

# GUIDE DE PRE-DIMENSIONNEMENT ACCROPODE™ II



**Version 04 – Edition Juin 2024**

# Sommaire

<b>1. PRESENTATION</b> .....	<b>4</b>
Le design guidelines .....	4
La fiabilité par l'expérience .....	4
Le bloc ACCROPODE™ II .....	4
<b>2. GLOSSAIRE</b> .....	<b>5</b>
<b>3. VALEURS STANDARDS</b> .....	<b>6</b>
<b>4. FORME DU BLOC ET CARACTERISTIQUES</b> .....	<b>7</b>
<b>5. COUPE TYPE D'UNE DIGUE AVEC UNE CARAPACE MONOCOUCHE</b> .....	<b>8</b>
<b>6. SYNOPSIS DU PRE-DIMENSIONNEMENT</b> .....	<b>9</b>
<b>7. DONNEES NECESSAIRES</b> .....	<b>10</b>
<b>8. PRE-DIMENSIONNEMENT DE LA TAILLE DU BLOC</b> .....	<b>11</b>
Choix du coefficient de stabilité .....	11
Estimation de la taille des blocs .....	13
Facteurs influants sur la stabilité des blocs .....	14
Nombre de rangées dans le talus .....	14
<b>9. SOUS-COUCHE</b> .....	<b>15</b>
Agencement de la sous-couche .....	16
Poids et Géométrie des enrochements .....	16
Épaisseur de la sous-couche .....	16
<b>10. TABLE DE CONCEPTION ACCROPODE™ II</b> .....	<b>18</b>
<b>11. BUTEE DE PIED</b> .....	<b>19</b>
Types de butées de pied .....	20
Blocs de pied ACCROBERM™ I et II .....	21
Approche générale de la profondeur de la butée de pied .....	22
Stabilité de la butée de pied .....	23
<b>12. CRETE DE L'OUVRAGE</b> .....	<b>22</b>
<b>13. ESCALIER</b> .....	<b>25</b>
<b>14. MUSOIR</b> .....	<b>25</b>
<b>15. TALUS INTERNE</b> .....	<b>27</b>
<b>16. TRANSITIONS</b> .....	<b>28</b>
<b>17. METRE</b> .....	<b>29</b>
<b>18. MODELE PHYSIQUE</b> .....	<b>30</b>
Maquettes et assistance en laboratoire .....	30
Stabilité des blocs en modèle physique .....	30
<b>19. SERVICES ET ASSISTANCE TECHNIQUE de CLI</b> .....	<b>33</b>
Assistance pour la phase conception de l'ouvrage .....	33
Assistance en phase de construction .....	34
Inspection et maintenance des ouvrages .....	34
Projets réalisés par CLI dans le monde .....	36
<b>20. CALCULATEUR CLI</b> .....	<b>37</b>
<b>21. CONDITIONS D'UTILISATION</b> .....	<b>38</b>
Propriété intellectuelle et droits d'utilisation .....	38
Avertissements relatifs au présent document .....	38
<b>REFERENCES</b> .....	<b>38</b>
<b>CONTACTS</b> .....	<b>39</b>

# 1. Présentation

## Le design guidelines

Ce document s'adresse aux concepteurs d'ouvrages maritime désireux d'utiliser la technique ACCROPODE™ II pour la protection des digues à talus. Ce guide donne les principales indications permettant de réaliser un pré-dimensionnement de carapaces en blocs ACCROPODE™ II en respectant les principes de base de la technique selon le respect de la technique développée par SOGREAH (aujourd'hui ARTELIA) depuis plus de 40 ans.

## La fiabilité par l'expérience

CLI est le leader de la technologie des protections de digues utilisant des systèmes dit « monocouches ». CLI a pris part dans plus de 380 projets dans de nombreux pays utilisant les blocs ACCROPODE™ ECOPODE™, ACCROBERM™ et CORE-LOC™ dans des conditions les plus variées. Une expérience de plus de 70 ans dans la construction de carapaces artificielles pour les digues maritimes qui a commencé avec le bloc TETRAPODE en 1953. L'invention en 1981 du premier bloc monocouche appelé ACCROPODE™, s'est imposé comme la référence incontournable au fil des ans. Le bloc ACCROPODE™ a été utilisé dans des tailles qui vont de 0.7m<sup>3</sup> dans des zones où la houle est modérée jusqu'à 28m<sup>3</sup> pour protéger des ouvrages au Japon contre les très fortes vagues de l'océan Pacifique. La technique ACCROPODE™ ne se résume pas à simple bloc en béton mais c'est un procédé complet qui permet de garantir que les caractéristiques développées par son inventeur seront bien atteintes sur les projets. L'équipe spécialisée de CLI fournit l'assistance technique à toutes les étapes du projet. Celle-ci est destinée au différents intervenants comme les Maitres d'Ouvrages, les Maitres d'Œuvres, les laboratoires d'études en modèles physique et plus particulièrement les Entreprises de construction. Enfin, CLI fournit un service d'attestation de conformité permettant à toutes les parties de s'assurer que la construction est conforme à la technologie ACCROPODE™.

## Le bloc ACCROPODE™ II

L'expérience acquise sur un nombre important de projets a conduit à la naissance d'une nouvelle génération de blocs de carapace. Cette nouveauté conserve les qualités légendaires de son aîné et qui, grâce à des modifications de forme et de mailles permettent une amélioration de la stabilité face à la houle associée à une rapidité et simplification de pose. Le bloc ACCROPODE™ II, mis sur le marché en 1999, améliore ainsi le concept original en optimisant son utilisation.





## 2. Glossaire

Symbole	Description	Unité
H	Hauteur du bloc ACCROPODE™ II	m
H <sub>s</sub>	Hauteur significative de la houle : H <sub>s</sub> est considéré dans ce document comme égal à H <sub>1/3</sub>	m
h	Hauteur d'eau en pied d'ouvrage	m
V	Volume du bloc ACCROPODE™ II	m <sup>3</sup>
Δ	Densité relative du matériau considéré $\Delta = (\rho_c - \rho_w) / \rho_w$	-
α	Pente du talus	degrés
ρ <sub>c</sub>	Masse volumique du béton	kg/m <sup>3</sup>
ρ <sub>r</sub>	Masse volumique des enrochements	kg/m <sup>3</sup>
ρ <sub>w</sub>	Masse volumique de l'eau de mer	kg/m <sup>3</sup>
γ <sub>f</sub>	Coefficient de rugosité de la couche	-
K <sub>D</sub>	Coefficient de stabilité du bloc	-
K <sub>S</sub>	Coefficient de forme	-
K <sub>t</sub>	Coefficient d'épaisseur de couche ou de sous-couche	-
h <sub>T</sub>	Hauteur d'eau au-dessus de l'arase supérieure de la butée de pied	m
T	Épaisseur de la carapace ACCROPODE™ II	m
Z <sub>C</sub>	Niveau de l'arase supérieure de la crête de l'ouvrage (au-dessus de la dernière ligne de bloc)	m
Z <sub>P</sub>	Niveau de l'arase inférieure du pied de la carapace en bloc (en dessous de la première ligne)	m
D <sub>n50</sub>	Diamètre nominal des éléments	m
L	Largeur du tapis anti-affouillement	m
D <sub>H</sub>	Distance horizontale théorique séparant les centres de gravités de deux blocs	m
D <sub>V</sub>	Distance parallèle à la pente théorique séparant les centres de gravités de deux lignes de blocs	m
D <sub>n</sub>	Diamètre nominal – bloc artificiel monocouche	m
NLL	(Nominal lower limit) Valeur nominale basse de la masse de l'enrochement naturel de la sous-couche	t
NUL	(Nominal upper limit) Valeur nominale haute de la masse de l'enrochement naturel de la sous-couche	t
W <sub>50</sub>	Poids médian de l'enrochement	N
N	Nombre de blocs par unité de surface	U/m <sup>2</sup>
N <sub>s</sub>	Nombre de stabilité	-
γ <sub>h</sub>	Poids volumique humide – bloc artificiel monocouche	kN/m <sup>3</sup>
γ <sub>sat</sub>	Poids volumique saturé – bloc artificiel monocouche	kN/m <sup>3</sup>
c	Cohésion d'imbrication – bloc artificiel monocouche	kPa
φ	Angle de frottement – bloc artificiel monocouche	°

Tableau 1 : Abréviations et symbole

### 3. Valeurs standards – bloc ACCROPODE™ II

<b>Volume du bloc</b>	$V = 0,2926 H^2$
<b>Diamètre nominal</b>	$D_n = V^{1/3}$
<b>Coefficient de forme</b>	$K_S = 0,2926$
<b>Coefficient de stabilité</b>	$Kd = 16$ et variable (cf chapitre 8)
<b>Densité de pose</b>	$\phi =$ Variable de 0.635 à 0.610
<b>Porosité de la couche</b>	Variable de 53.31% à 55.15%
<b>Coefficient d'épaisseur de couche de blocs ACCROPODE™ II</b>	$K_{t1} = 1,36$
<b>Coefficient d'épaisseur de sous-couche de blocs ACCROPODE™ II</b>	$K_{t2} = 1,15$
<b>Epaisseur de la carapace</b>	$T = 0,902 H$ ou $T = K_{t1} \cdot D_n = 1,36 D_n$
<b>Coefficient de rugosité de la couche</b>	$\gamma_f = 0,44$ - [cf. note 1]
<b>Poids volumique sec – bloc artificiel monocouche</b>	$\gamma_h = 15 \text{ kN/m}^3$ - [cf. note 2]
<b>Poids volumique saturé – bloc artificiel monocouche</b>	$\gamma_{sat} = 19 \text{ kN/m}^3$ - [cf. note 2]
<b>Cohésion d'imbrication – bloc artificiel monocouche</b>	$c = 10 \text{ kPa}$ - [cf. note 2]
<b>Angle de frottement – bloc artificiel monocouche</b>	$\varphi = 45^\circ$ - [cf. note 2]

Tableau 2 : Valeurs standards pour une carapace monocouche en blocs ACCROPODE™ II

Note 1 – Source Eurotop Manuel Tableau 6.2 (valeurs pour une pente 1V/1.5H)

Note 2 - Valeurs indicatives estimées par ARTELIA afin de modéliser les couches de blocs ACCROPODE™II comme élément de « sol ».

## 4. Forme du bloc et caractéristiques

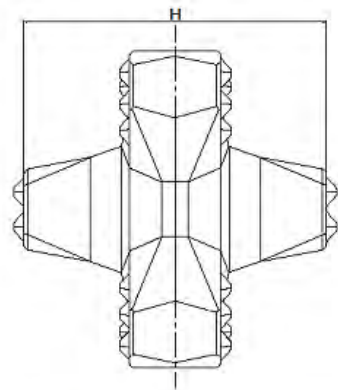
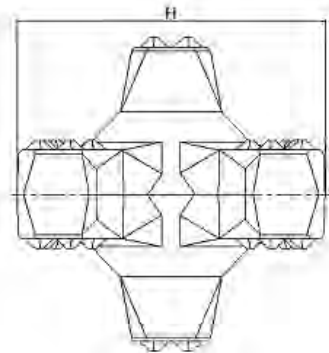
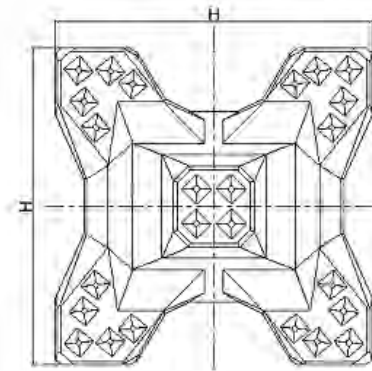
Le bloc ACCROPODE™ II est un hexapode qui s'inscrit dans un cube, permettant une imbrication idéale dans toutes les directions en mobilisant les efforts des blocs voisins grâce à un maillage spécifique.

Les chanfreins, utilisés pour couper les angles vifs, permettent de mieux gérer l'imbrication du bloc et d'éviter les coincements lors de la pose. Cela permet une imbrication facile et rapide proche de la densité optimale. De ce fait, les tassements ultérieurs sur le chantier sont limités par rapport à d'autres types de blocs.

Les pyramides situées sur chaque pate du bloc ont deux fonctions. Elles sont destinées à créer des contacts plus importants entre les blocs et augmenter la capacité de mobilisation des efforts grâce aux autres blocs voisins. Ce sont aussi des parties sacrificielles qui permettent d'absorber l'énergie des chocs lors de la pose des blocs.

La stabilité du bloc ACCROPODE™ II est en partie due à sa forme, issue de l'expérience de la première génération de blocs ACCROPODE™. Cette stabilité est également induite par la technique de mise en place qui permet de mobiliser les efforts des blocs voisins. Cet ensemble permet d'obtenir des niveaux de stabilité élevés.

