

# BLOC DE CARAPACE (DOUBLECUBE) DE TYPE MASSIF ET DE RUGOSITÉ VARIABLE: DU MODÈLE PHYSIQUE AU DÉMONSTRATEUR DE LA DIGUE DE L'EST À CHERBOURG, PROJET CHERLOC

Dominique MOUAZE<sup>4</sup>, Yolane ABID<sup>4</sup>, Guilhem CORNEDE<sup>4</sup>,  
Pierre LETERRIER<sup>3</sup>, Laurent QUENTRIC<sup>3</sup>, Osanne PAIREAU<sup>1</sup>, Gabriel CHAMBON<sup>2</sup>,  
Iman SAFARI<sup>2</sup>, Guillaume CARPENTIER<sup>2</sup>

1. ARTELIA, 16 Rue Simone Veil, 93400 SAINT-OUEN-SUR-SEINE, France
2. ESITC, 1 Rue Pierre et Marie Curie, 14610 EPRON, France
3. MARC SA, 114 rue des Fougères, 50110 TOURLAVILLE, France
4. Normandie Univ, UNICAEN, UNIROUEN, M2C, 14000 CAEN, France  
[dominique.mouaze@unicaen.fr](mailto:dominique.mouaze@unicaen.fr)

## 1. RÉSUMÉ

Les paysages côtiers mondiaux sont en constante transformation par la construction d'infrastructures (digues, jetées) afin de répondre à des demandes croissantes d'activités économiques, résidentielles, .... L'environnement naturel côtier est morcelé par les constructions humaines empiétant sur les habitats écologiques des zones intertidales. Ce caractère est particulièrement marqué sur les côtes de la Manche pour lesquelles le marnage est élevé. L'objectif principal du projet CHERLOC est de créer et d'étudier deux sites pilotes en région Normandie en intégrant deux types de blocs artificiels à des digues existantes (Cherbourg, Ouistreham) à travers des approches d'acceptabilité sociale, de biodiversité et d'ingénierie côtière. Un bloc de carapace (Double-Cube, DC) a été développé au sein du laboratoire M2C. Ce bloc possède de nombreux atouts (performance, facilité de pose, multi-usages) cependant il n'a pas encore atteint le stade de démonstrateur industriel. Ce bloc a été testé dans deux canaux à houle de dimensions différentes (22m et 40m) afin de proposer un dimensionnement, de vérifier la stabilité de la carapace ainsi que les interactions avec l'ACCROBERM™ II (ABII) utilisé ici en position avancée de la butée de pied (cf résumé proposé sur l'ABII). Les phénomènes de claques sur l'ouvrage vertical existant (digue de l'Est) ont été limités par la rehausse de la partie supérieure des DC à la cote d'arase du parapet. Les effets d'échelle ainsi que l'importance de la granulométrie des sous-couches ont pu être évalués. L'effet 'clé de voûte', issu principalement de la base hexagonale du bloc, a été quantifié à l'aide de tests de traction ('pull out tests') en modèle réduit. Le plan de pose rangé du DC peut s'apparenter à un bloc de revêtement dont la stratégie de stabilité est la masse (position basse du centre des masses) et la qualité de contacts surfaciques qui exacerbent la friction inter-blocs. En suivant la stratégie de certains blocs de revêtement, la partie supérieure, rugueuse, du bloc a été modifiée à des hauteurs variables afin de créer des 'motifs' lors du plan de pose. La quantification du run-up en fonction des différents motifs à montrer que i) le motif 'classique' (rugosité uniformément distribuée) retient en partie le fluide lors de la phase de run-down (moins que le cube simple malgré tout) ce qui engendre un run-up important sur la vague suivante ii) des motifs 2D de grande longueur d'onde (2 à 3 diamètres de blocs) étaient déjà suffisants pour limiter le run-up iii) que des motifs complexes 3D limitaient de manière disparate le run-up. Pour ce dernier point, l'observation des écoulements au niveau de quelques blocs a mis en évidence l'influence des effets de sillage turbulent ainsi que de réflexions locales sur les performances de la carapace. Les travaux maritimes sur les sites de Ouistreham et de Cherbourg ont confirmé la facilité de pose du DC et surtout la qualité des contacts surfaciques garant d'une stabilité élevée. La carapace exposée sur le site de Cherbourg a résisté à une première tempête début Décembre 2021 et des suivis photogrammétriques pourront quantifier les mouvements éventuels.

