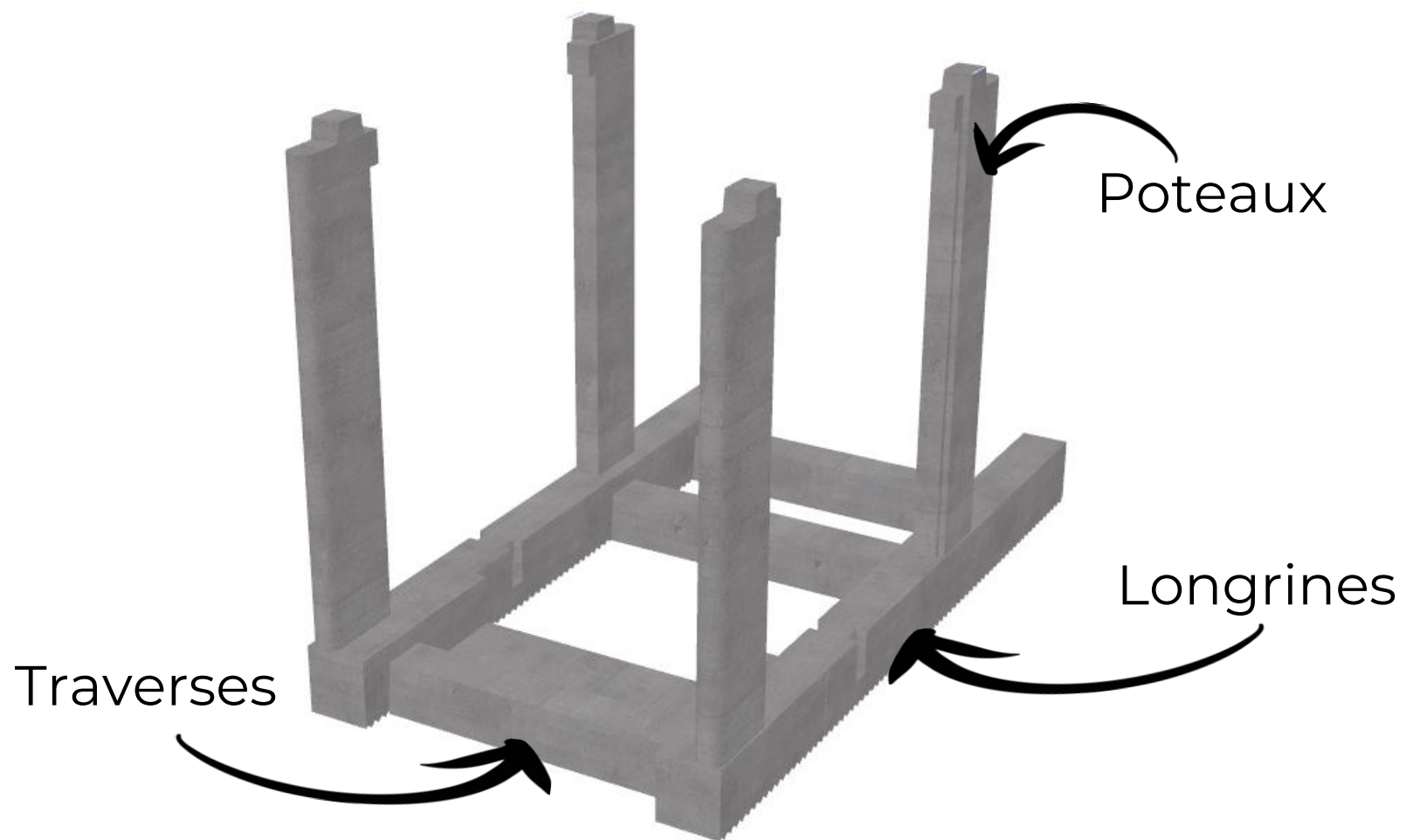
Performance
hydrodynamique

10m

Stabilité / résistance

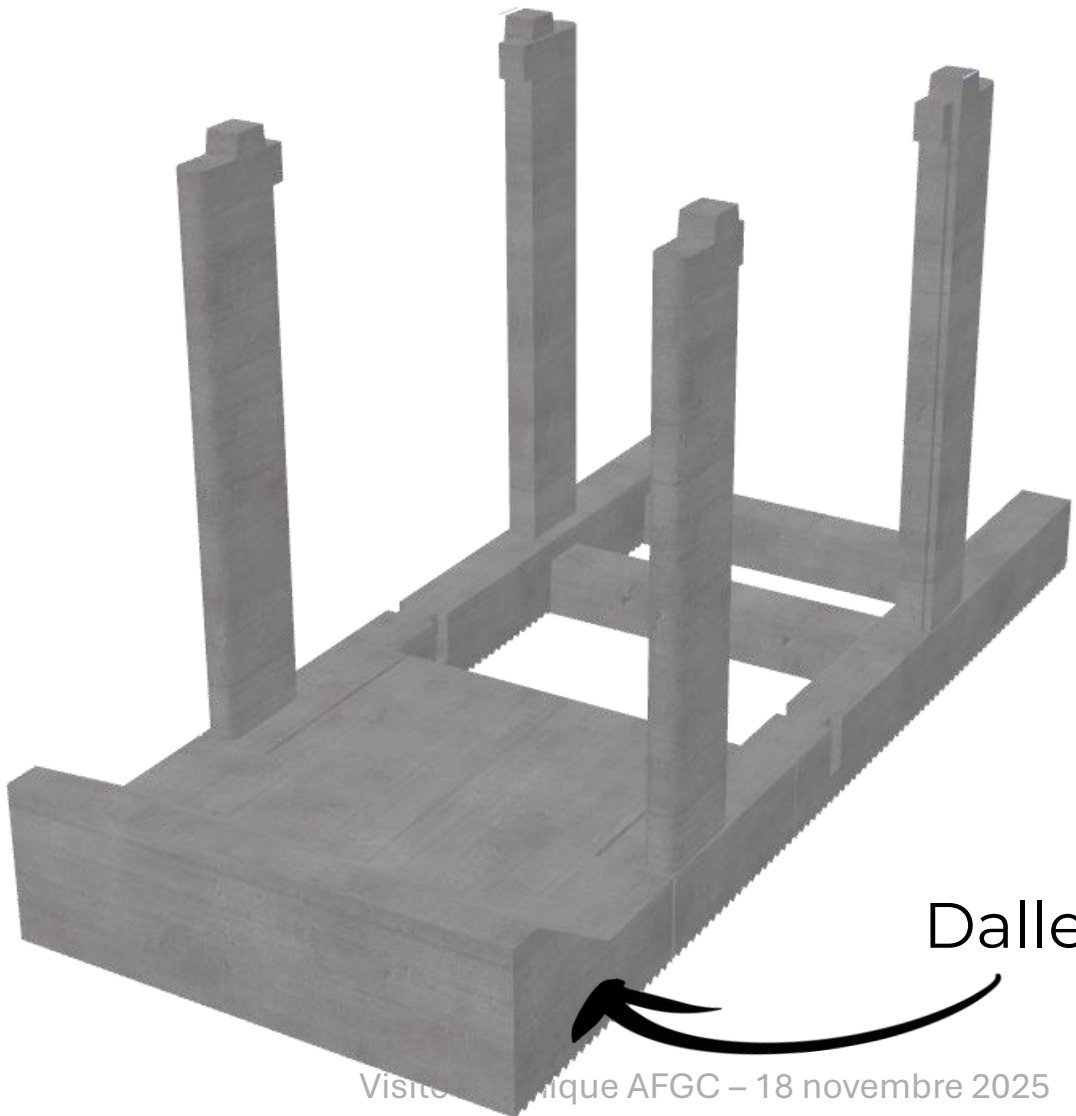
Structure des modules

SOCLE



Structure des modules

DALLE AVANT

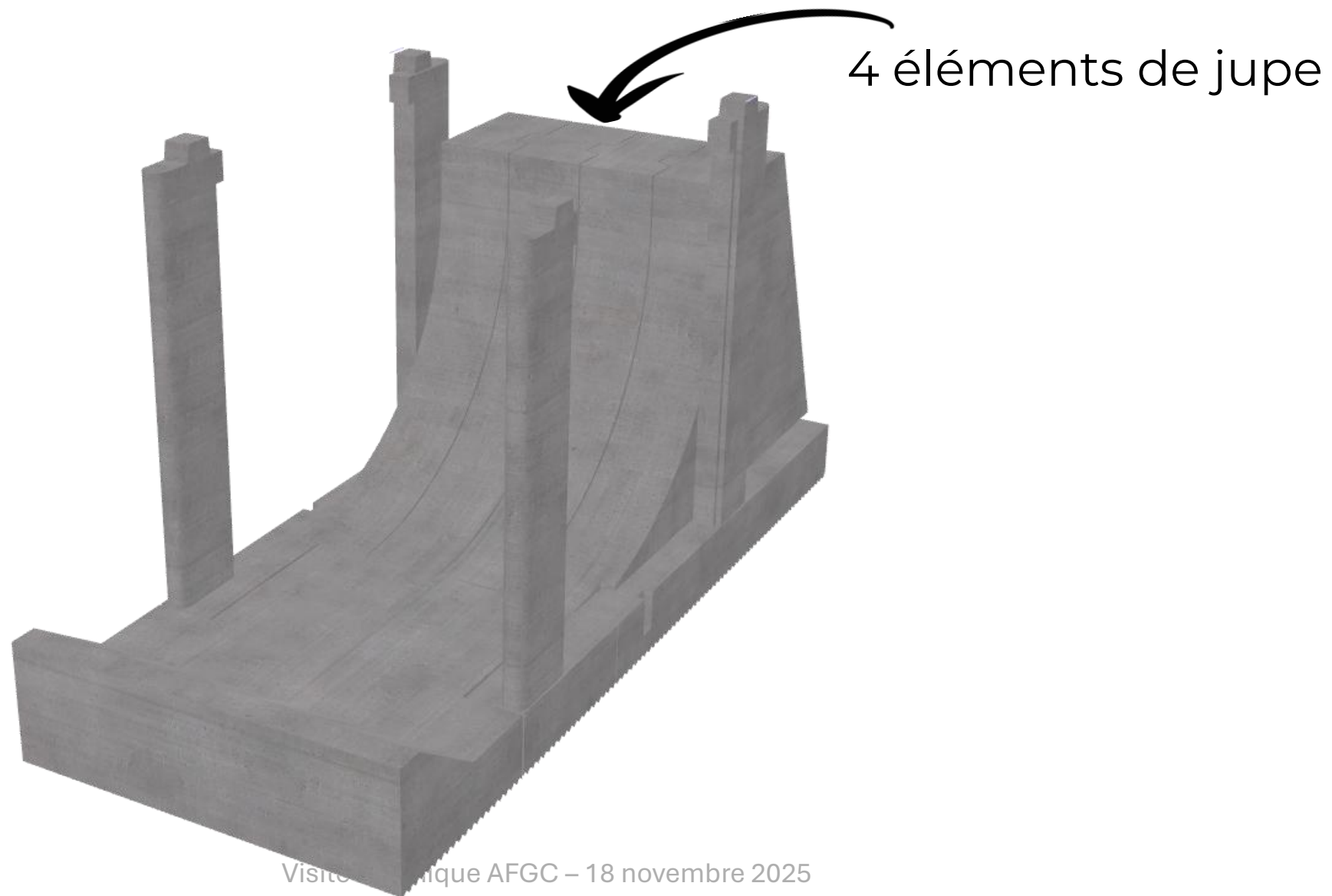


Dalle avant