*A droite - Figure 2 : Bloc ACCROPODE™ II*



## 5. Coupe type d'une digue avec une carapace monocouche

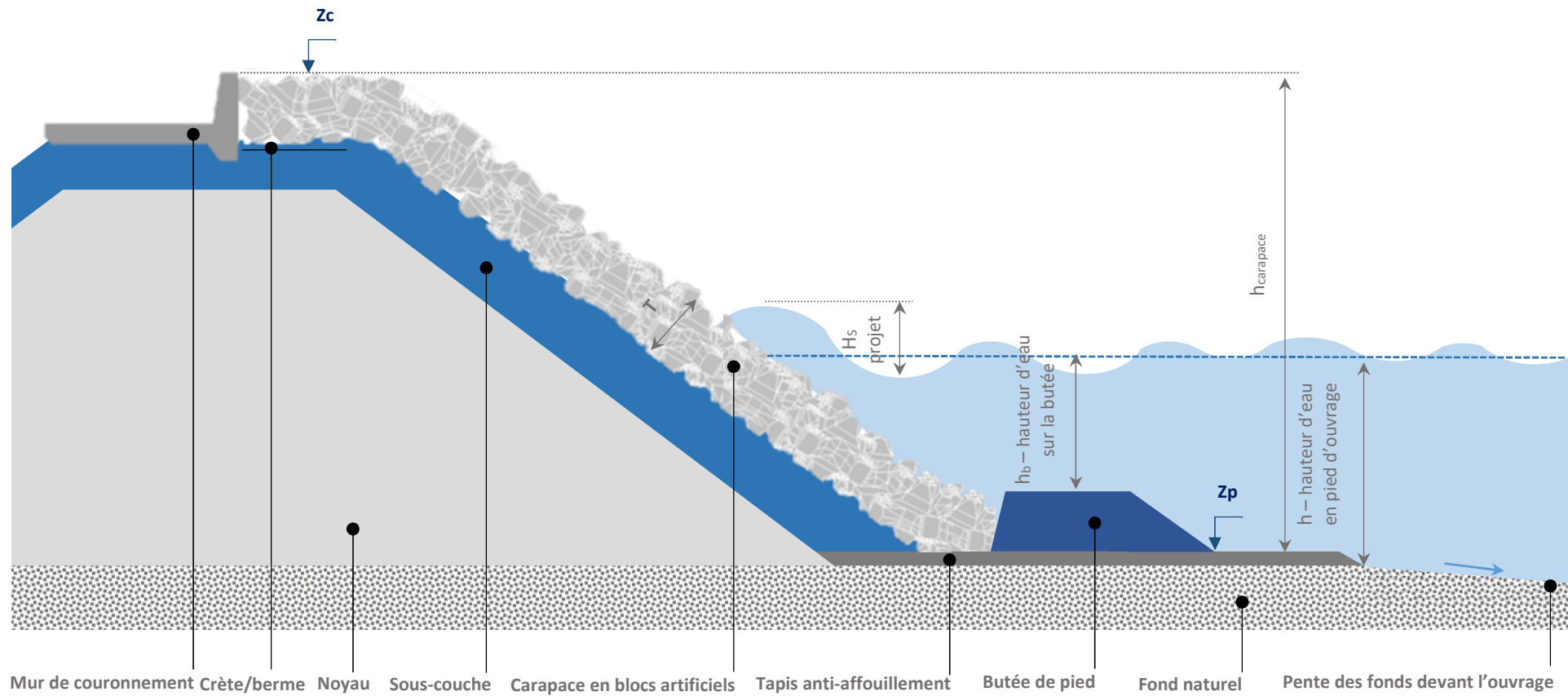


Figure 3 : Coupe type d'une digue avec carapace monocouche



## 6. Synopsis du pré-dimensionnement

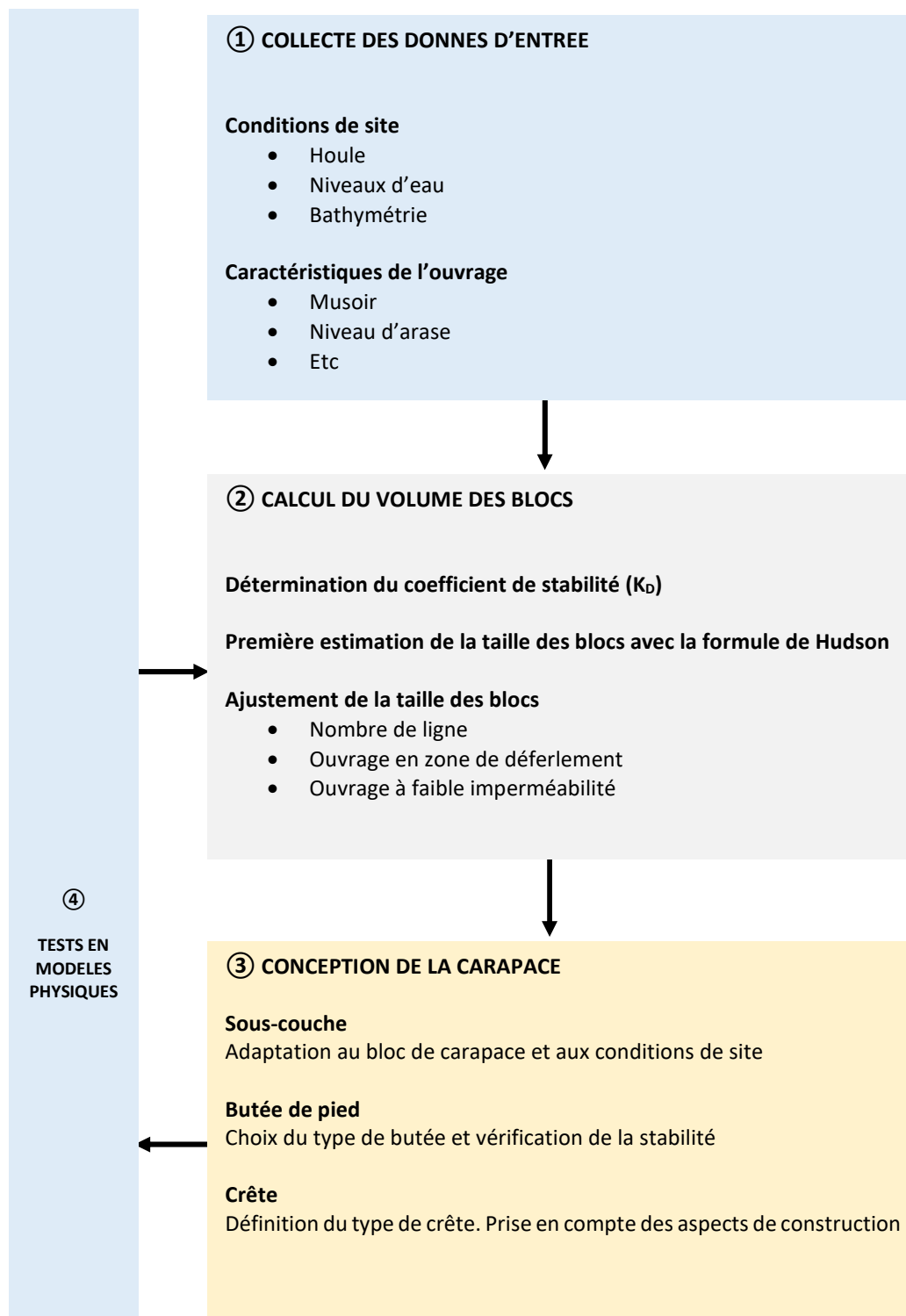


Figure 4 : Schéma du processus de pré-dimensionnement

## 7. Données nécessaires

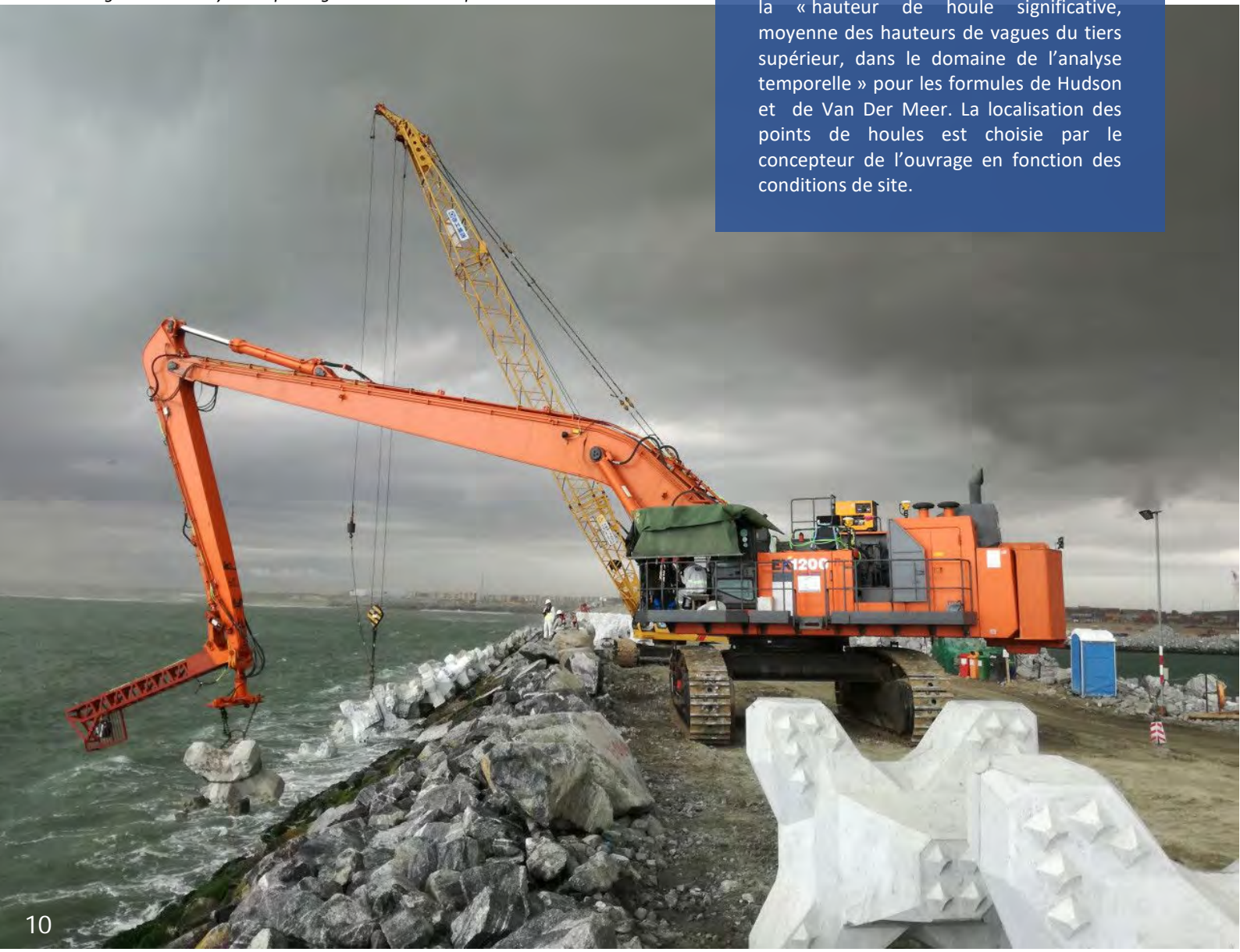
Les informations ci-dessous sont nécessaires pour le pré-dimensionnement de la carapace :

- Bathymétrie précise à proximité de la structure ;
- Houle de référence ;
- Niveau d'eau : variations des marées, influences des tempêtes, niveau induits par le changement climatique ;
- Conditions de déferlement de la houle ;
- Masse volumique minimale du béton sur chantier ;
- Masse volumique de l'eau de mer ;
- Masse volumique des enrochements ;
- Niveau de la crête d'arase de la carapace  $z_c$  ;
- Niveau d'assise du premier bloc en pied de carapace  $z_p$  ;
- Durée de vie de l'ouvrage ;
- Période de retour des évènements dimensionnant.

### Note

Dans le cas d'un pré-dimensionnement, la houle à utilisée est  $H_{1/3}$ . Elle correspond à la « hauteur de houle significative, moyenne des hauteurs de vagues du tiers supérieur, dans le domaine de l'analyse temporelle » pour les formules de Hudson et de Van Der Meer. La localisation des points de houles est choisie par le concepteur de l'ouvrage en fonction des conditions de site.

Figure 5 : Pelle hydraulique et grue treillis lors de pose de blocs ACCROPODE™ II

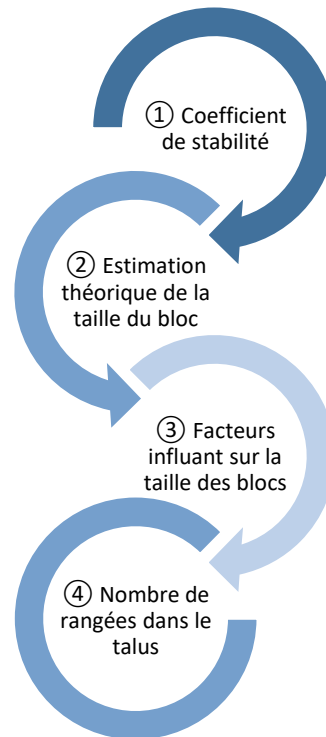


## 8. Pré-dimensionnement de la taille du bloc

La formule de Hudson est couramment utilisée pour le pré-dimensionnement de la taille des blocs de carapace. Elle est simple et bénéficie d'un grand retour d'expérience. Cette méthode tient compte de la hauteur de houle de projet et également d'autres facteurs influençant la stabilité des blocs. Ci-contre, le synopsis simplifié du pré-dimensionnement de la taille des blocs de carapace.

*A droite - Figure 6 : Schéma explicatif du processus de pré-dimensionnement de la taille du bloc*

*Dessous - Figure 7 : Digue en blocs ACCROPODE™ II - vue depuis le cheminement piéton en crête - marina au Koweït*



## Coefficient de stabilité

Dans un premier temps, il est nécessaire d'estimer la valeur du coefficient de stabilité à utiliser qui entre en compte dans la formule de Hudson. Ce coefficient peut varier en fonction de la pente des fonds au droit de l'ouvrage, des conditions de déferlement et du type de section courante ou coude / musoir.

### EN SECTION COURANTE

Le coefficient de stabilité des blocs dépend, entre autres, du type de déferlement de la houle. Ce déferlement est lui-même influencé par les caractéristiques de la houle, la bathymétrie et la hauteur d'eau.

- Dans le cas d'une houle non déferlante, le  $K_D$  utilisé est celui d'une pente des fonds inférieure à 1%.
- Dans les cas de houle déferlante, la Figure 8 ci-dessous donne une estimation de la valeur de  $K_D$  à utiliser pour les pentes de 1 à 10%.
- Au-delà de 10% des pentes des fonds devant l'ouvrage, un  $K_D$  encore plus faible sera utilisé par le concepteur de l'ouvrage et les essais en modèle physiques préciseront la stabilité des blocs. Une approche conservative est fortement recommandée.

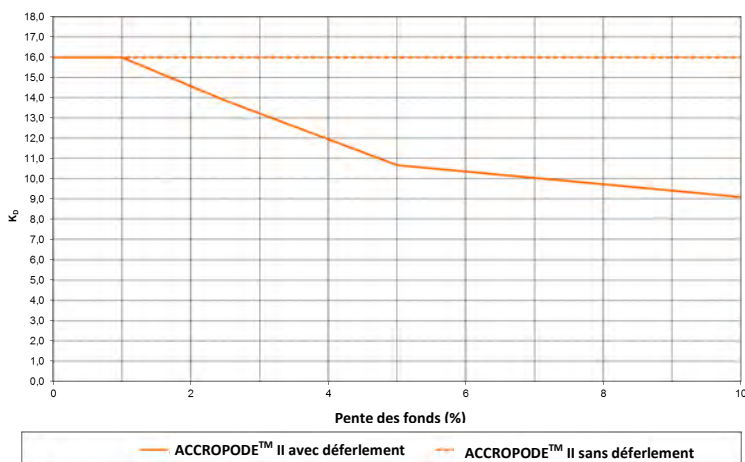


Figure 8 : Valeurs de  $K_D$  en section courante

### EN MUSOIR OU DANS LES COUDES

En musoir et dans les coudes, une baisse de 30% du coefficient de stabilité est nécessaire pour prendre en compte les effets tri-dimensionnels de l'action de la houle ainsi que les effets d'une imbrication des blocs plus difficile à obtenir sur chantier.