Mots clefs : digue, bloc de carapace, run-up, rugosité, démonstrateur

## 2. LES DEUX SITES ÉTUDIÉS EN MANCHE : DIGUE DE L'EST (CHERBOURG), EPI DU CHENAL DE OUISTREHAM

### Cas de la digue de l'Est de Cherbourg

La grande rade artificielle de Cherbourg (1500ha) est protégée à l'est par la digue de l'Est. Cette dernière est caractérisée comme mixte (ouvrage maçonné vertical monté sur un soubassement en talus) et arasée à la cote +6.5CM, ce qui la rend submersible à marée haute. L'implantation du projet, sur deux linéaires de 30m de part et d'autre de l'ouvrage vertical, est situé à 420m du fort de l'île Pelée (Photo 1). Le niveau de surcote associé à une houle centennale est de +7.5mCM. Les directions des vents dominants sont de secteur Sud-Ouest et Nord-Est. Les houles centennales de Nord-Est sont normales à la digue de l'Est et peuvent atteindre un  $H_s$  de 5m pour une période de 10s. Les houles centennales d'Ouest peuvent atteindre les mêmes niveaux de houle significative cependant l'obliquité sera élevée ( $\sim 30^\circ$ ) ainsi que la période pic ( $\sim 12s$ ). Le pré-dimensionnement des DOUBLE-CUBE (5t) et des ACCROBERM<sup>TM</sup>II (2t) a été réalisé à l'aide de la formulation de Hudson dans un premier temps et en prenant en compte l'obliquité. La pente de la carapace a été fixée à 4/3 (Figure 1). Les dommages (déplacements des blocs) sur la carapace seront évalués à l'aide du croisement de différentes techniques d'observations (LIDAR, SfM, InSAR).



Photo 1 : Vue des enrochements naturels existants de la digue de l'Est

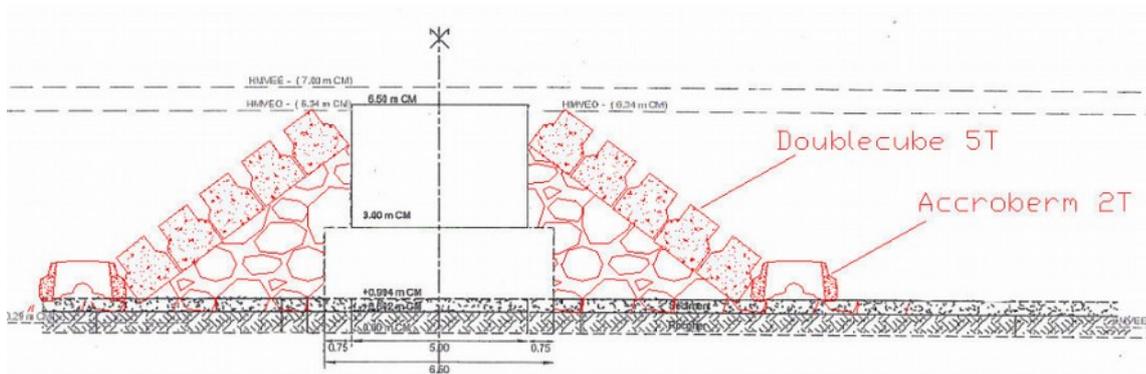


Figure 1 : Coupe des carapaces et butées de pied de part et d'autre de la digue de l'Est

## Cas de l'épi du chenal d'accès au port de Ouistreham

Le deuxième site d'implantation est situé à l'ouest de l'épi qui borde le chenal d'accès du port de Ouistreham et à l'extrémité de la plage Riva-Bella. La zone de travaux est implantée sur le domaine public maritime de Ports de Normandie. Les vents de secteur Ouest à Sud-Ouest sont dominants. Les houles centennales peuvent atteindre une hauteur significative de 5.8m pour une période pic de 9 secondes. La réfraction bathymétrique ainsi que la diffraction autour de l'épi impliquent une direction normale des vagues vis à vis du tapis d'enrochements artificiels (Photo 2). La dérive littorale induit un transport sédimentaire d'Ouest en Est qui provoque une zone d'accrétion en amont (Ouest) de l'épi (encart Photo 2).