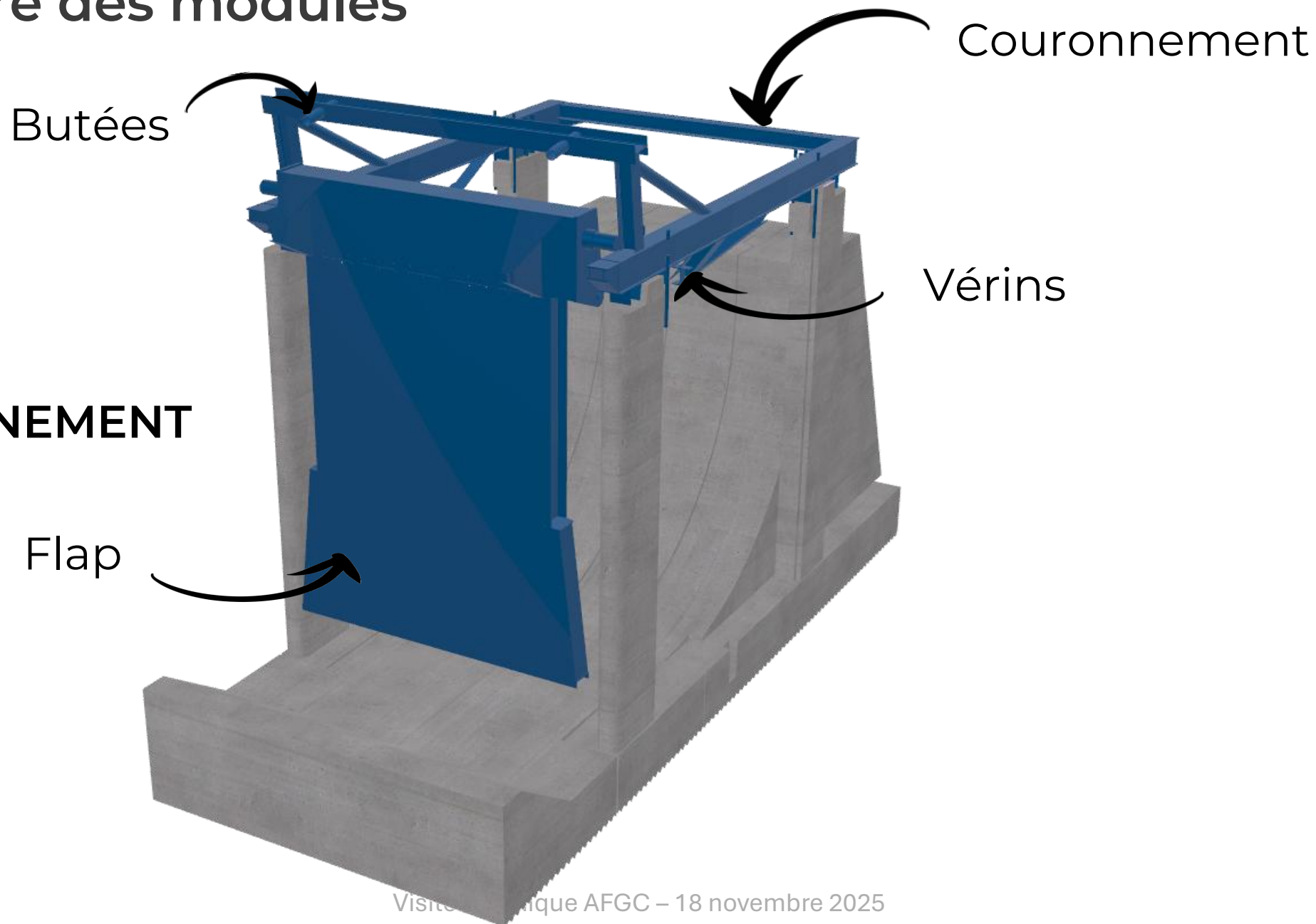


Structure des modules

JUPE

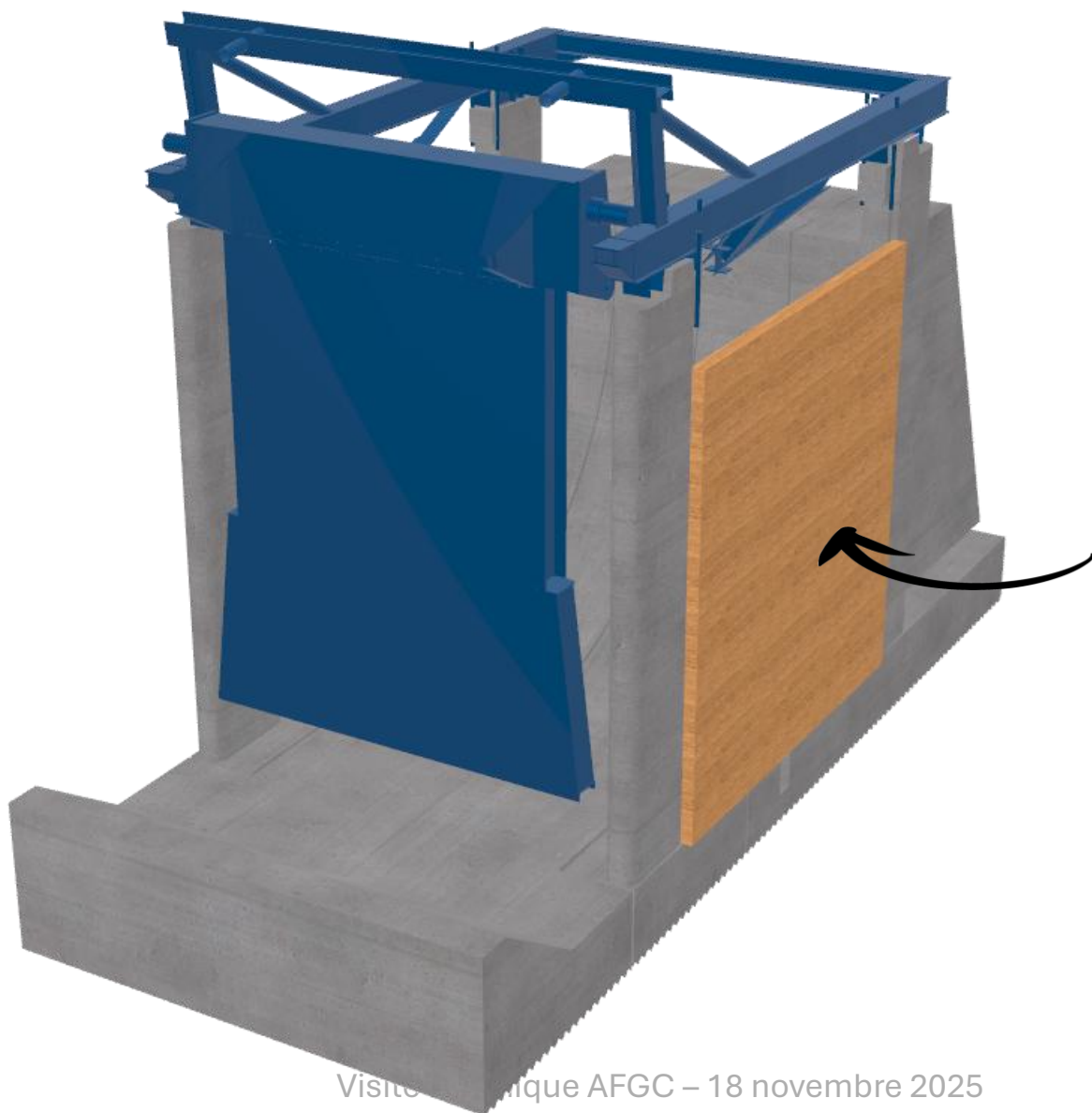


Structure des modules



Structure des modules

CLOISONS



Cloisons bois

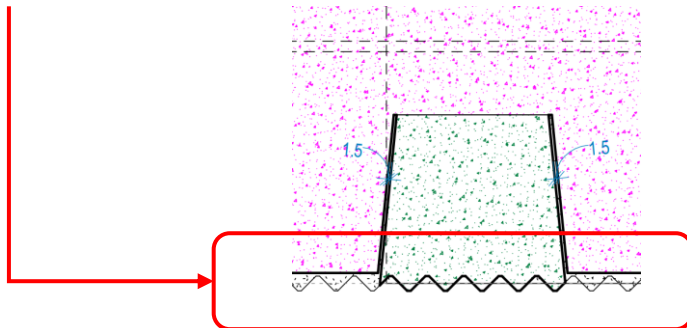
Stabilité globale