De la même manière qu'en section courante, le coefficient de stabilité est influencé par le déferlement de la houle.

Dans le cas d'une houle déferlante, la Figure 9 donne une estimation de la valeur de  $K_D$  à utiliser dans un coude ou un musoir.

Les conditions suivantes sont appliquées :

- Dans le cas d'une houle non déferlante, le  $K_D$  utilisé est celui d'une pente des fonds inférieure à 1%.
- Dans le cas d'une houle déferlante, la Figure 9 donne une estimation de la valeur de  $K_D$  à utiliser dans un coude ou un musoir.
- Au-delà de 10% des pentes des fonds devant l'ouvrage, un  $K_D$  encore plus faible sera utilisé par le concepteur de l'ouvrage et les essais en modèle physiques valideront la stabilité des blocs. Une approche conservative est fortement recommandée.

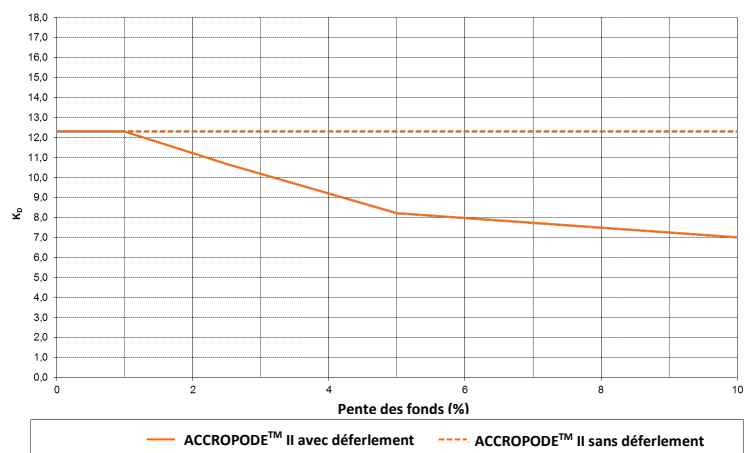


Figure 9 : Valeurs de  $K_D$  en musoir ou coude





Figure 10 : photographie de mise en place de blocs ACCROPODE™ à la grue sur barge

## Estimation de la taille des blocs

### Formule de Hudson

La taille des blocs ACCROPODE™ II est calculée selon la formule de Hudson, avec un coefficient de stabilité hydraulique qui varie comme indiqué dans la section précédente.

A droite, formule de Hudson modifiée pour obtenir le volume du bloc directement - Ref [1] Ciria –Cur-Guide Enrochements 2009 chapitre 5.2.2.2

$$V = \frac{H_s^3}{K_D \Delta^3 \cotan \alpha}$$

### Avec

V	Volume du bloc ACCROPODE™	m <sup>3</sup>
H <sub>s</sub>	Hauteur de houle significative (H <sub>1/3</sub> )	m
Δ	Densité relative du béton (ρ <sub>c</sub> - ρ <sub>w</sub> )/ρ <sub>w</sub>	kg/m <sup>3</sup>
ρ <sub>c</sub>	Masse volumique du béton	kg/m <sup>3</sup>
ρ <sub>w</sub>	Masse volumique de l'eau de mer	kg/m <sup>3</sup>
K <sub>D</sub>	Coefficient de stabilité hydraulique	[-]
cotan α	Co tangente de la pente du talus (voir les notes ci-dessous)	[-]

### Notes

Les pentes utilisables sont en général 4H/3V ou 3H/2V. Dans la formule de Hudson, il est préférable d'utiliser une pente de 4H/3V (cotan(α) = 1.33). Les pentes plus faibles entraînent une réduction de forces de frottement et d'imbrication qui ne favorisent pas la stabilité des blocs.

Les valeurs usuelles de masse volumique du béton sont en général comprises dans l'intervalle 2 300 kg/m<sup>3</sup> à 2 500 kg/m<sup>3</sup>. En dehors de cette plage, il est possible que la réponse hydraulique soit différente d'une carapace standard.



## Facteurs influant sur la stabilité des blocs

D'autres facteurs sont à prendre en compte pour affiner le pré dimensionnement issus de la formule de Hudson. Le Tableau 3 ci-dessous, indique les paramètres influents les plus couramment rencontrés. Il peut en exister d'autres en fonction de chaque chantier.

SITUATION	EFFETS	CORRECTION
<b>Ouvrage en zone de déferlement</b>	Houles fréquentes proches de la houle de projet. Effet de fatigue	Il est suggéré d'appliquer une baisse du coefficient de stabilité de 20%.
<b>Obliquité des vagues</b>	La stabilité de blocs tend à être supérieure quand l'attaque des vagues est oblique.	Il est conseillé de ne pas diminuer la taille des blocs.
<b>Pente de la carapace inférieure ou égale à 3H/2V</b>	L'imbrication entre bloc est moins efficace.	Dans la formule de Hudson, il est conseillé d'utiliser une valeur de $\cotan \alpha$ équivalent à une pente de talus 4/3 soit 1.33. Essais de stabilité obligatoires.
<b>Ouvrages à crête abaissée<sup>1</sup></b>	Action importante des franchissements sur les lignes d'angle et de crête.	Vérifications en modèle physique.
<b>Imperméabilité ou faible perméabilité du corps de digue</b>	Risque d'efforts supplémentaires sur les blocs et franchissements.	Selon le travail de <i>Burcharth et al.</i> , la stabilité peut baisser de 50% avec un noyau composé des matériaux fins et peut encore baisser lorsque les périodes de houles sont $T_p > 15$ s. Une baisse du coefficient de stabilité de 50% est donc recommandé sur les ouvrages non perméables.
<b>Grand nombre de rangées de blocs dans la pente</b>	Risque de tassements cumulatifs plus importants	Augmentation de la taille des blocs ou modification de la butée de pied pour respecter les critères conseillés dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 3 : Facteurs influant sur la stabilité des blocs

### Note

<sup>1</sup>D'après le [1] CIRIA-CUR-CETMEF Guide Enrochement L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques – 2009, chapitre 5.2.2.1, un ouvrage à crête abaissé dispose du niveau de crête au-dessus de l'eau ou au-dessous du niveau de l'eau au repos, soit le niveau de franchissement est important.

La combinaison de plusieurs facteurs mentionnés dans le tableau 3 doit être traitée avec une approche avisée pour être du côté de la sécurité. Les effets combinés sont moins bien connus. Dans ce cas, le coefficient de stabilité  $K_D$  le plus faible devra être sélectionné puis réévalué par un facteur de sécurité augmenté, à l'appréciation du concepteur de l'ouvrage. Une augmentation de la taille des blocs est souhaitable. Le modèle physique reste dans tous les cas fortement recommandé.

## Nombre de rangées dans le talus

Le nombre de rangées dans le talus doit être limité afin de maîtriser les possibles tassements cumulatifs causés par les réarrangements normaux des blocs de carapace. Ainsi, CLI recommande les valeurs suivantes du tableau 4 ci-dessous. Ces valeurs ne sont pas un impératif, mais si ces valeurs sont excédées, CLI recommande un surdimensionnement de la taille des blocs pour limiter leurs sollicitations par la houle de projet et donc le tassement.

Taille du bloc ACCROPODE™ II	Nombre maximal recommandé de lignes dans le talus
Inférieure à 4 m <sup>3</sup>	22
De 4 à 8 m <sup>3</sup>	20
De 8 à 16 m <sup>3</sup>	18
Supérieure à 16 m <sup>3</sup>	16

Tableau 4 : Nombre de lignes maximales recommandées

Afin de limiter le nombre de lignes, deux solutions sont possibles :

Augmenter la taille des blocs. Si cette solution conduit à une légère augmentation de la consommation de béton, elle diminue considérablement le nombre de blocs à poser et à fabriquer. Par ailleurs cela procure un facteur de sécurité supplémentaire.

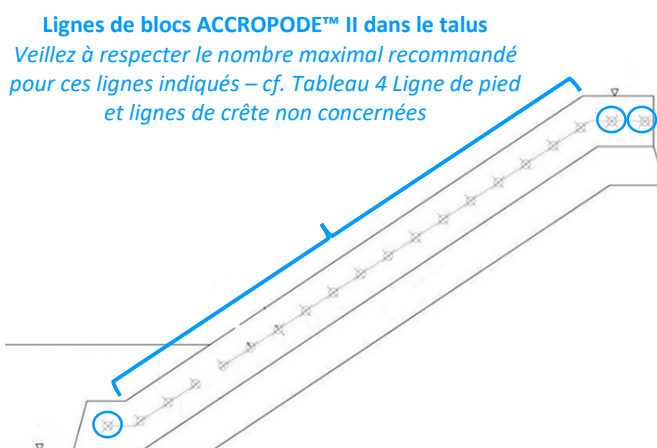


Figure 11 : Schéma de principe - nombre de ligne comptabilisées dans le talus

Remonter le niveau d'assise du pied de de la carapace (cf. Figure 12 ci-contre) pour limiter le nombre de rangées de blocs de carapace. Ce type de modification peut avoir un impact sur le déferlement de la houle. Une vérification de la stabilité de cette assise et de la butée est nécessaire.

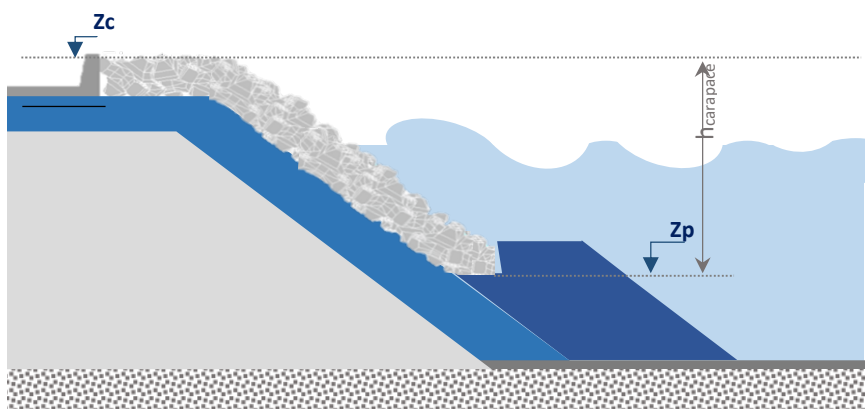


Figure 12 : Schéma de principe d'une coupe de digue avec assise du pied remontée

# 9. Sous-couche

## Agencement

Les blocs de carapace monocouche sont posés sur une sous-couche ayant des propriétés spécifiques. Afin de garantir un support adapté aux blocs de carapace, l'agencement des enrochements de sous-couche doit :

- Avoir une rugosité adaptée à la taille des blocs artificiels,
- Avoir une porosité de nature à absorber correctement l'énergie de la houle
- Assurer les règles de filtres entre le noyau et la carapace.

Il est nécessaire que la sous-couche respecte les règles de granulométrie et de forme des enrochements telles que données dans le CIRIA – CUR Guide Enrochement 2009.

*A droite - Figure 13 : Photographie d'une sous-couche avec faces cassées – pour le nouveau terminal en eau profonde du port de Kuantan (Malaisie) en face interne*



## Poids et Géométrie des enrochements

Le Tableau 5 résume les informations géométriques des enrochements à utiliser pour construire la sous-couche.

Dénomination	Valeurs d'encadrement	Note
Poids des enrochements	NUL et NLL - Ref [2]	Voir la table de conception disponible sur le site web de CLI : <a href="http://www.concretelayer.com">www.concretelayer.com</a> pour les recommandations et ci-dessous
Formes des enrochements	$L+G/2E \leq 3$ et $L/E < 3$	L : la plus grande dimension G : la plus grande dimension mesurable perpendiculaire à la direction L E : la plus grande dimension perpendiculaire au plan LG

Tableau 5 : Enrochements de la sous-couche

Les limites nominales (NLL et NUL) de l'enrochement naturel de la sous-couche doivent se situer entre 7% [NLL] et 14% [NUL] de la masse du bloc de carapace (voir Ref [1] chapitre 5.2.2.3). Une tolérance est toutefois applicable pour optimiser le nombre de catégories d'enrochements sur un projet. (Voir Tableau 6)

La granulométrie ne doit être ni trop étroite (ce qui conduit à des difficultés de réalisation), ni trop étalée (ce qui conduit à une réduction de la porosité du filtre et à un risque potentiel de ségrégation). Pour s'assurer de cette bonne répartition de la granulométrie, il est préférable de prendre en compte la relation suivante :  $2 \leq NUL/NLL \leq 3$  (voir Ref [1] chapitre 5.5.5.3 et Ref [2]). Les enrochements doivent avoir des formes anguleuses et des faces cassées en nombre important.





Figure 14 : Photographie d'une sous-couche

## Épaisseur de la sous-couche

L'épaisseur de cette sous-couche est calculée comme indiqué :

$$e = n \cdot K_{t2} \cdot D_{n50}$$

**Avec**

*e* : épaisseur de la sous couche ;

*n* : nombre de couches ;

*K<sub>t2</sub>* : coefficient de sous-couche ; pour ACCROPODE™II, *K<sub>t2</sub>*=1.15

*D<sub>n50</sub>* : diamètre nominal des enrochements de sous couche

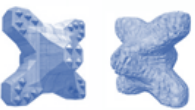
Dans le cas où les enrochements naturels de carrière ne sont pas disponibles, il est possible d'utiliser les enrochements artificiels type béton éclaté ou autre type de blocs. Des études spécifiques devront démontrer l'équivalence avec des enrochements naturels de carrière.

### Note concernant la construction de la sous-couche

Pour la construction de la sous-couche, il est important de noter que celle-ci doit respecter des tolérances de mise en place liées à la technique ACCROPODE™ II, c'est-à-dire qu'en tout point de la sous-couche la tolérance admissible est de +/- H/6 par rapport au profil théorique, H étant la hauteur du bloc ACCROPODE™ II considéré (cette mesure est réalisée verticalement).

# 10. Table de pré-dimensionnement

béton, densité ...etc. Cette table de conception est disponible ci-dessous et sur le site internet de CLI [<https://www.concretelayer.com>]. Il est préférable de se référer à la table disponible sur le site internet qui contient les mises à jour les plus récentes.