Photo 2 : Vue aérienne des zones d'accès, de dépôts et de travaux près de l'épi (encart)

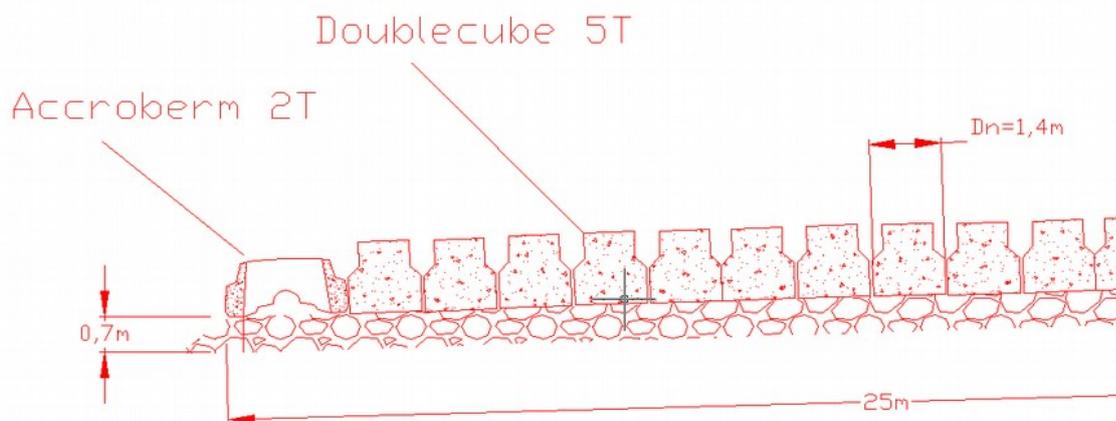


Figure 2 : Coupe du tapis d'enrochements artificiels positionnés en haut estran près de l'épi du chenal d'accès au port de Ouistreham

La présence du tapis d'encrochements artificiels (Figure 2) va modifier très localement (emprise de 25m x 25m) la propagation des vagues et des courants :

- diffraction par contournement de la zone,
- réflexion locale en périphérie de la zone,
- génération du déferlement par rupture bathymétrique,
- dissipation d'énergie par frottement sur les éléments rugueux et par aération.

Ces modifications sont voulues et ont pour rôle de modifier les dépôts sédimentaires afin de retarder l'accrétion en périodes de faible énergie des vagues et des courants et d'éroder les dépôts en périodes de forte énergie afin de limiter les zones de concentration par 'étalement' sur l'ensemble de l'estran. Les conséquences à moyen terme sont de retarder les franchissements sédimentaires de l'épi longeant le chenal d'accès et de favoriser une répartition homogène des sédiments. Cette répartition homogène doit modifier le profil de plage afin d'initier plus rapidement un déferlement glissant et de dissiper l'énergie des vagues de manière progressive. La complexité des processus hydro-sédimentaires empêchent de prédire avec certitudes les phénomènes décrits plus haut cependant cette étude à échelle 1 permettra d'apporter des connaissances réelles afin d'améliorer les modèles numériques par exemple. Cette étude reste expérimentale (démonstrateur), d'une durée limitée (deux ans) et réversible.

La présence du tapis d'encrochement va modifier principalement la fraction grossière des sédiments en transit le long du littoral. La partie fine va continuer à dériver en suspension. La zone du projet étant située en amont des éventuelles sources de pollution (station d'épuration, dragage, zones de dépôts,...), elle n'aura pas d'incidences sur la modification de la qualité des eaux littorales.

### 3. STABILITÉ DU BLOC DE CARAPACE DOUBLE-CUBE

Les enseignements issus des travaux sur le STARBLOC (SAFARI (2011), SAFARI *et al.* (2013), SAFARI *et al.* (2018)) ont permis de concevoir (ROPERT F., CEREMA) et de tester en canal et bassin un nouveau type de bloc artificiel, le DOUBLE-CUBE. En effet, les travaux novateurs sur la variabilité de la perméabilité au sein de la carapace ont montré qu'un plan de pose fortement imbriqué (type bloc massif STARBLOC) conduit à une chute de perméabilité induisant une rupture des écoulements à travers la carapace. Ce phénomène hydraulique implique une augmentation du franchissement lors du run-up et surtout des sous-pressions lors de la vidange de la nappe de la digue poreuse lors du run-down. Ces sous-pressions conduisent à des soulèvements et extractions en masse des blocs de carapaces. Il est donc indispensable d'assurer un minimum de perméabilité quel que soit le plan de pose utilisé pour un bloc artificiel. C'est le cas du DOUBLE-CUBE qui offre un nombre de plan de pose limité tout en garantissant la stabilité.