Estimation des efforts appliqués sur la structure

- Complexité du comportement hydrodynamique du système
- Pressions sur le flap et sur la jupe obtenues par calculs CFD
- Définition de scénarios extrêmes avec pressions concomitantes sur le flap et sur la jupe

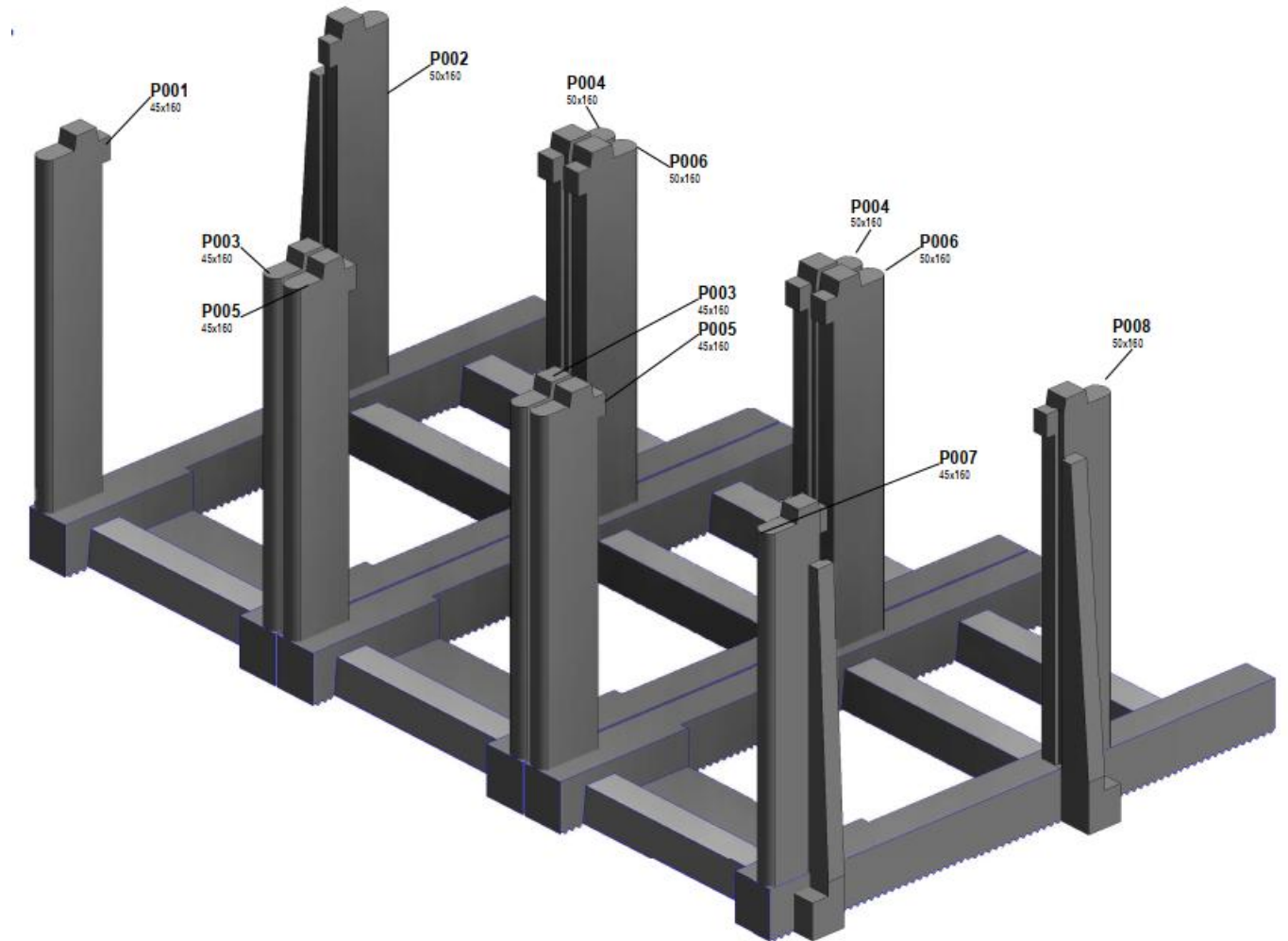
Vérifications au SAC et au RESSAC

- Stabilité des modules au basculement
- Stabilité des modules au glissement
- Amélioration de l'interface béton / ballast par la mise en œuvre d'indentations (BS 6349-2:2010)