## Table de Pré-dimensionnement ACCROPODE™ II - ECOPODE™

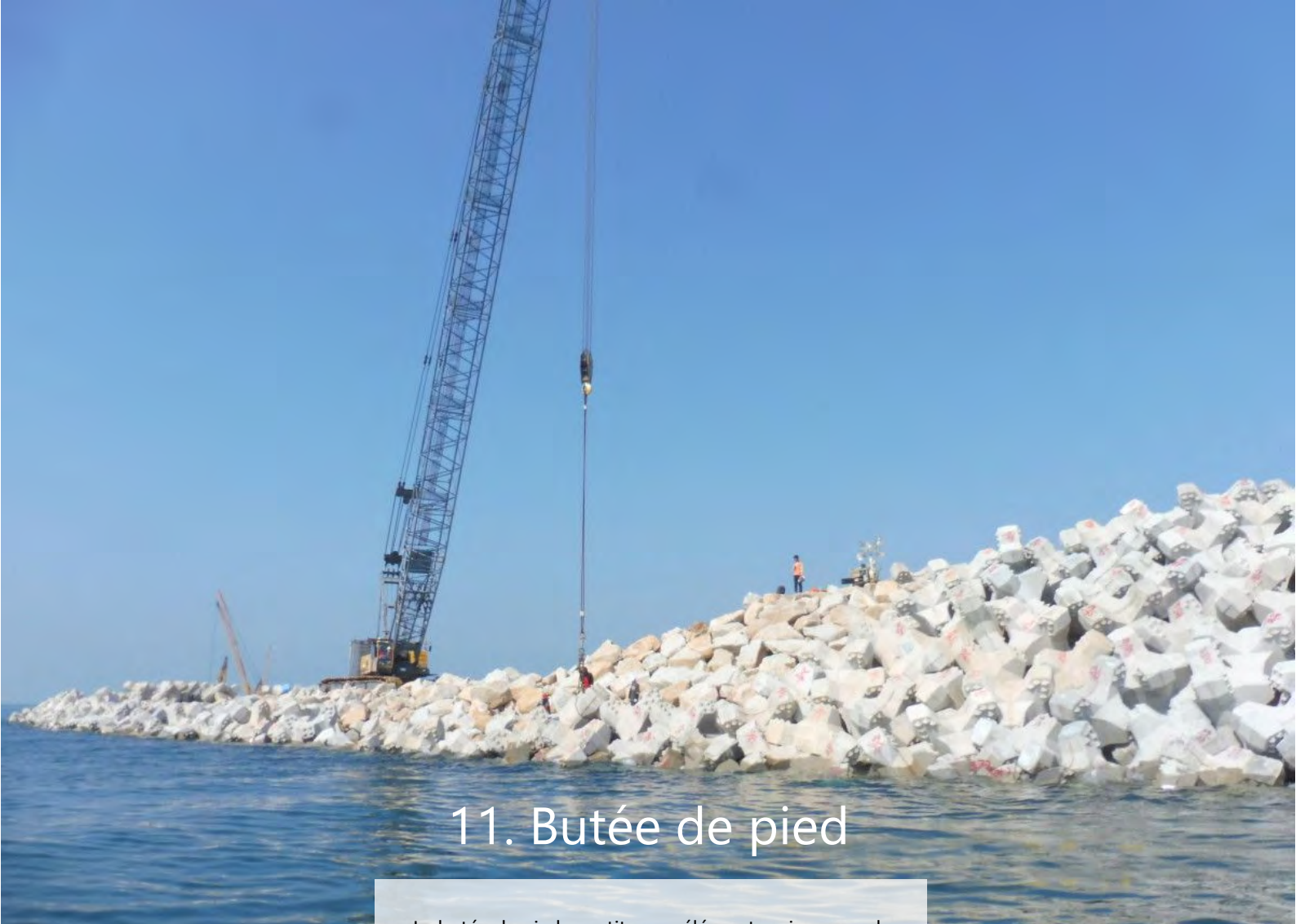
Le volume de l'ECOPODE™ est limité à 10m³

Volume unitaire (m³)	$V = 0,2926H^3$		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	22,0	24,0	28,0	
Hauteur du bloc (m)	$H = (V/0.2926)^{1/3}$		1,51	1,90	2,17	2,39	2,58	2,74	3,01	3,25	3,45	3,63	3,80	3,95	4,09	4,22	4,34	4,57	
Hauteur du cube de même volume (m)	$D_n = V^{1/3}$		1,00	1,26	1,44	1,59	1,71	1,82	2,00	2,15	2,29	2,41	2,52	2,62	2,71	2,80	2,88	3,04	
Épaisseur de carapace (m)	$T = 1,36 D_n$		1,36	1,71	1,96	2,16	2,33	2,47	2,72	2,93	3,11	3,28	3,43	3,56	3,69	3,81	3,92	4,13	
Consommations de béton	Densité de pose Ø		0,635	0,635	0,635	0,633	0,631	0,629	0,625	0,622	0,618	0,614	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610
	Consommation (m³/m²)		0,635	0,800	0,916	1,005	1,079	1,143	1,251	1,339	1,414	1,479	1,537	1,599	1,656	1,709	1,760	1,852	
	Nombre de blocs (u/m²)		0,635	0,400	0,305	0,251	0,216	0,191	0,156	0,134	0,118	0,106	0,096	0,089	0,083	0,078	0,073	0,066	
	Porosité (%)		53,31	53,31	53,31	53,45	53,59	53,73	54,02	54,30	54,58	54,86	55,15	55,15	55,15	55,15	55,15	55,15	55,15
Enrochements de sous-couche Critère à respecter : NUL/NLL < 3.0	NLL (tonnes)	Standard	0,17	0,34	0,50	0,67	0,84	1,01	1,34	1,68	2,02	2,35	2,69	3,02	3,36	3,70	4,03	4,70	
		Min/Max*	0,1   0,2	0,2   0,4	0,4   0,7	0,5   0,9	0,6   1,1	0,7   1,3	0,9   1,7	1,2   2,2	1,4   2,6	1,6   3,1	1,9   3,5	2,1   3,9	2,4   4,4	2,6   4,8	2,8   5,2	3,3   6,1	
	NUL (tonnes)	Standard	0,34	0,67	1,01	1,34	1,68	2,02	2,69	3,36	4,03	4,70	5,38	6,05	6,72	7,39	8,06	9,41	
		Min/Max*	0,2   0,4	0,5   0,9	0,7   1,3	0,9   1,7	1,2   2,2	1,4   2,6	1,9   3,5	2,4   4,4	2,8   5,2	3,3   6,1	3,8   7,0	4,2   7,9	4,7   8,7	5,2   9,6	5,6   10,5	6,6   12,2	
	Épaisseur (m) pour NLL&NUL=2 standard (densité 2,6 t/m3)	Kt=1,15	1,06	1,33	1,52	1,68	1,81	1,92	2,11	2,28	2,42	2,55	2,66	2,77	2,87	2,96	3,05	3,21	
		Kt=0.9*	0,83	1,04	1,19	1,31	1,41	1,50	1,65	1,78	1,89	1,99	2,08	2,17	2,24	2,32	2,38	2,51	

Tableau 6 : Extrait de la Table de pré-dimensionnement ACCROPODE™ II et ECOPODE™

Kt=0.9\* : valeur minimale qui dépend de la forme et de la mise en place des enrochements. Pour les faces exposées à la houle utiliser la valeur de Kt=1.15





## 11. Butée de pied

La butée de pied constitue un élément majeur pour la stabilité des carapaces. Le concepteur prendra en compte le fait que celle-ci doit être constructible et que les difficultés liées à sa construction (profondeur, nature des fonds, pente des fonds houle) ne doivent pas affecter la stabilité de l'ouvrage.

*Figure 15: Photographies – mise en œuvre du brise-lame pour le nouveau terminal en eau profonde du port de Kuantan*  
*Figure 16 : butée de pied en enrochements tranchée en V*

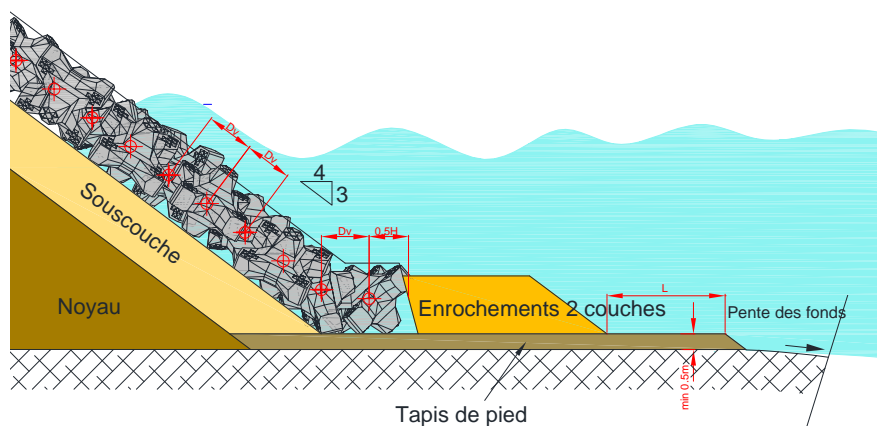




## Types de butées de pied

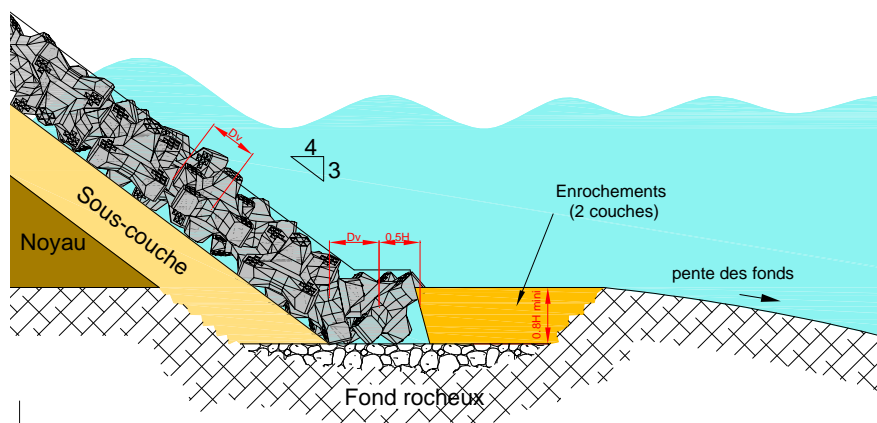
### BUTÉE DE PIED ACCROPODE™

La butée ACCROPODE™ II est la solution de base pour assurer une bonne stabilité dans la plus part des cas. C'est la plus utilisée, car elle est la plus facile à construire. Elle est composée d'une rangée de blocs de carapace placés sur un tapis de pied et renforcée par une double couche d'enrochements permettant d'assurer la stabilité du premier bloc de carapace. L'épaisseur des enrochements ne doit pas être supérieure à l'épaisseur des blocs de carapace monocouche. L'épaisseur de la butée ne doit normalement pas être inférieure à 2/3 de la hauteur du bloc.



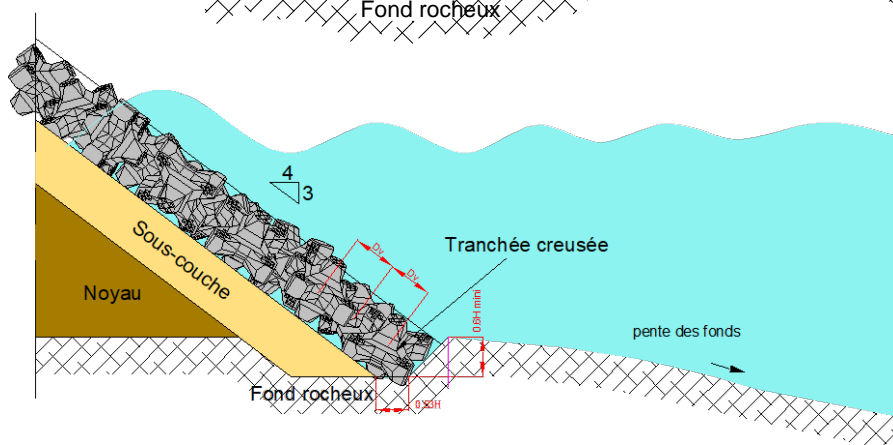
### BUTÉE DE PIED ENSOULEILLÉE TYPE I SOL MEUBLE ET ROCHEUX

Ce type de butée est habituellement recommandé en eaux peu profondes lorsqu'il est difficile d'obtenir une stabilité suffisante des enrochements ou des matériaux anti-affouillement. La configuration est semblable à la précédente, mais simplement posée dans une souille excavée en pied d'ouvrage. S'il y a un risque d'affouillement ou de poinçonnement, une sous couche est alors recommandée en fond de souille.



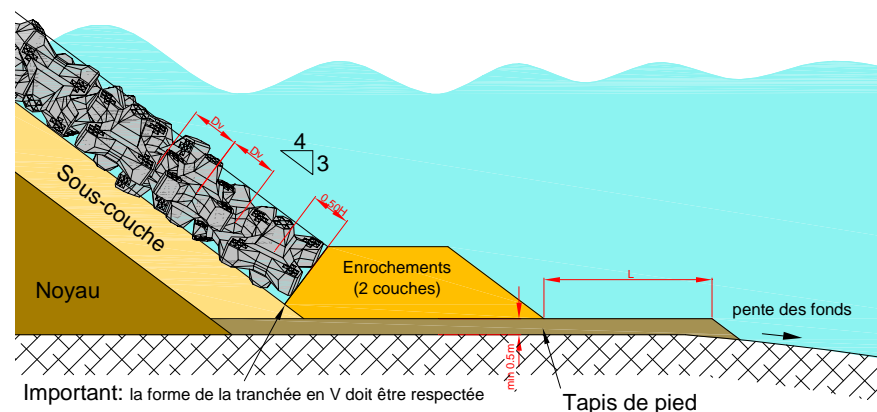
### BUTÉE DE PIED ENSOULEILLÉE TYPE II ROCHER

Ce type de butée est généralement utilisée dans les zones les plus exposées de l'ouvrage où les butées classiques ne peuvent pas résister à l'action de la houle. Les blocs sont posés dans une tranchée en forme de V excavée dans le rocher. La réalisation est plus difficile et elle n'est utilisée que dans les cas les plus sévères. La réalisation requiert beaucoup d'attention. Sa qualité dépend beaucoup de la nature et du pendage de la roche.