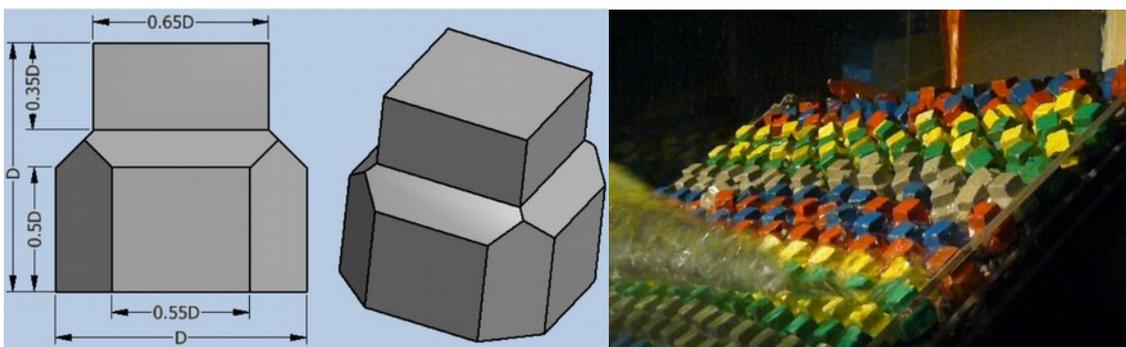


Figure 3: Géométries du DOUBLE-CUBE et vue des tests en canal à houle

Ce bloc présente une base cubique chanfreinée ainsi qu'une partie supérieure de section cubique d'arête 65 % plus petite que la base. Cette rugosité superficielle induite va limiter les

franchissements par dissipation turbulente et aération (cisaillement important des vitesses). Le placement 'face contre face' optimise le frottement surfacique et conduit à une stabilité optimale malgré une imbrication absente (recouvrement nul). Le nombre de stabilité  $N_s$  atteint 2.9 alors que le coefficient de stabilité  $K_D$ , selon Hudson, monte jusqu'à 18 (en canal à houle).

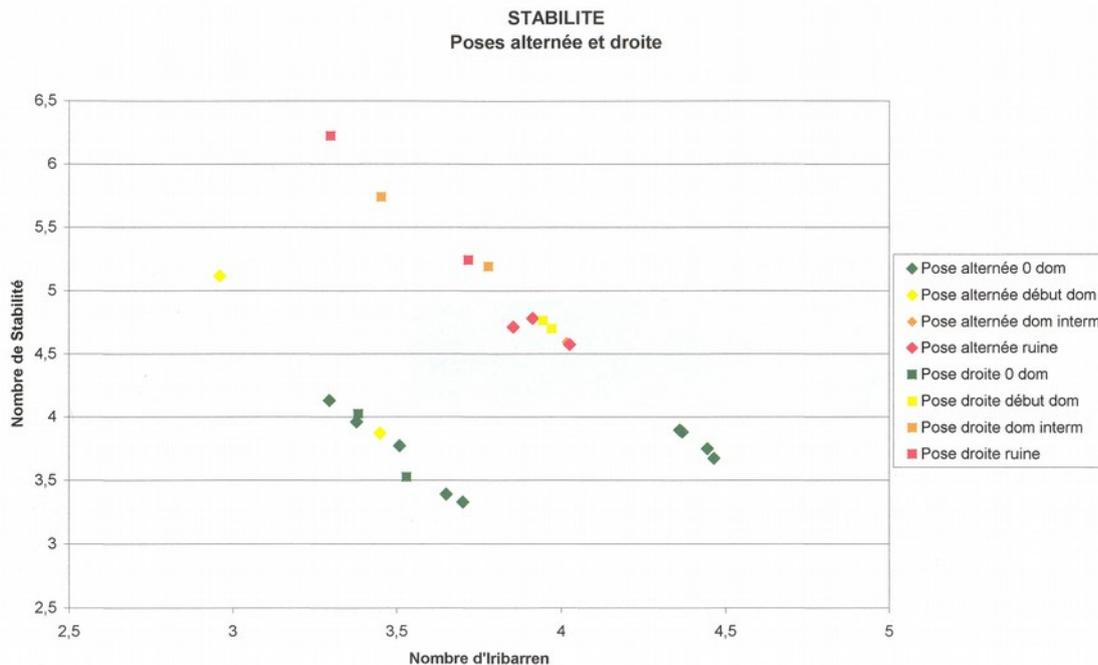


Figure 4 : Tests de stabilité du DOUBLE-CUBE fonctions du plan de pose et du paramètre d'Iribarren

La forme pseudo-hexagonale de la base conduit également à un phénomène de clé de voûte ce qui permet de conserver la stabilité des blocs adjacents à un bloc extrait de la carapace. Il n'y a pas d'effet de 'détricotage' comme observé sur des blocs artificiels imbriqués.