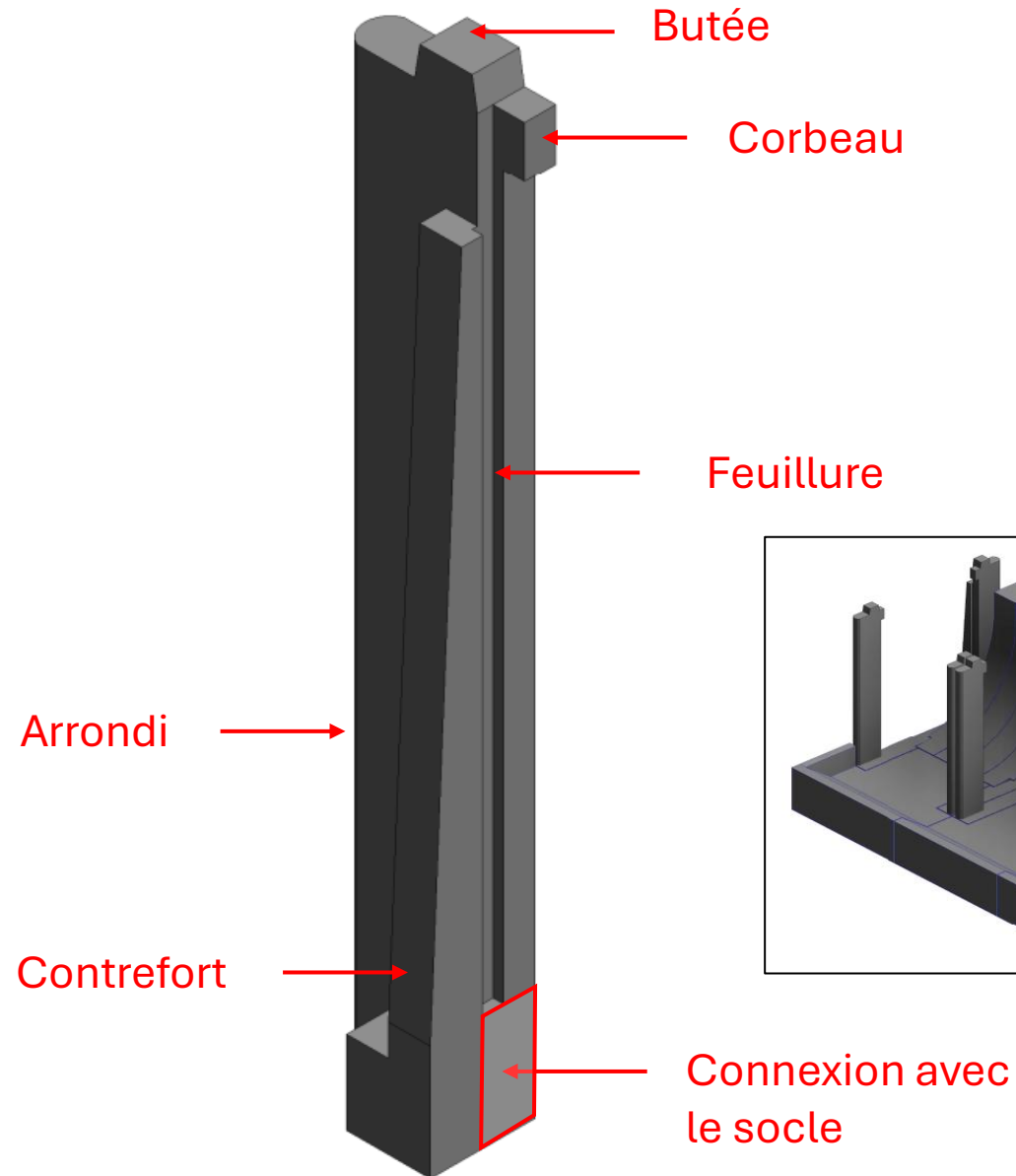
Socle

- Élément principal des modules
- C50/60, XS2, enrobage 6cm
- Longrines et traverses réalisées in-situ, poteaux préfabriqués
- Indentation des faces en contact avec le ballast d'assise
- Levage 4 points, chaque point en panier par réservations créées dans la masse béton



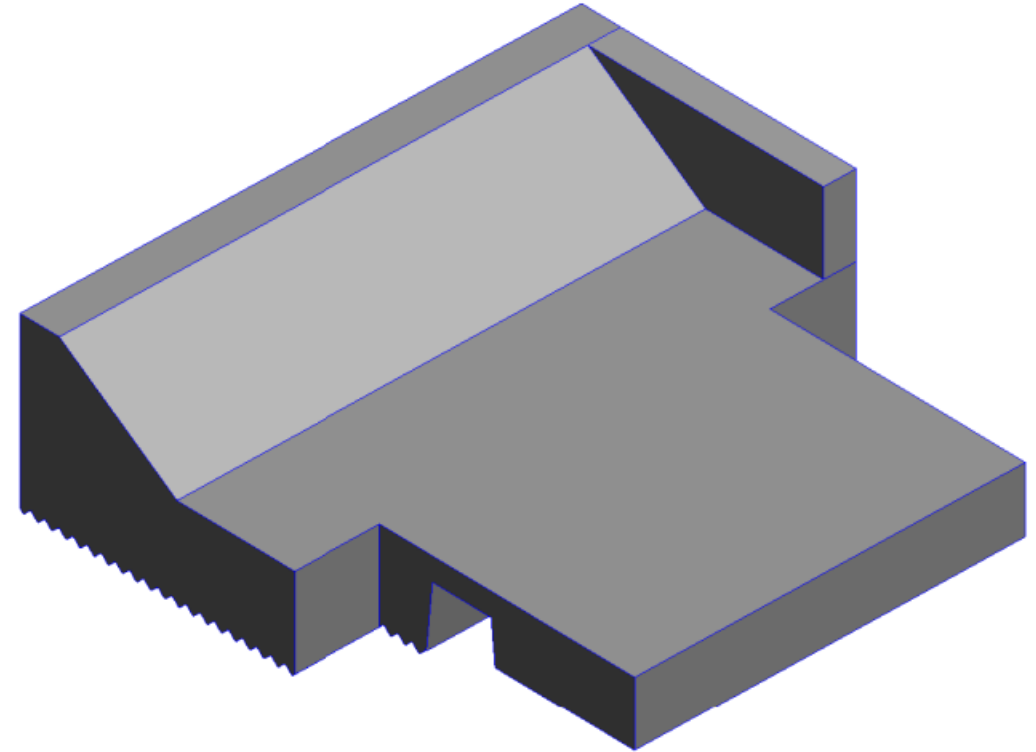
Poteaux

- C50/60, XS3, enrobage 6 cm
- Poteaux encastrés en pied en X et Y
- Réalisation d'une feuilleure pour l'insertion des cloisons bois
- Butée et corbeau en tête pour la connexion avec le couronnement métallique
- Contreforts sur les poteaux extérieurs pour la reprise des houles incidentes