### BUTÉE DE PIED EN ENROCHEMENTS TRANCHEE EN V

Cette butée est rarement utilisée car sa construction est beaucoup plus complexe et plus coûteuse à réaliser. Les alternatives présentées ci-dessus permettent de s'affranchir de la complexité de réalisation de cette butée. Elle est généralement réalisée dans des conditions de bonne visibilité, à faible profondeur (inférieur à 2m), et avec des enrochements inférieurs à 2 T. L'utilisation de pelle hydraulique est quasi obligatoire. Voir figure 16.



Important: la forme de la tranchée en V doit être respectée

Tapis de pied

Ci-contre :

Figure 17 : butée de pied ACCROPODE™II

Figure 18 : butée de pied ensouillée type I – sol meuble et rocheux

Figure 19 : butée de pied ensouillée type II - rocher

Figure 20 : butée de pied en enrochement tranchée en V

## BLOCS DE PIED ACCROBERM™ I ET II

Deux types de blocs de pied ont été mis au point afin d'apporter une solution plus fiable et plus économique. Chacune de ces deux solutions doit être utilisée dans les conditions spécifiques décrites ci-après.

### ACCROBERM™ I

Ce bloc permet de remplacer la première ligne de blocs ACCROPODE™ II et de supprimer la double couche d'encrochements en contre-butée dans une butée standard. Il réduit donc considérablement l'emprise de l'ouvrage sur le fond ainsi que la quantité de matériaux à mettre œuvre. Il permet de répondre aux difficultés de stabilisation des encrochements des butées classiques.

Ce bloc est particulièrement indiqué quand les pentes des fonds faisant face à l'ouvrage sont situées entre 0 et 5%. Pour une pente des fonds supérieure, il est possible que ce bloc ne suffise pas à stabiliser le pied. Une butée ensouillée sera alors nécessaire.

Le poids du bloc est égal au poids du bloc ACCROPODE™ II qu'il supporte. La maille est également calée sur la maille du bloc ACCROPODE™ II qu'il supporte.

La méthodologie de pose de la première ligne de bloc ACCROPODE™ II de carapace est adaptée pour obtenir le meilleur transfert de charges entre la carapace et sa butée. Cette première ligne pourra être posée de manière systématique et orientée de façon similaire.

### ACCROBERM™ II

Ce bloc est utilisé dans une optique d'éco-conception. Il vient se positionner en « contre-butée » en remplacement des encrochements de renfort du pied. Ce bloc annulaire est rempli en son centre par des encrochements de taille définie en fonction des espèces ou des stades de vie de la biodiversité ciblée.

Il permet de réduire considérablement l'emprise de l'ouvrage et de créer un nouvel écosystème choisi. Les larves captées par les blocs de carapace en surfaces peuvent trouver un substrat adapté pour s'établir plus facilement dans une zone protégée en pied d'ouvrage. La taille des encrochements disposés à l'intérieur de l'ACCROBERM™ II permet de faire varier la taille des interstices et de l'adapter aux espèces cibles. D'autres méthodes d'écoconception et de remplissage sont possibles pour ce bloc.

La taille des ACCROBERM™ II est calée sur la maille des blocs de carapace. Il est donc conseillé de contacter CLI pour déterminer la taille la plus adaptée.

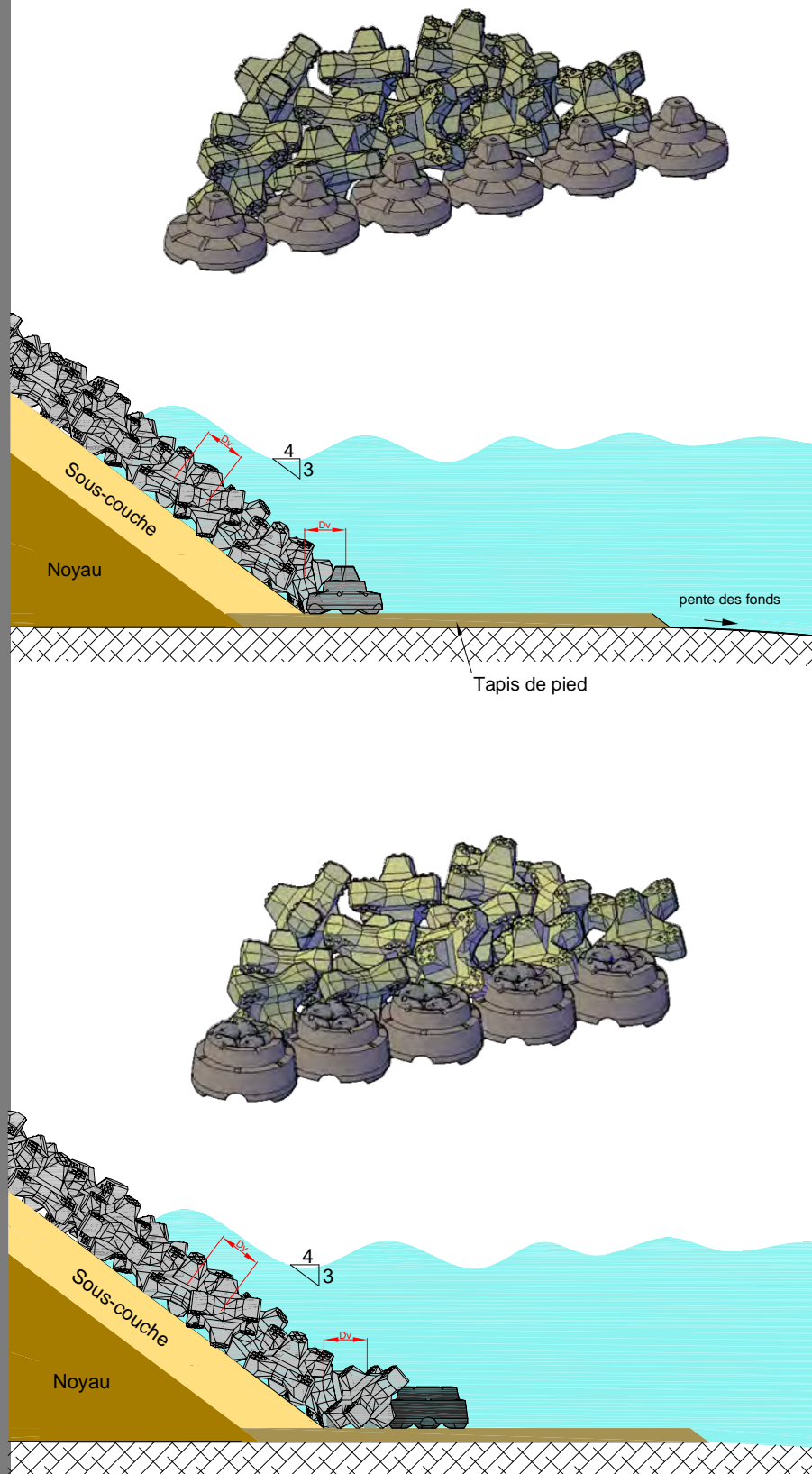
Ci-dessous :

Figure 21 : Vue 3D - placement ACCROBERM™ I

Figure 22 : Bloc ACCROBERM™ I en position de butée

Figure 23 : Vue 3D - placement ACCROBERM™ II

Figure 24 : Bloc ACCROBERM™ II en position de contre butée





## Approche générale de la profondeur de la butée de pied

Côté mer et quand cela est possible, la côte d'arase supérieure de la butée de pied ( $h_T$ ) est en général située à une profondeur minimale de  $1.5H_s$  en dessous du niveau d'eau le plus bas. Ref [1] chapitre 6.1.4.2.

Les détails pour le dimensionnement des enrochements et la position de la butée sont données dans le Guide Enrochement Ref [1] au chapitre 5.2.2.9

Pour des ouvrages à faible profondeur  $H_s < h_T < 1.1 H_s$ , il est fortement conseillé d'utiliser des butées de types ensouillées.

Côté port, la profondeur de la butée de pied dépend de l'agitation à l'intérieur du port et de l'importance des franchissements. Ref [1] chapitre 6.1.4.2. Cette première approche doit impérativement être complétée par des essais en modèle physiques.

*A droite - Figure 25 :  
photographie d'une digue en  
cours de construction*





## Stabilité de la butée de pied

Lorsque la butée de pied est constituée d'encrochements, il est important de considérer que leur stabilité est primordiale pour la tenue globale de la carapace. Ces encrochements doivent être stables et ne pas être remodelés par la houle dans les conditions de projet.

La butée doit garantir l'efficacité du blocage de la carapace durant toute la vie de l'ouvrage.

Les encrochements ne doivent pas être projetés dans la carapace (Risque de casse des blocs artificiels)

Ils doivent garantir la protection contre les affouillements le cas échéant.

Il est fortement recommandé d'utiliser des critères de stabilité stricts avec par exemple un nombre de dommage limite de  $N_{od} = 0.5$ . Il faut garder à l'esprit que dans le cas d'une butée standard ou d'une butée dite encrochements, la largeur minimale devra être de  $3 D_{n50}$ .

Au stade du pré-dimensionnement de la butée de pied, la formule de Van Der Meer et al (1995) donnée ci-dessous est couramment utilisée, mais cette première approche devra être complétée par un modèle physique.

$$W_{50} = \left( \frac{H_s}{(2 + 6.2 (h_b/h)^{2.7}) N_{od}^{0.15} \Delta} \right)^3 \rho_r$$

Ref [1] Chapitre 5.2.2.9

$W_{50}$  : Poids médian de l'encrochement  
 $h$  : hauteur d'eau en pied d'ouvrage  
 $h_b$  : hauteur d'eau sur la butée  
 $N_{od}$  : Niveau de dommage  
(nombre de blocs déplacé d'une distance  $D_n$ )  
✓ = 0.5 début de dommage  
✓ = 2 léger aplanissement  
✓ = 4 butée aplaniée.  
 $\Delta$  : Densité relative des encrochements  
 $\rho_w$  : Densité de l'eau de mer  
 $\rho_r$  : Densité des encrochements

A gauche - Figure 26 : blocs ACCROPODE™ II sur digue



## 12. Crête de l'ouvrage

Le type, le niveau et la largeur de la crête de la digue sont en général définis par les paramètres suivants :

- Le débit de franchissement conforme aux critères du projet et notamment à la destination de l'ouvrage
- La nécessité ou non de rendre la crête de l'ouvrage accessible
- Aspects constructifs permettant d'optimiser les coûts du projet.

En général, les valeurs minimales ci-dessous sont adoptées pour la largeur de berme en blocs artificiels:

- $3 \times D_n$  lorsqu'il y a un mur de couronnement
- $2 \times D_n$  lorsqu'il y a un enrochement à l'arrière du dernier bloc
- $3 \times D_n$  lorsque la crête est totalement couverte

Avec  $D_n = V^{1/3}$  pour un bloc ACCROPODE™ II

Ces principes permettent de s'assurer que l'imbrication des blocs entre eux et avec le mur de couronnement est suffisante. En dessous de cette limite, la pose des blocs reste faisable mais cela rend l'exécution plus difficile. En revanche il est fortement déconseillé de n'avoir qu'une seule rangée de blocs en crête contre un mur de couronnement. Il existe en effet un risque que cette unique rangée ne soit pas correctement bloquée entre la pente et le mur. Les digues à crête abaissée (arase située à moins d'une hauteur de  $H_s$  du niveau d'eau maximal de projet) doivent faire l'objet d'une attention particulière car les blocs de carapace placés sur une surface horizontale ont moins de capacité à s'imbriquer. Il est donc recommandé d'augmenter le poids unitaire des blocs et de procéder à des essais en modèle physique afin de déterminer leur stabilité (Ref [1] chapitre 5.2.2.4). Par ailleurs dans une optique de maintenance de l'ouvrage, il est recommandé de prévoir une voie d'accès permettant de réaliser les travaux de maintenance de la carapace. Dans le cas où aucune voie d'accès ne permet de réaliser la maintenance de l'ouvrage, il est envisageable de faire cette maintenance depuis des moyens maritimes.

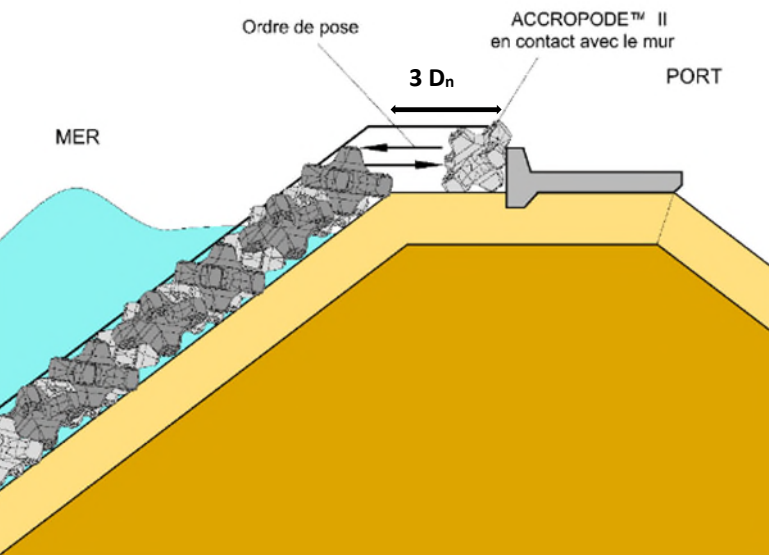


Figure 27 : Exemple de crête avec mur de couronnement

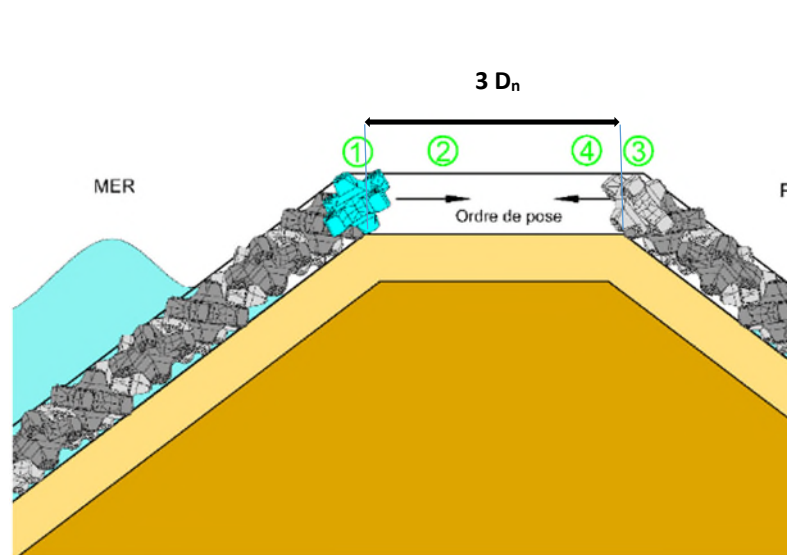


Figure 28 : Exemple de crête couverte totalement

## 13. Escalier



Un escalier peut être intégré dans la carapace. En l'absence de dalle/cheminement d'accès en crête, un escalier peut permettre l'accès pour la maintenance d'équipements (phares, lumières, etc).