#### 4. INFLUENCE DE L'ARRANGEMENT DE RUGOSITÉS ARTIFICIELLES (CUBES) SUR LE RUN-UP

Comme présenté au paragraphe précédent, un intérêt d'exploration de l'optimisation du DC est la modification de la hauteur de la partie supérieure afin de créer des motifs visant à modifier les processus fluides sur la carapace (déferlement, aération, projections, interactions fluide/fluide,...). Ces derniers participent à la dissipation d'énergie et conduisent à une limitation du run-up. La répartition non-uniforme de blocs de différentes élévations s'apparente à une pente en revêtement. Capel (2015) montre qu'un dispositif en 'chessboard' en partie supérieure de la pente est optimal pour limiter le run-up (Photo 3), en particulier en présence d'un déferlement plongeant (Chen, 2020). Photo 3 : Disposition en 'rib-pattern' (à gauche) ou en 'chessboard' (à droite), d'après Capel (2015) Une série de motifs de carapace ont été testés en modèle physique, en canal à houle (longueur 22m, largeur 0.8m, hauteur d'eau 0.5m), en simulant la rugosité avec des blocs cubiques de 40mm d'arêtes (même base que des DC en béton). Le run-up, sous l'action houles spectrale (JONSWAP), est mesuré à l'aide de bandes cuivrées disposées sur la pente imperméable et sous les blocs (Figure 5).

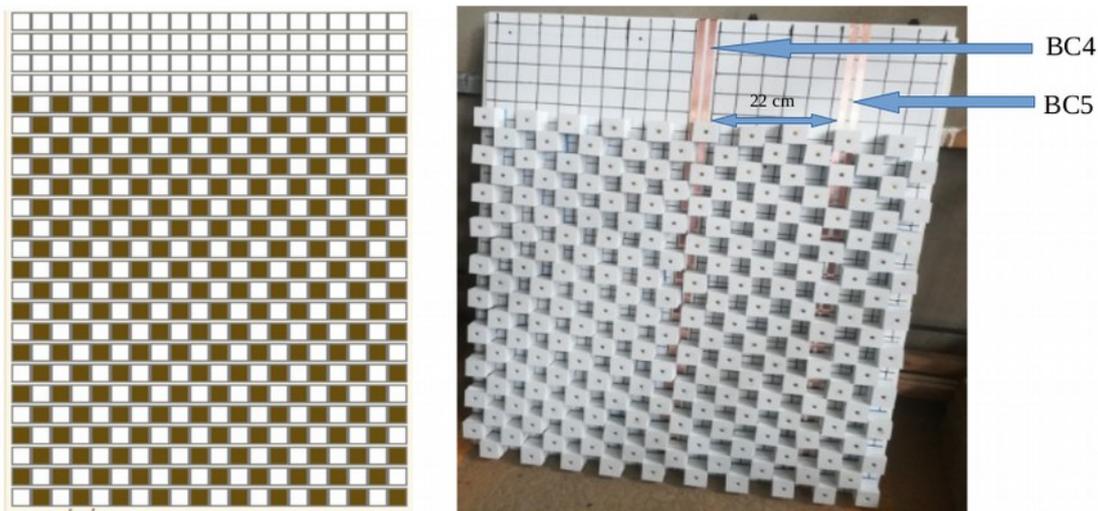


Figure 5 : Motif ('motif 1') théorique en 'chessboard' (à gauche) et dispositif en canal avec des cubes de 40mm d'arêtes et deux bandes cuivrées (BC) (à droite).

Afin de démarquer les performances hydrauliques des différentes dispositions relativement au motif classique en 'chessboard', trois arrangements (Figure 6) ont été imaginés afin de

- créer des couloirs à 45° en augmentant la tortuosité et favorisant les interactions fluide/fluide,
- favoriser les écoulements au run-down,
- limiter des groupes de blocs horizontaux afin de limiter la perte de charge au run-down,
- limiter les surfaces lisses formées par des groupes de blocs,
- favoriser l'aération en pied et haut de pente.
- conserver la même densité de blocs (200) quel que soit le motif.