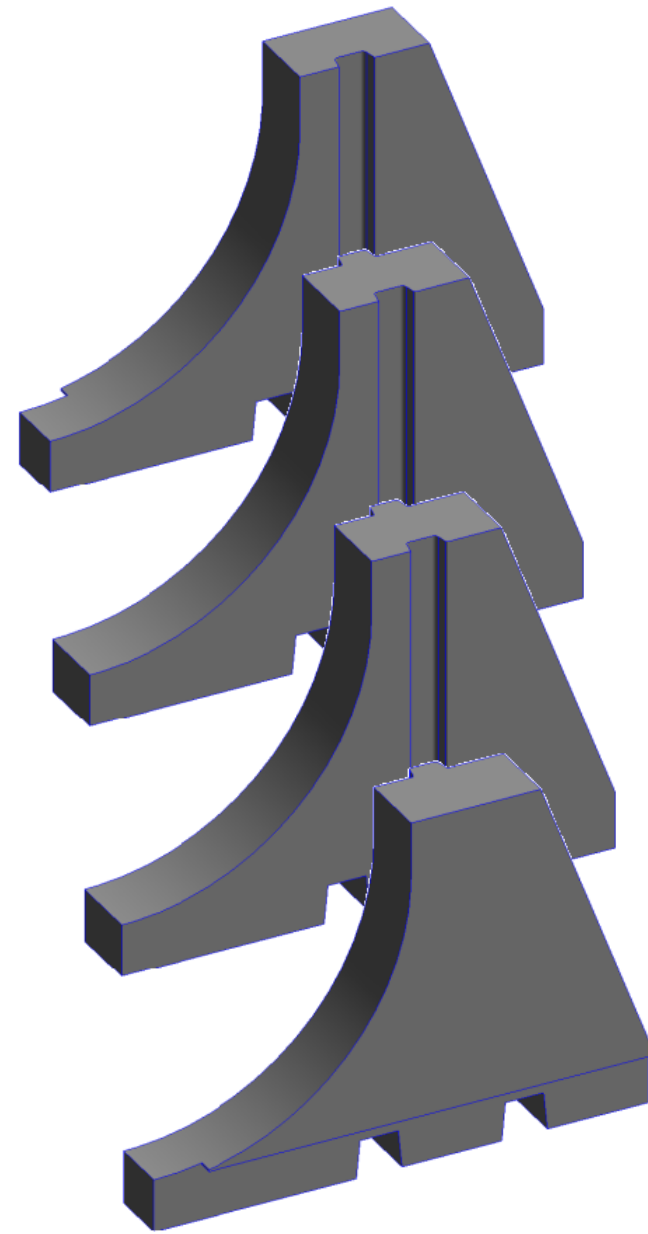
Dalle avant

- C50/60, XS2, enrobage 6cm
- Imbrication sur la traverse avant du socle
- Indentation des faces en contact avec le ballast d'assise
- Levage en panier par réservations créées dans la masse béton
- Muret pour caler les blocs de carapace



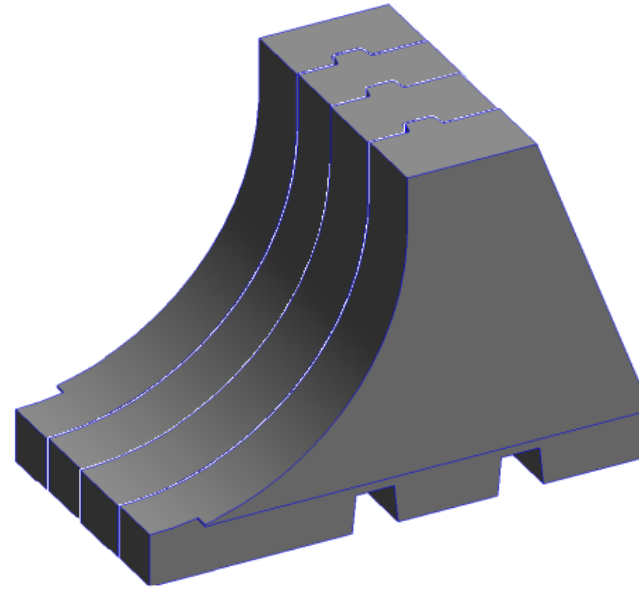
Jupe

- C50/60, XS3
- Imbrication inférieure sur les traverses du socle
- Imbrication des éléments de jupe par clés
- Levage en panier par réservations créées dans la masse béton
- Suivi de la montée en température lors du coulage



Jupe

- C50/60, XS3
- Imbrication inférieure sur les traverses du socle
- Imbrication des éléments de jupe par clés
- Levage en panier par réservations créées dans la masse béton
- Suivi de la montée en température lors du coulage