Ce type d'escalier doit être positionné dans les endroits les moins exposés de la digue. Il est préférable de privilégier un positionnement de l'escalier dans une zone calme comme les talus interne et non proche du musoir.

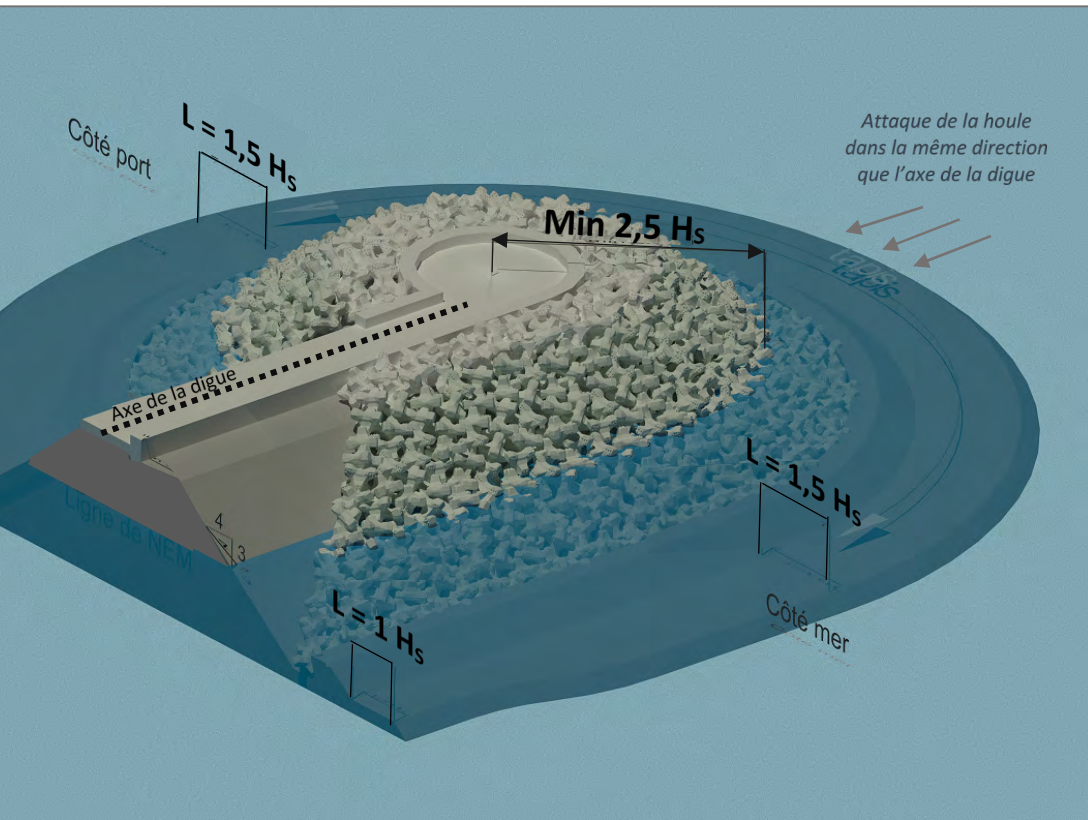
L'escalier doit être dimensionné et adapté à la réglementation locale.

*A gauche, ci-contre :  
Figure 29 & Figure 30 :  
Photographies d'un escalier  
d'accès en béton armé*





# 14. Musoir



Le musoir est en général la partie la plus fortement exposée de l'ouvrage à cause de la diffraction des vagues et des franchissements. L'imbrication des blocs de protection dans cette section de la digue est plus délicate à cause de la forme conique, et donc elle requiert une attention particulière lors de la pose. Les critères de conception doivent prévoir une marge supplémentaire de sécurité.

Le rayon du musoir doit être au moins égal à 2,5 fois la hauteur d'houle de projet (Le rayon est mesuré à l'horizontale partant du centre du musoir jusqu'à l'extérieur de la carapace au niveau d'eau maximal considéré pour le projet).

En cas d'attaque de la houle dans la même direction de l'axe de la digue, il est conseillé d'utiliser un rayon minimum du musoir de 3H<sub>s</sub> projet ou supérieur, évalué au niveau de la mer.

*A gauche, ci-contre :*  
*Figure 31 : Vue 3D d'un musoir*  
*Figure 32 : Photographie du musoir sur le projet de l'extension du port de Constanta en Roumanie*



# 15. Talus interne

Les paramètres principaux pour la conception de la carapace du talus interne de la digue sont définis par :

- Les volumes d'eau franchissant l'ouvrage
- L'agitation à l'intérieur du port (Houle diffractée, réfléchie ou incidente, vent)
- La transmission de la houle au travers de la digue

Il n'y a pas de formule spécifique pour dimensionner la carapace en blocs artificiels monocouche à l'intérieur de la digue. La formule de Husdon pourra permettre une première approche en cas de houles à l'intérieur du port, mais elle sera très vite limitée. Une approche par modèle physique est préférable en tenant compte des effets mentionnés au-dessus. On prêtera alors une attention particulière à la butée de pied coté interne et aux conséquences des franchissements.

Des modèles physiques en laboratoire seront nécessaires pour déterminer la stabilité de ce talus interne.

*Ci-dessous - Figure 33 : Photographie d'une digue à Aberdeen (Ecosse) en blocs ACCROPODE™ II*





# 16. Transitions

Les transitions entre différentes tailles/types de blocs ou avec des enrochements, sont des points particuliers qu'il convient de traiter avec attention, car elles génèrent une perte de maillage dans la carapace et celle-ci doit être considérée comme un point critique.

En premier lieu, il est fortement recommandé de ne pas positionner ces transitions dans les endroits critiques vis-à-vis de la houle (musoir et coude). Les essais physiques peuvent aider à localiser les endroits de concentration de la houle pour éviter de positionner les transitions dans ces zones.

Une transition entre blocs doit être mise en place en suivant une ligne à 45° sur la hauteur du talus. Les blocs le plus gros doivent être placés au-dessous des blocs plus petits. Dans la mesure du possible, la différence de volume entre blocs doit être au maximum de 30% pour éviter des écarts d'épaisseur de la carapace. Lorsque les différences d'épaisseur de carapaces sont petites (inférieures à H/6) on préférera aligner les sous couches. Lorsqu'elles sont supérieures à H/6, il est préférable de consulter CLI.

Le changement de taille de sous-couche doit également suivre la transition entre les blocs dans la mesure du possible. Il est également possible de faire des transitions entre blocs bicouche et mono couche. Il est préférable d'aligner les carapaces extérieures pour éviter des effets de marches entre les blocs.

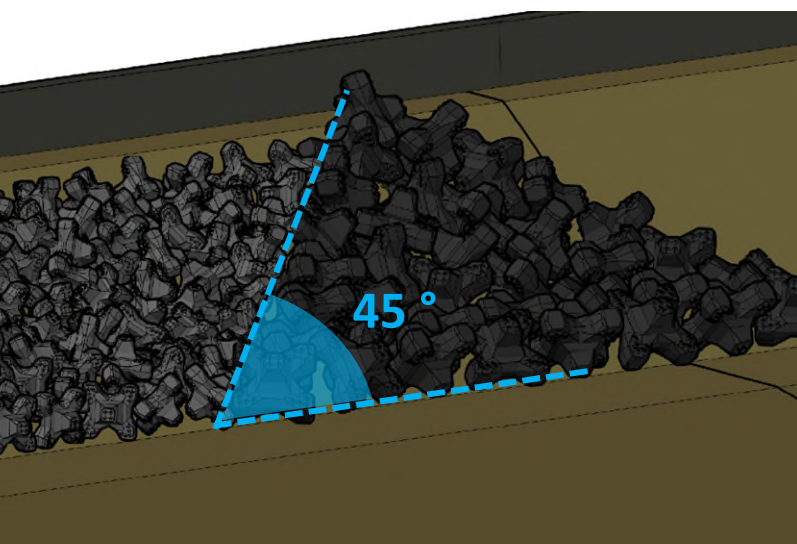


Figure 34 : Transition entre deux tailles différentes de blocs ACCROPODE™ II



Figure 35 : Zoom sur la transition de la figure 34

- La transition est faite à 45°
- Les blocs les plus petits reposent sur les plus gros
- Veiller à l'imbrication des blocs de différentes tailles
- Lors de la pose, il faut veiller à ne pas créer d'aération ou de perte d'imbrication
- Maille adaptée à la transition (suivant plan de pose)
- Il est recommandé d'éviter une différence d'épaisseur entre les deux carapaces en adaptant la sous-couche.
- Limiter les écarts entre deux tailles de blocs à 30%

# 17. Métré

## Les étapes

La méthode classique pour réaliser le métré consiste à utiliser une solution graphique.

### ① Déterminer le volume des blocs ACCROPODE™ II

#### ① Déterminer la position de la fibre neutre graphiquement

La fibre neutre se situe au milieu de la carapace ACCROPODE™ II soit à  $T/2$ .  $T$  étant l'épaisseur d'une couche de carapace.  $T$  est fonction de la hauteur du bloc ACCROPODE™ II

(cf. Table de pré-dimensionnement – tableau 6).

La détermination graphique de la fibre neutre doit être fait pour chaque profil/section et sa longueur doit être ajustée en fonction du type de butée et des effets de bord (cf. figure 36 ci-contre, à droite)

Au final, on obtient une longueur de fibre neutre pour chaque section.

#### ② Déterminer la surface théorique de répartition des blocs ACCROPODE™ II

Surface théorique = somme des longueurs des fibres neutres multipliés par le linéaire de la section d'application

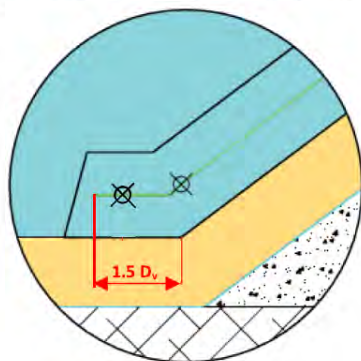
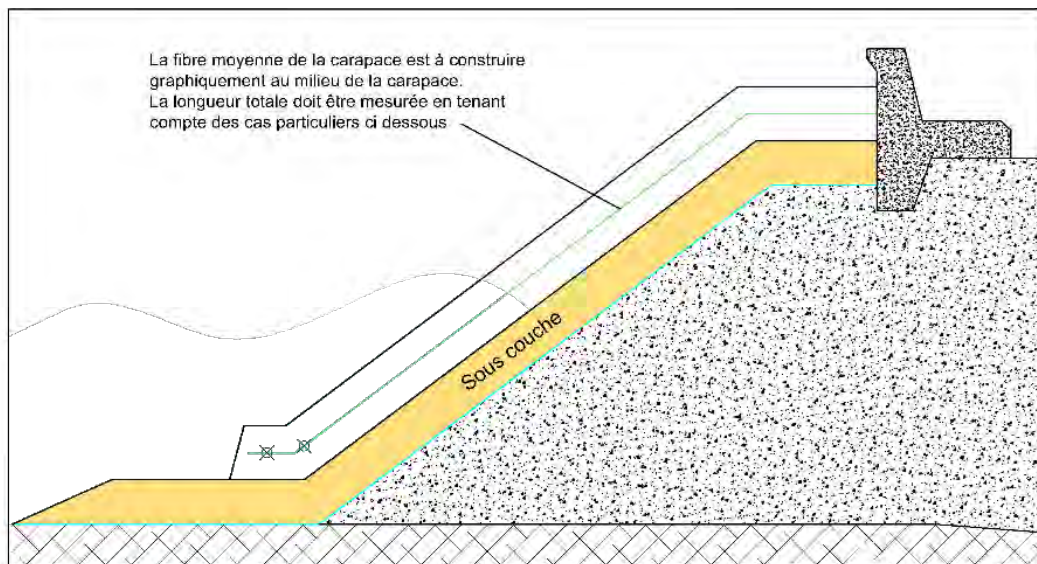
#### ③ Nombre de blocs ACCROPODE™ II

Nombre de blocs ACCROPODE™ II = Surface théorique x N  
Avec N, nombre de blocs/m<sup>2</sup>

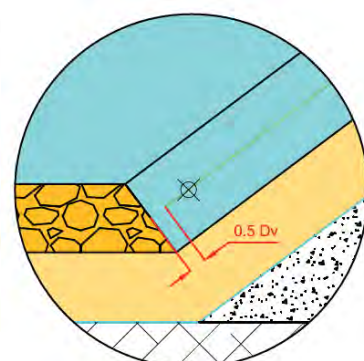
#### ④ Volume de béton

Volume de béton = surface théorique x consommation de béton en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (cf. Table de pré-dimensionnement – tableau 6)

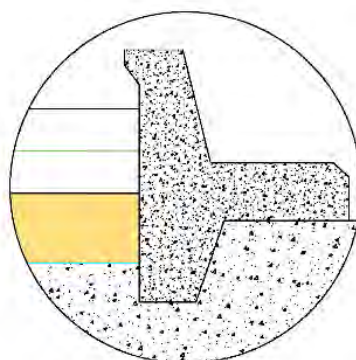
A droite - Figure 36 : Positionner graphiquement la fibre neutre



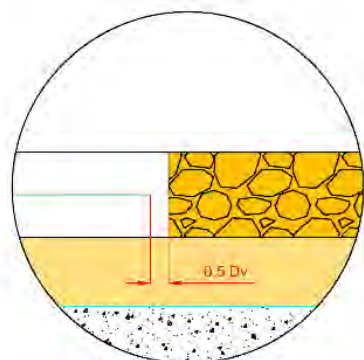
Cas de butée en ACCROPODE™ II  
Distance entre le pied de sous couche et le bout de la fibre moyenne = 1.5 Dv



Cas de butée en enrochements  
Distance entre la butée et la fin de la fibre moyenne = 0.5 Dv



Cas de mur de couronnement  
la fibre moyenne arrive directement au niveau du mur



Cas d'enrochements en crête  
Distance entre la limite théorique des enrochements et le bout de la fibre moyenne = 0.5 Dv

NB : Pour Dv de chaque taille, il est conseillé de contacter CLI afin d'obtenir la valeur exacte.