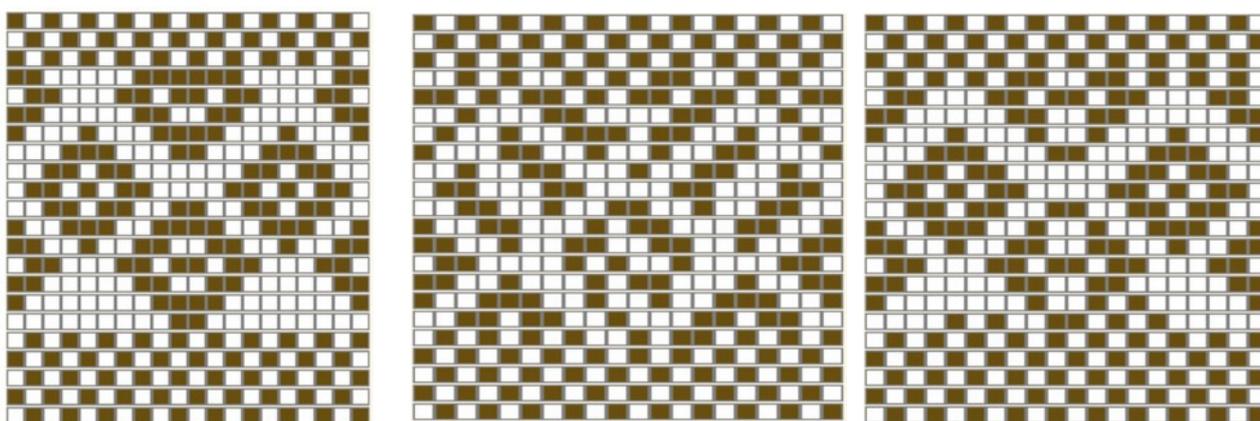


Figure 6 : Ensemble des motifs supplémentaires ('motifs 2, 3 et 4') testés en plus du 'chessboard'

Le motif classique ('motif 1'), dont la répartition de rugosité est homogène, présente le run-down le plus faible (Figure 7) avec un écart important vis à vis des autres arrangements en particulier pour les grandes longueurs d'onde. La répartition uniforme des cubes augmente la perte de charge de manière homogène et limite ainsi la descente de la vague en particulier en créant une rétention du fluide dans les interstices. Lorsque la vague suivante commence à courir sur la pente, elle rencontre une surface avec des cubes mais dont les interstices inter-cubes, remplis d'eau, limite fortement la rugosité (différences de d'élévations) et favorise le run-up. Ceci explique que le motif 'classique' présente les plus mauvaises performances hydrauliques en terme de run-up et franchissement.

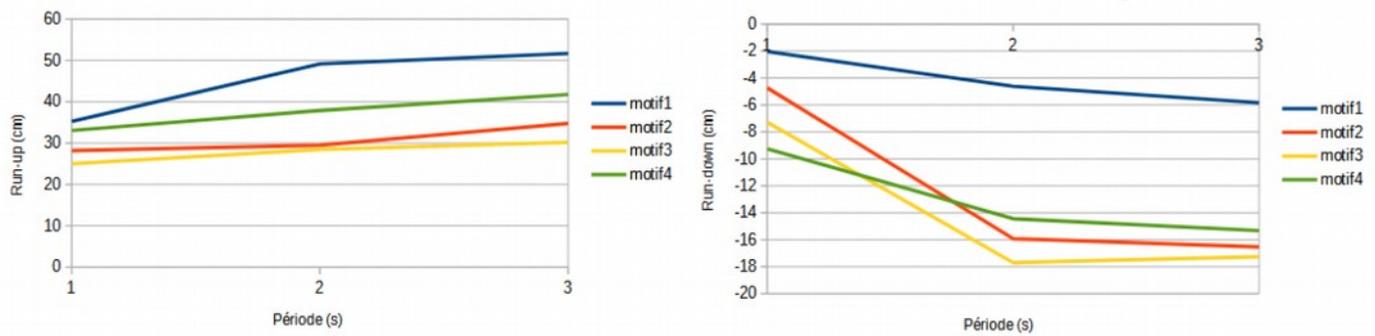


Figure 7 : Mesures du Run-up (à gauche) et du Run-down (à droite) pour les quatre motifs en houle spectrale (périodes pics 1.11s / 2.00s / 3.03s)

De plus, les coefficients de réflexion extraits pour des cas de houle régulière ou irrégulière, indiquent que la dissipation d'énergie est plus importante pour les motifs 2 à 4 qui s'éloignent de l'arrangement classique (Figure 8)