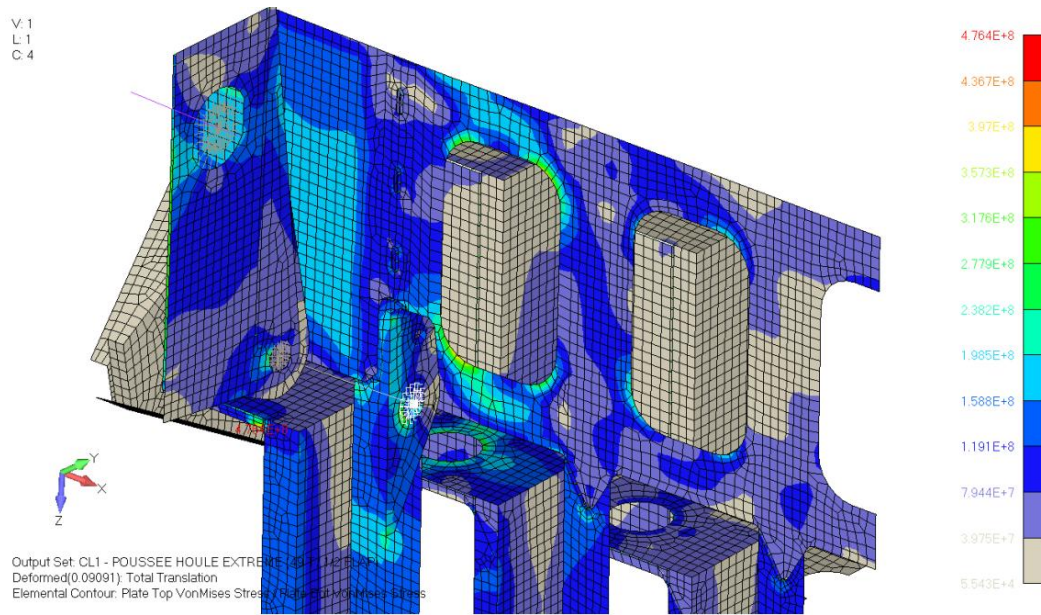
Poteaux



Bloc énergie.



Flap – Structure acier mécano-soudée 13t



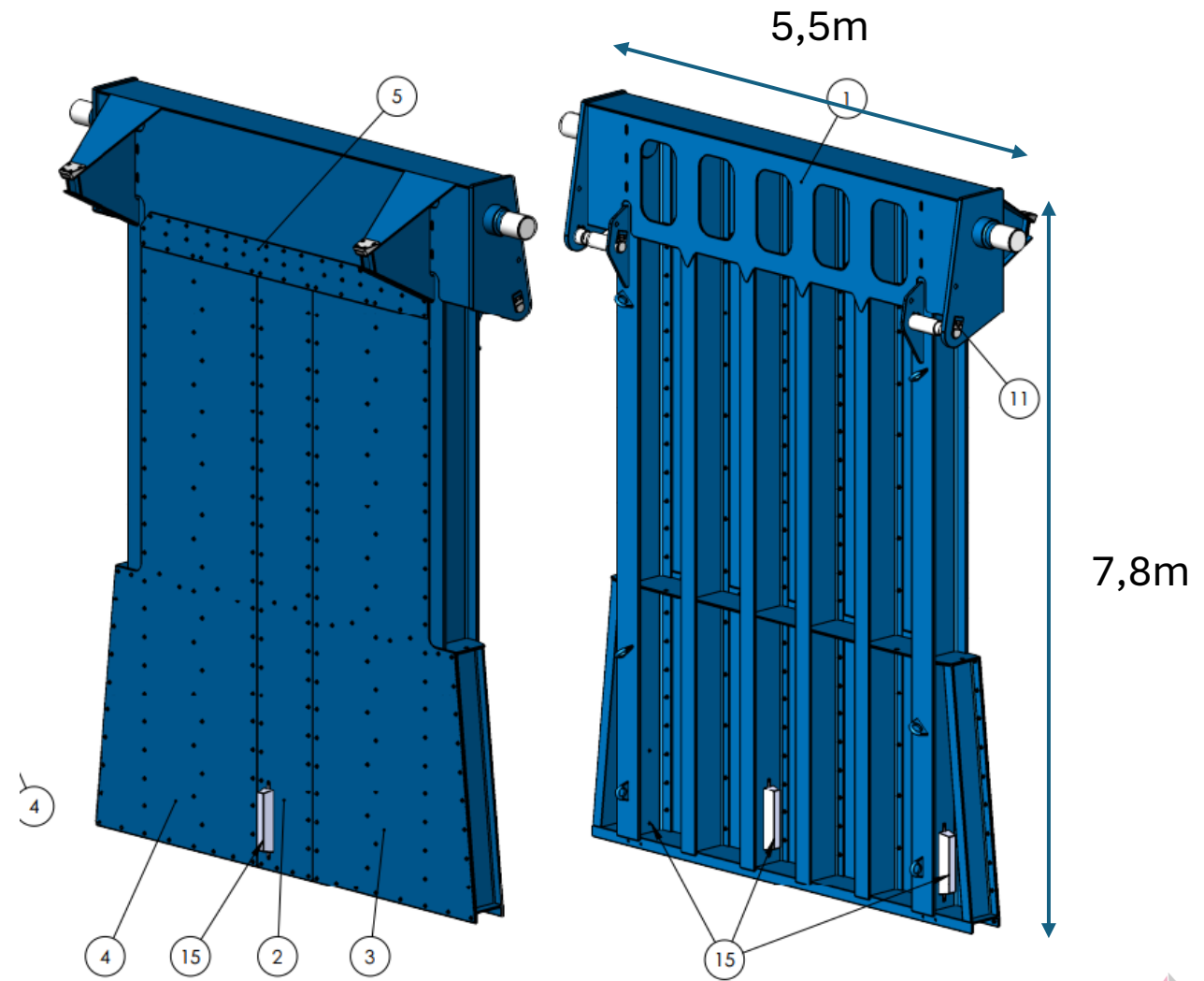
Calcul structurel pour tous les cas de
chargements dimensionnants

Exemples de contraintes de dimensionnement :