# 18. Modèle physique

## Maquettes et assistance en laboratoire

Les essais en modèles physiques sont une étape essentielle dans la conception d'un projet. Ils permettent d'appréhender des phénomènes complexes qui ne sont pas calculables par des formules empiriques. Ces essais sont fortement recommandés et souvent un passage obligatoire pour la mise point d'un projet.

Dans le cadre de l'assistance technique liée à la concession de la marque ACCROPODE™, CLI assiste les parties prenantes lors des modèles physiques dans tous les laboratoires du monde. Cette assistance consiste à fournir les maquettes des blocs nécessaires et à former les personnels de laboratoire à la pose de ces blocs. Cette formation comprend une partie théorique et une partie pratique permettant une pose conforme aux attentes de la technique. En effet, la qualité de pose et le respect de la densité sont des éléments clés pour la réussite d'un projet. Un document synthétisant les méthodes de pose est remis systématiquement au laboratoire lors de chaque intervention sur place d'un des experts de CLI. La liste des maquettes disponible peut être obtenue sur demande à CLI soit sur le site internet [www.concretelayer.com](http://www.concretelayer.com) à la rubrique contact ou par email à [cli@concretelayer.com](mailto:cli@concretelayer.com).

*Ci-dessous - Figure 37 : Modèle physique réduit – 3D – phase construction*





## Stabilité des blocs en modèle physique

### INFORMATIONS SUR LES ESSAIS

Le concepteur de l'ouvrage se référera aux standards relatifs aux essais en modèles physiques dont le manuel d'HYDRALAB ref [3] qui est un document essentiel. Seuls sont donnés ci-dessous des éléments pouvant aider à la compréhension des essais relatifs aux blocs de carapace ACCROPODE™ II.

La conception d'une carapace monocouche en bloc ACCROPODE™ II doit tenir compte d'un paramètre de "non dommage" face aux conditions de houle du projet.

Les essais ont généralement lieu en incrémentant la taille des houles en partant des plus petites vers les plus grandes (Exemple de périodes de retour 1 an, 5 ans, 10 ans, 50 ans 100 ans ou plus si nécessaire). Les tests avec une houle de surcharge sont fortement conseillés et font partie des programmes usuels de tests. Cette houle est généralement de 120% de la houle de projet. Ces tests permettent d'estimer la réserve de stabilité hydraulique de la carapace. Les caractéristiques des houles et leurs durées seront déterminées par le concepteur de l'ouvrage.

Les niveaux d'eau ont des effets très important sur le comportement de la houle, il est donc important de tester l'ouvrage sous les divers niveaux d'eau possibles et leur combinaison avec houles de projet. Les niveaux bas ont souvent un effet direct sur la stabilité de la butée de pied.

Dans tous les cas, une attention particulière sera portée à la butée et sa fondation. La butée de pied doit assurer son rôle sous toutes les conditions de houles. Elle ne doit pas être remodelée de manière significative et les enrochements ne doivent pas être projetés contre la carapace.

Les critères de dommages sont déterminés par le concepteur de l'ouvrage car il est le seul à connaître en détails sa conception et les conditions spécifiques au site. Le concepteur peut obtenir l'assistance de CLI pour répondre aux questions relatives à la technique des blocs.

*Ci-contre - Figure 38 : Modèle physique réduit – 3D – phase construction*



---

## CRITERE DE DOMMAGES USUELS UTILISES EN MODELES PHYSIQUES

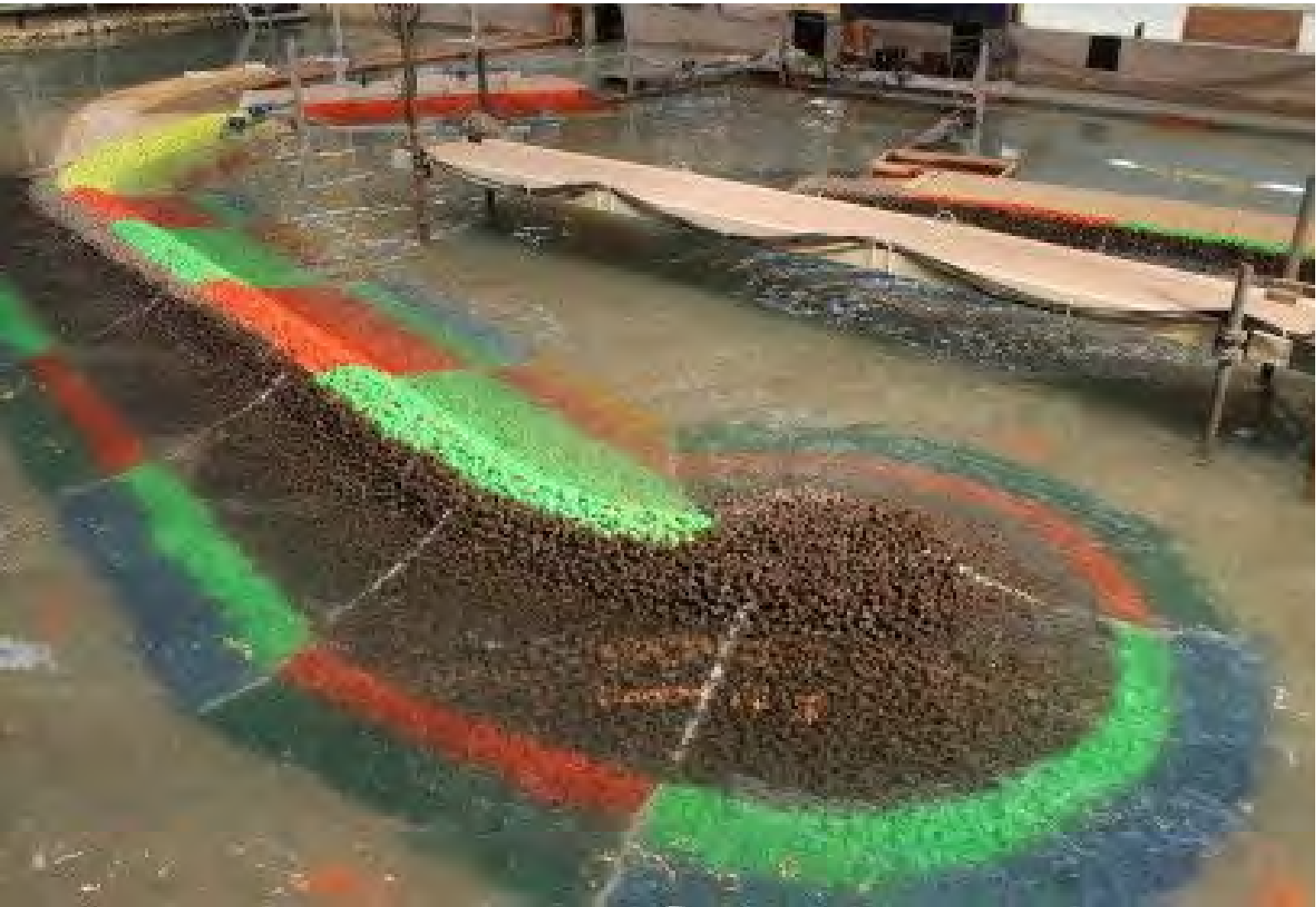
Critère de dommages usuels pour des conditions de houle de projet ( $H_s$ ):

- ✓ Pas d'extraction de maquettes ACCROPODE™ II ;
- ✓ Tassements des blocs ACCROPODE™ II limités ;
- ✓ Moins de 1% d'oscillation permanente pour les maquettes ACCROPODE™ II ;

Pour une surcharge à 120 % des conditions de houle de projet (120 %  $H_s$ ), le critère de dommage est :

- ✓ Pas d'extraction de maquettes ACCROPODE™ II.

*Ci-dessous -Figure 39 : Photographie d'un modèle de digue avec blocs ACCROPODE™ II en cours d'essais en laboratoire*



## 19. Services et assistance technique

L'assistance technique liée au contrat de concession de sous licence des blocs fournie par CLI est un facteur clé pour le succès du projet. Pour cette raison, CLI accompagne les acteurs dans les différentes étapes des projets, depuis l'étude de faisabilité en passant par la construction jusqu'au suivi de l'ouvrage pendant son exploitation. Cette assistance technique intègre les services suivants.

### Assistance pour la phase conception de l'ouvrage

#### ASSISTANCE AU PRE-DIMENSIONNEMENT DE LA CARAPACE

CLI assiste les différents acteurs au niveau du pré-dimensionnement conceptuel de la carapace. Cette assistance vise à fournir au concepteur de l'ouvrage les informations générales relatives aux spécificités des blocs de carapace. Cela permet au concepteur de l'ouvrage de disposer des éléments clés génériques permettant de réaliser la conception de la structure sans que CLI n'intervienne dans la conception elle-même.

#### TESTS EN MODÈLES PHYSIQUES

CLI fournit les maquettes des blocs requises pour les tests 2D et/ou 3D en modèle physique dans le laboratoire choisi par le client. Une assistance technique est également fournie in situ au laboratoire par un des experts de CLI afin d'assurer la formation à la pose nécessaire permettant de mettre en œuvre les blocs ACCROPODE™ II en accord avec ses règles spécifiques.

#### PHASE D'APPEL D'OFFRES

Pendant les phases d'appel d'offres, les experts de CLI sont aussi disponibles pour répondre à toute question concernant la technique dans le respect de la plus stricte confidentialité.

*A droite - Figure 40 : Assistance technique sur chantier par un représentant CLI*







## Assistance en phase de construction

### AU DEBUT DES TRAVAUX

Dans le cadre du contrat de licence, CLI fournit les spécifications nécessaires à l'Entreprise en charge des travaux de construction. Entre autres, les services suivants sont apportés :

- Remise du Document d'Information Technique ; document qui rassemble les spécifications et l'expérience des 380 projets réalisés dans le monde
- Fourniture d'une liste de fabricants expérimentés de coffrages ACCROPODE™ II ou de coffrages d'occasion disponibles ;
- Fourniture des plans de formes et de principes de coffrage ;
- Revue et conseils sur les méthodes de fabrication et de pose des blocs ACCROPODE™ II ;
- Aide à la mise en place d'un système de suivi qualité.

### PENDANT LES TRAVAUX

Grâce à une équipe de spécialistes dédiés à cette technique, CLI assure :

- Des visites de chantier dédiées à la formation et au conseil à l'Entreprise sur les travaux relatifs aux blocs ACCROPODE™ II
- La fourniture des plans de principe pour la pose des blocs
- Entre les visites de chantier, le conseil à l'Entreprise pour la mise en œuvre correcte de la technique ACCROPODE™. Ce conseil peut se faire par email, téléphone ou visio-conférence. CLI dispose d'une salle de Visio conférence à la formation à distance incluant des modèles réduits.
- Remise du manuel d'auscultation et de maintenance de la carapace ACCROPODE™ II.

### ATTESTATION DE CONFORMITE

Sur demande en tout début de chantier et après analyse de faisabilité, CLI peut mettre en place une procédure d'« Attestation de Conformité » permettant d'attester que la carapace ACCROPODE™ II construite est conforme aux spécifications et aux règles de l'art.

*A gauche - Figure 41 : Assistance technique sur chantier par un représentant CLI*

## Inspection et maintenance des ouvrages

Tous les ouvrages maritimes nécessitent d'être régulièrement inspectés et entretenus dès la fin de la période de construction. Les digues à talus ne font pas exception. Par ailleurs, les carapaces de digues « sont des ouvrages souples, 'vivants' qui dès leur conception, sont prévus pour subir des déformations et des désordres tout au long de leur vie » ( [1] Fascicule 4). Les carapaces en blocs monocouche ne nécessitent pas en général de rechargement régulier pour palier le mouvement gravitaire et progressif des blocs vers le bas. Ceci minimise donc l'apport de matériaux et les opérations lourdes de maintenance lorsque les auscultations sont programmées de manière régulière. Toutefois, et compte tenu de ce qui est mentionné au-dessus, il est essentiel de prévoir un plan d'auscultation et de maintenance de l'ouvrage sur des bases régulières ainsi que consécutivement à des événements particuliers. L'intérêt majeur de ces inspections est de détecter toute évolution de la carapace qui serait susceptible de s'aggraver. En effet, les carapaces en blocs artificiels résistent mieux aux houles que les carapaces en enrochements naturels ; cependant, le processus de dégradation est plus rapide dès lors que les premiers dégâts sont apparus. Il convient donc de surveiller ou d'intervenir sur les dégâts à un stade relativement précoce avant qu'ils ne se transforment rapidement en désordres imposant des travaux de réparation conséquents.

CLI assiste les maitres d'ouvrages en fournissant la documentation appropriée et proposant des services complets d'inspections / diagnostics des carapaces réalisés par ses experts. Ces inspections sont principalement basées sur la réalisation de jumeaux numérique 3D de précision centimétrique permettant de détecter tous les mouvements quelque soient les conditions de visibilité sous-marine. Pas d'intervention de plongeurs dans la plupart des cas.