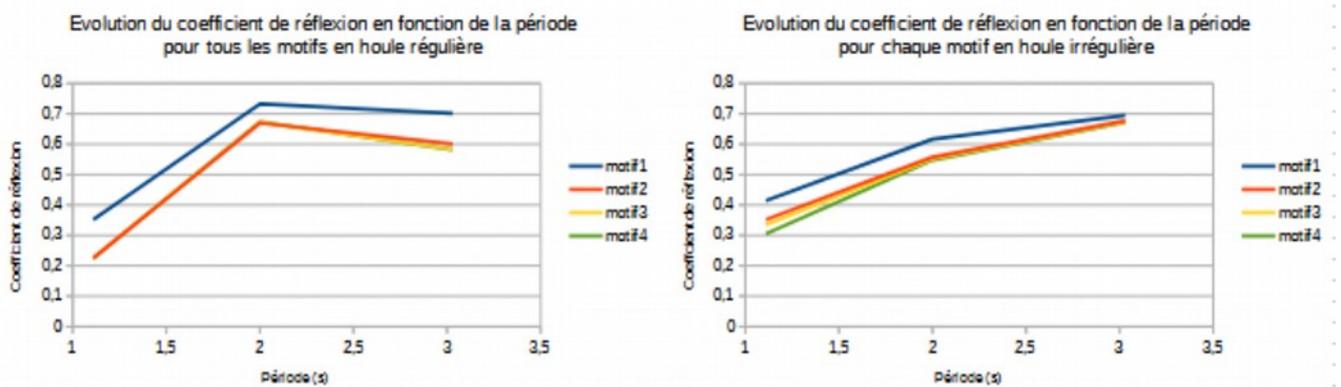


Figure 8 : Coefficient de réflexion des différents motifs dans le cas d'une houle régulière (à gauche) et d'une houle irrégulière (à droite)

## 5. INFLUENCE DE L'ARRANGEMENT DE BLOCS DC DE HAUTEURS DIFFÉRENTES SUR LE RUN-UP

La section suivante présente des résultats de run-up pour différents motifs de blocs miniatures en béton de trois hauteurs différentes (Figure 9) afin de simuler des variations de rugosité sur la pente du talus. La stratégie est d'utiliser les résultats de la section précédente (cubes en PVC) afin de proposer des motifs 2D de différentes longueurs d'onde (Figure 11) ou des arrangements tri-dimensionnel en 'losange' (Figure 12). L'ensemble des résultats sera comparé au motif de référence (Figure 9) composé uniquement de DC de hauteur nominale. On entend par 'motif à longueur d'onde', des arrangements pour lesquels la distance entre deux lignes de DC de hauteur nominale (blocs noirs) est supérieure à un diamètre de bloc. Tous les motifs ont le même nombre de blocs, cependant les plans de pose avec des blocs 'blancs' ou 'gris' consomment moins de béton.

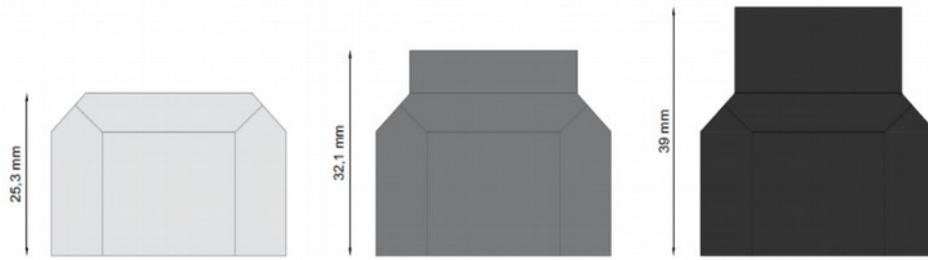


Figure 9 : Détail des trois hauteurs de rugosité testées du Double-Cube (hauteur nominale 39mm)

Le motif de référence est uniquement composé de DC de hauteur nominale et les blocs sont tous orientés à 45° par rapport à la direction longitudinale de la digue.