→ 130t en flexion sur la poutre avec 1° de tolérance angulaire à l'axe

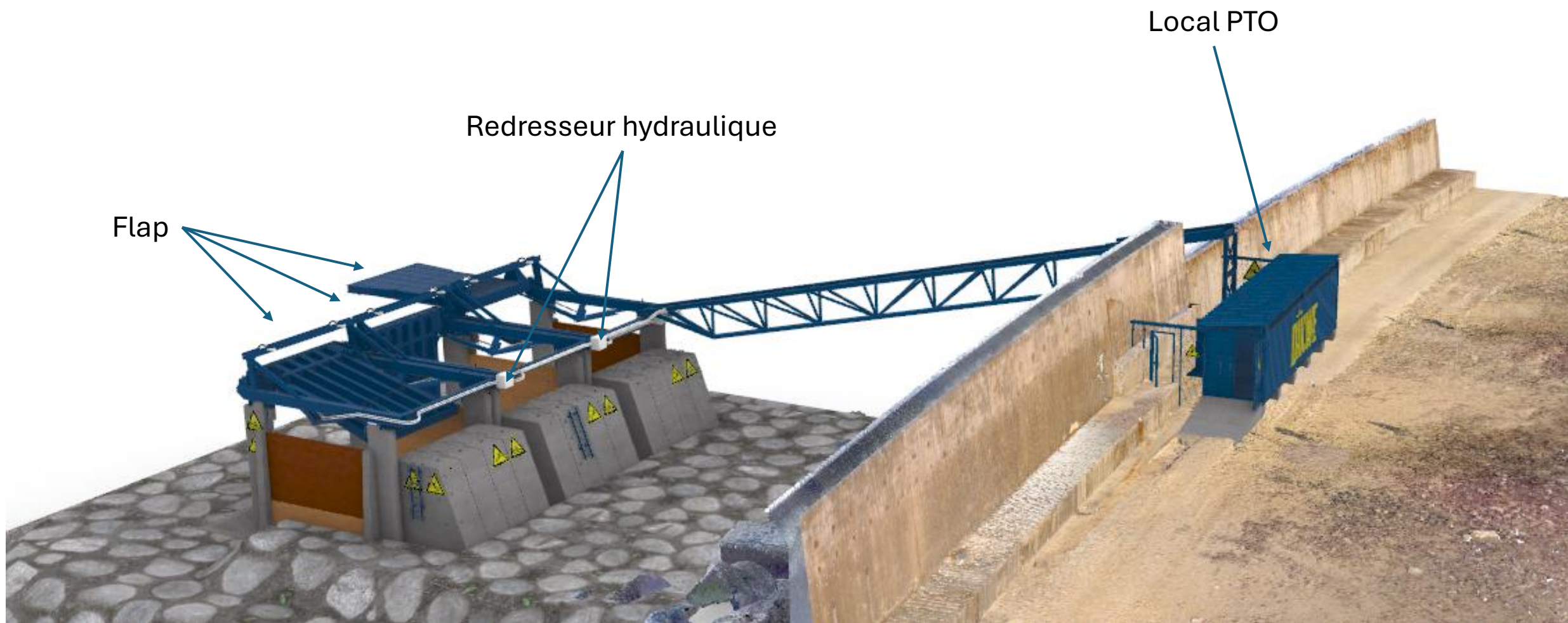
Protection corrosion :

- Peinture grade offshore
- Anodes sacrificielles pour protection galvanique

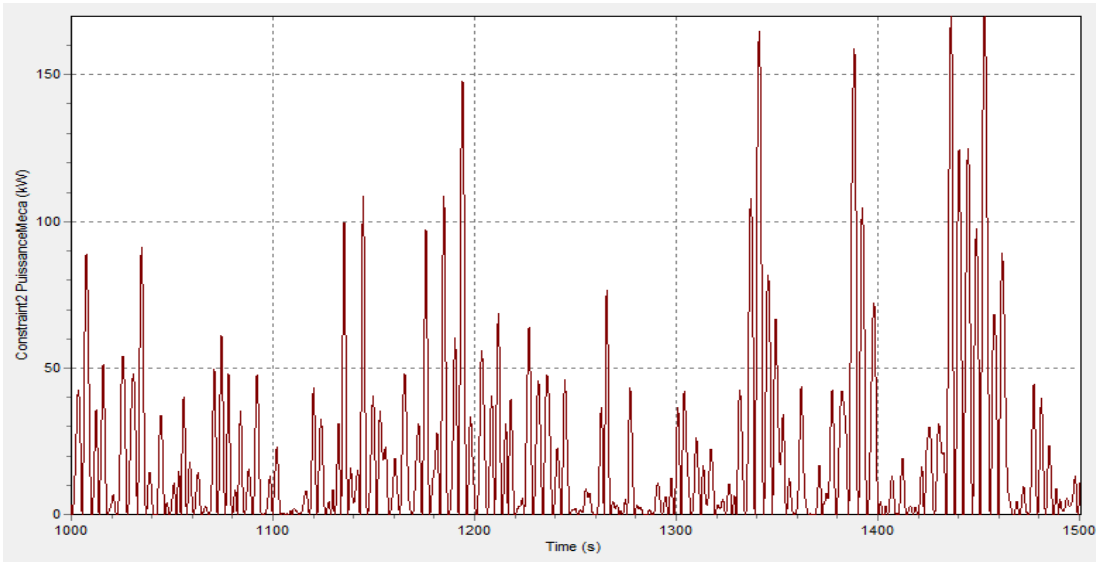


Flap – en construction

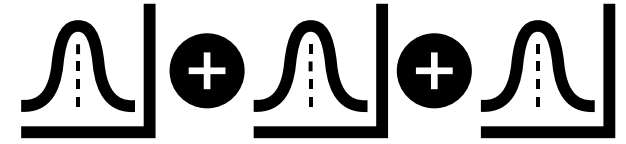




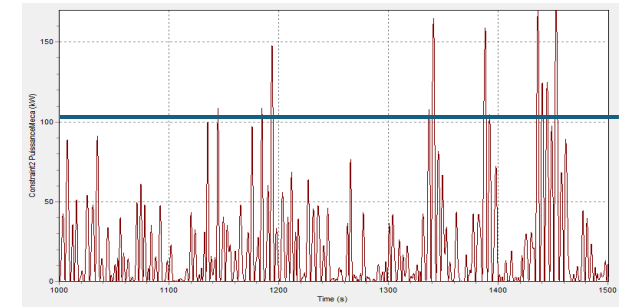
Lissage de la production



Foisonnement



Ecrêtage










Lissage









Intervenants du projet

ETUDES

	MAITRISE D'OEUVRE
	ETUDES DE PROPAGATION
	CAMPAGNE GEOPHYSIQUE
	CAMPAGNE GEOTECHNIQUE
	ETUDES GEOTECHNIQUES
	VISA STRUCTURE
	ETUDE HYDRAULIQUE

EXECUTION

	ENTREPRISE
	FABRICATION COURONNEMENT
	FABRICATION FLAP
	FOURNITURE BOIS
	FOURNITURE ELECTRIQUE
	FOURNITURE HYDRAULIQUE

Merci !



@wave-op | www.wave-op.com