Figure 42 : projet aux Emirats Arabes Unis – « Upper Zakum »

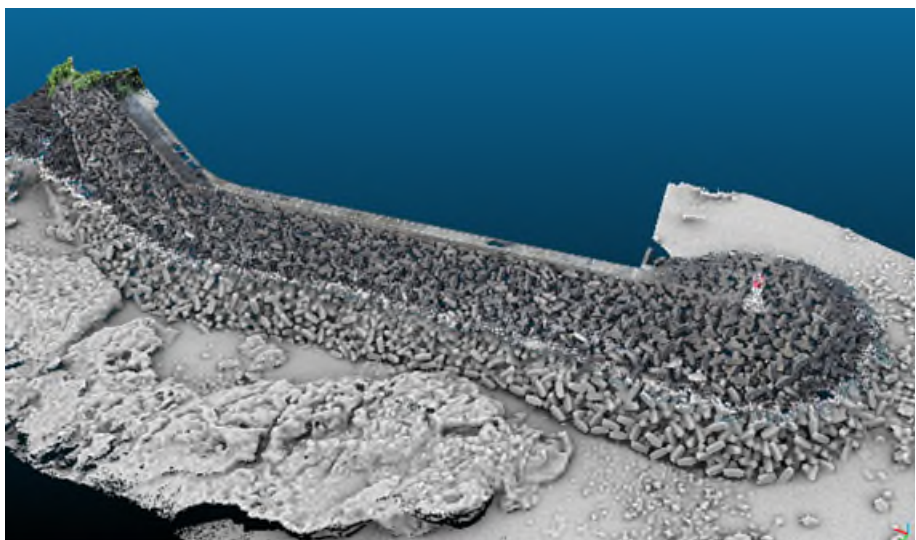


Figure 43 : Nuage de points 3D d'une carapace en blocs ACCROPODE™

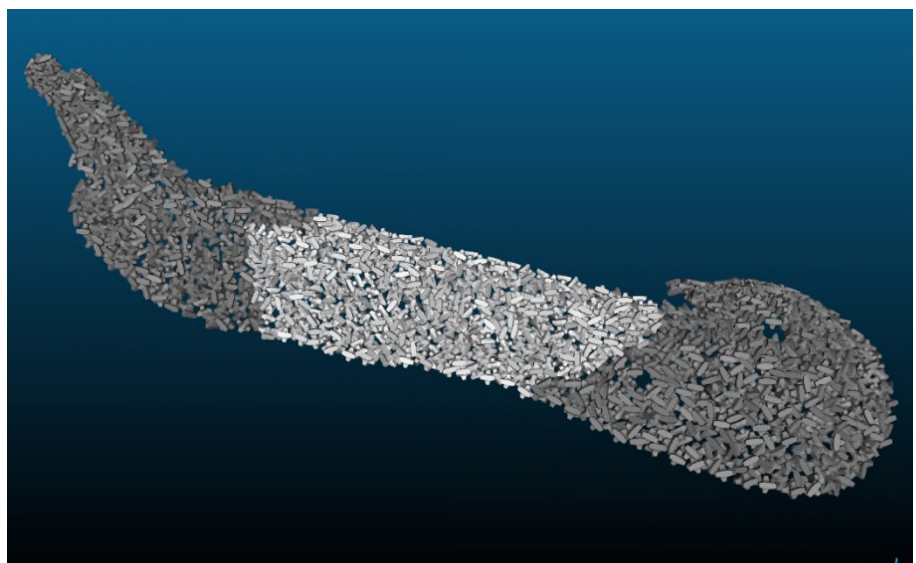


Figure 44 : Modélisation 3D virtuelle des blocs de carapace



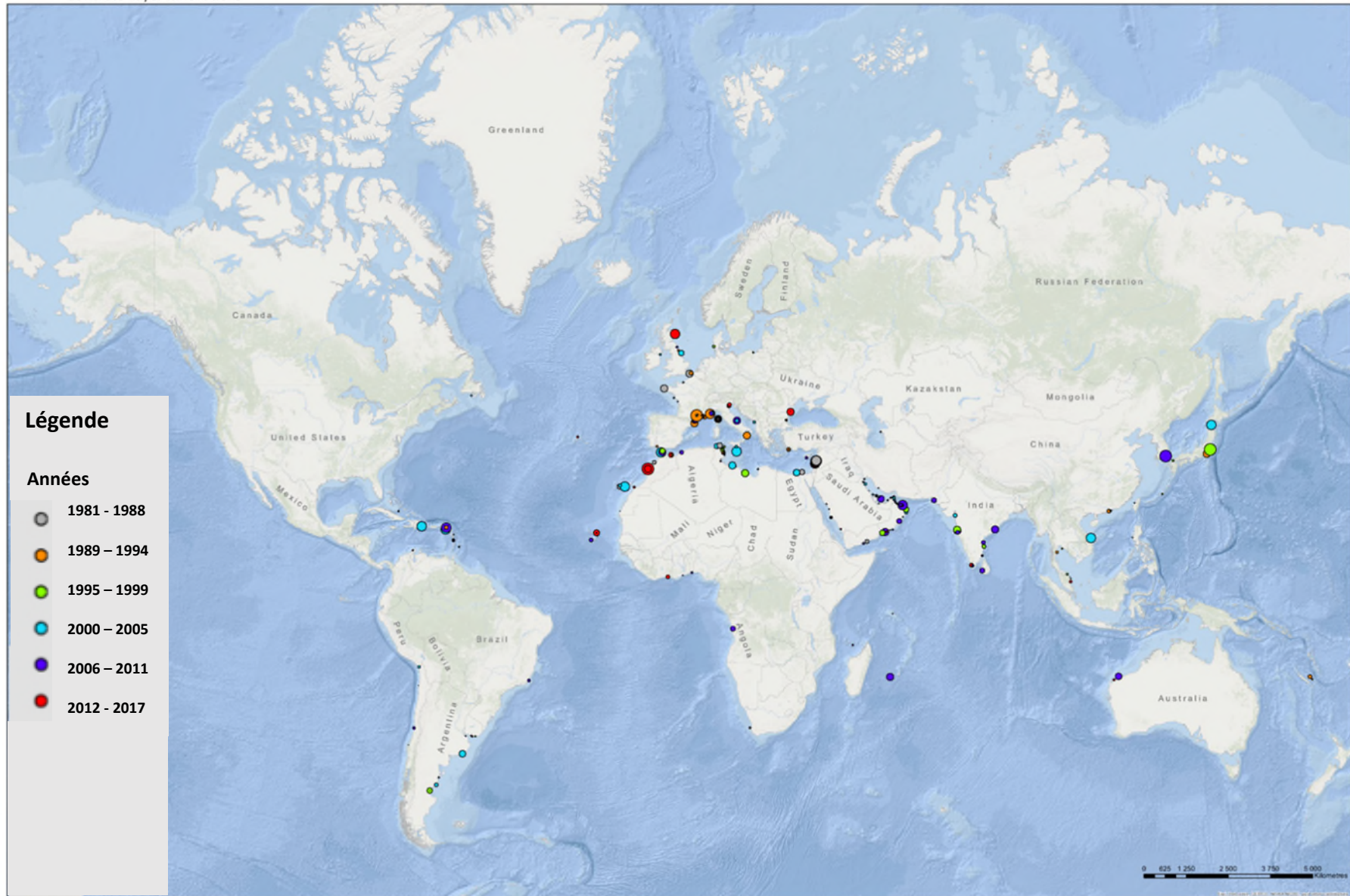


Figure 45 : carte avec positions des projets réalisés par CLI



## Calculateur CLI



### Etape 1/5 Paramètres de calcul

Type de profil ? Section droite	Type de bloc ? ACCROPODE™ II	Pente de la carapace ? 4/3
Masse volumique du béton (kg/m³) ? 2300	Masse volumique de l'eau (kg/m³) ? 1025	
Hauteur de houle significative (m) ? 3,13	Houle déferlante ? Oui	Pente du fond marin (%) ? 1
Niveau inférieur de la carapace (m) ? -5	Niveau supérieur de la carapace (m) ? 4,75	



### Etape 2/5 Estimation de la taille des blocs

Coefficient de stabilité estimé (KD) 16	Volume théorique (m³) 0,75	Volume sélectionné (m³) Indiquer votre choix 1
--	-------------------------------	---



### Etape 3/5 Sous couche

#### Volume du bloc choisi

Volume sélectionné (m³) 1	Masse du bloc (t) 2,3	Epaisseur de la carapace (m) 1,36
------------------------------	--------------------------	--------------------------------------

Hauteur du bloc (m) 1,51
-----------------------------

#### Choix de la sous couche (NLL et NUL)

Enrochement standard NLL (t) 0,16	Mini possible NLL-30% (t) 0,11	Maxi possible NLL+30% (t) 0,21	Enrochement NLL choisi (t) 0,2
Enrochement standard NUL (t) 0,32	Mini possible NUL-30% (t) 0,23	Maxi possible NUL+30% (t) 0,42	Enrochement NUL choisi (t) 0,5

Nb: Il est conseillé de respecter le rapport suivant  $2 < \text{NUL/NLL} < 3$



### Etape 4/5 Résultats

Volume théorique	0,75 m³
Volume sélectionné	1 m³
Masse du bloc	2,3 t
Hauteur du bloc	1,51 m
Epaisseur de la carapace	1,36 m
Hauteur de la carapace	9,75 m
Coefficient de densité Phi Ø	0,635
Nombre de blocs pour 100 m²	63,5
Quantité de béton	63,5 m³/100m²
Nombre de rangées dans le talus	16,77
Sous couche choisie (NLL - NUL)	0,2 - 0,5 t
Coefficient d'épaisseur de sous-couche Kt	1,15
Epaisseur de la sous-couche	1,17 m

Les informations générées à l'aide de cet outil informatique n'ont qu'une valeur indicative et ne doivent être utilisées qu'au titre d'une première approche. Les simulations peuvent aider à clarifier certains des principaux paramètres, mais ne peuvent pas être utilisées directement pour établir la base réelle de la conception de la carapace. Le concepteur reste entièrement responsable de l'analyse complète et de la définition de la conception de la carapace. CLI fournira de l'aide et des conseils à toutes les étapes, au besoin, sur les questions qui peuvent influencer la conception finale.

### Points d'attention et recommandations

NUL (0,5 t) supérieur au maximum recommandé pour cette taille (0,42 t)



### Etape 5/5 Contact pour plus d'informations

Nous pouvons vous guider pour trouver les solutions les plus adaptées à votre chantier. Contactez nous!

Société	Nom du projet	Pays du projet
Description du projet		
Prénom	Nom	E-mail

Remplissez ce formulaire et cliquez sur l'enveloppe pour être contacté. Nous respectons la confidentialité et ne partagerons vos informations avec aucune autre société.



# 20. Calculateur

Un outil d'estimation de la taille des blocs est disponible sur le site internet de CLI :

[www.concretelayer.com/fr/calculateur](http://www.concretelayer.com/fr/calculateur)

Il intègre la variation du  $K_D$  des blocs ACCROPODE II™ en fonction de la pente du fond et du caractère déferlent ou non de la houle sur la section courante et le musoir.

Cet outil est un outil de pré-dimensionnement.

A droite - Figure 46 : Calculateur de CLI disponible sur le site internet

## 21. Conditions d'utilisation



### Propriété intellectuelle et droits d'utilisation

Les marques ACCROPODE™ ECOPODE™ et ACCROBERM™ sont déposées et protégées au niveau international par ARTELIA.

La marque CORE-LOC™ est une marque déposée et protégée au niveau international par l'USCOE. L'utilisation de l'une ou l'autres des technologies mentionnées ci-dessus nécessite préalablement la signature d'un Contrat de sous licence avec CLI.

### Avertissements relatifs au présent document

Ce document s'adresse à un public averti ayant des bases solides en matière de dimensionnement de digues à talus et d'ouvrages hydrauliques maritimes.

Le dimensionnement de carapaces est un exercice complexe. Ce document ne prétend en aucun cas faire l'exhaustivité des données ou informations nécessaires à la conception d'une carapace. L'utilisateur doit se référer aux règles de l'art et normes pour réaliser la conception de son ouvrage. Le présent document a pour objectif de fournir des informations générales et les conditions initiales de pré dimensionnement des digues utilisant les blocs de carapace en monocouche ACCROPODE™ II. Le présent document n'est pas un manuel de conception et il ne prend pas en compte pas tous les aspects qui concernent le design d'une digue, mais les principaux éléments relatifs ou influant sur la carapace. La conception de l'ouvrage dans sa globalité reste la responsabilité du concepteur de l'ouvrage. Il est impératif de confirmer la conception de l'ouvrage à l'aide de modèles physiques 2D et 3D. CLI ou ARTELIA, ne pourra en aucun cas être tenu pour responsable des dommages directs ou indirects résultants de l'utilisation du contenu de ce document. En parallèle à ce document, des ressources en ligne complémentaires sont à disposition sur le site web [www.concretelayer.com](http://www.concretelayer.com).

*A droite - Figure 47 : Levage d'un bloc ACCROPODE™ II sur le projet de construction d'une marina au Koweït*

## Références

[1] CIRIA-CUR-CETMEF Guide Enrochement  
L'utilisation des enrochements dans les  
ouvrages hydrauliques – 2009

[2] Norme EN 13383 Enrochements

[3] Hydralab III Guidelines for physical model  
testing of breakwaters. Rubble mound  
breakwaters NA3.1-2 August 2007

## Contacts

CLI

4, rue Germaine Veyret - Verner  
38 130 ECHIROLLES – France

Tel: +33(0) 476 044 774

Fax: +33(0) 476 044 775

Web Site: [www.concretelayer.com](http://www.concretelayer.com)

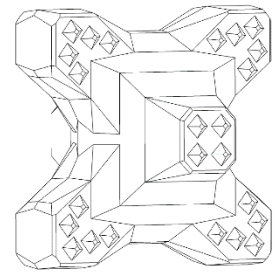
Email: [cli@concretelayer.com](mailto:cli@concretelayer.com)



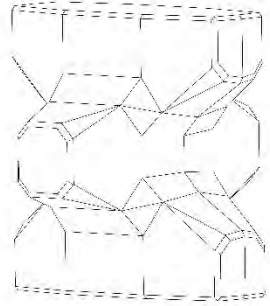




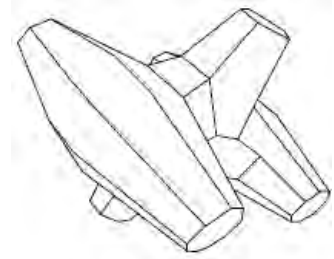
ACCROPODE™ II



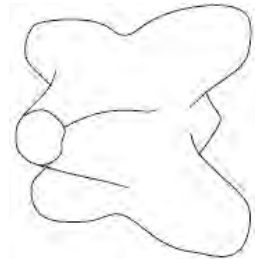
ACCROPODE™ I



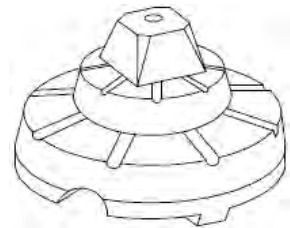
CORE-LOC™



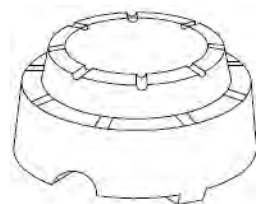
ECOPODE™



ACCROBERM™ I



ACCROBERM™ II





**CLI**  
Concrete Layer Innovations