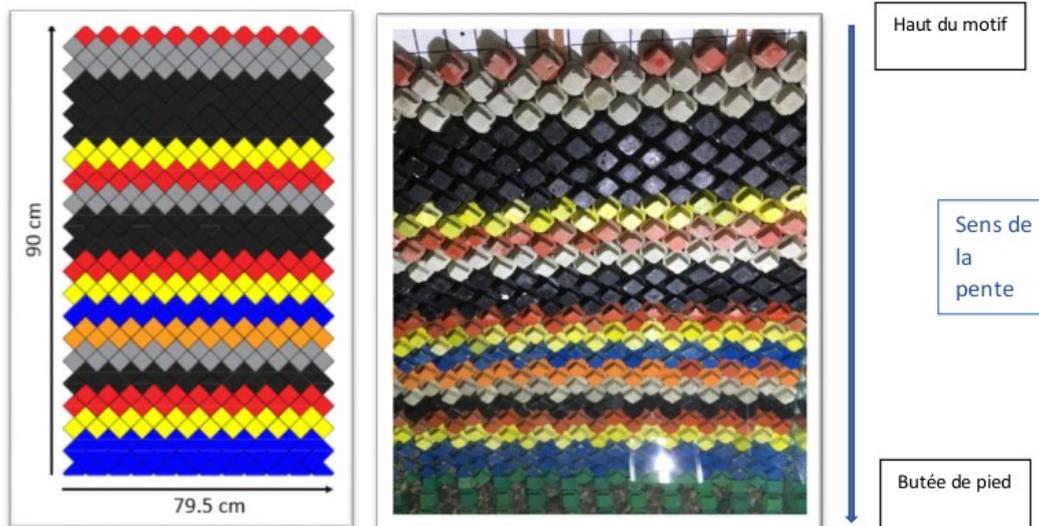


Figure 10 : Motif de référence ('ref') composé uniquement de DC de hauteur nominale (plan de pose classique à '45°')

Les motifs à 'longueur d'onde' présentent des distances variables (2 à 3 Dn) entre deux lignes de DC hauts. Le Rib3 inversé propose une marche 'noir-blanc' dans le sens de propagation du front de vague vers la crête de la digue (contrairement au Rib3).

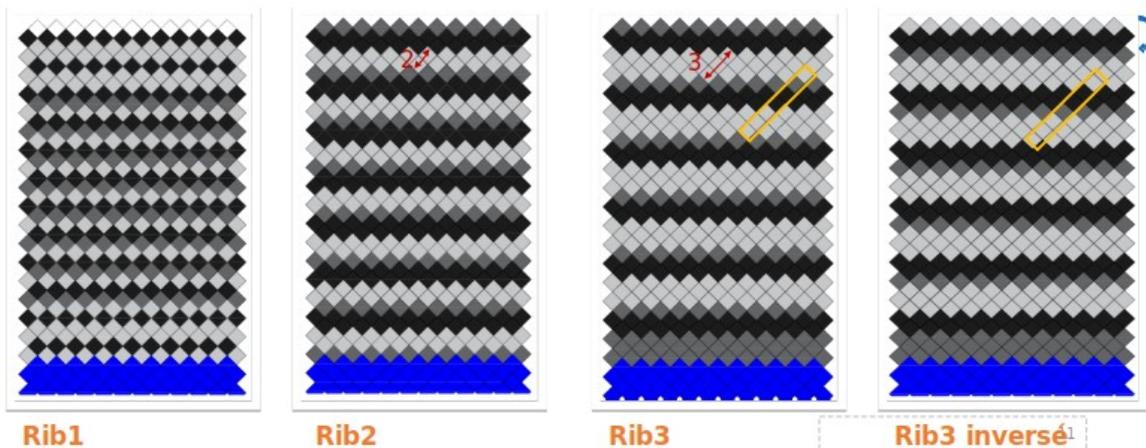


Figure 11 : Les quatre motifs testés de plus grande longueur d'onde (les trois couleurs 'noir, gris, blanc', correspondent aux trois différentes hauteurs de blocs présentées à la figure 9)

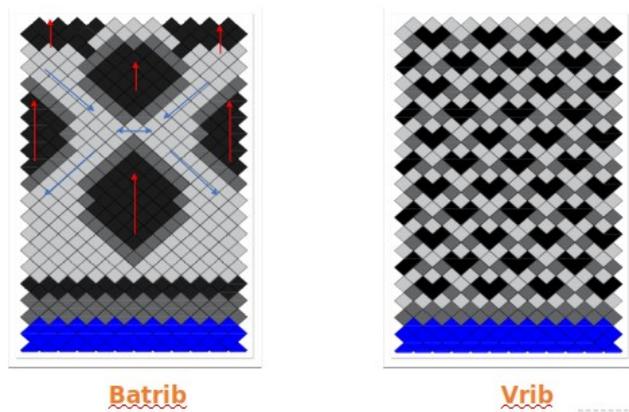


Figure 12 : Les deux motifs en losange testés (les trois couleurs ‘noir, gris, blanc’, correspondent aux trois différentes hauteurs de blocs présentées à la figure 9)

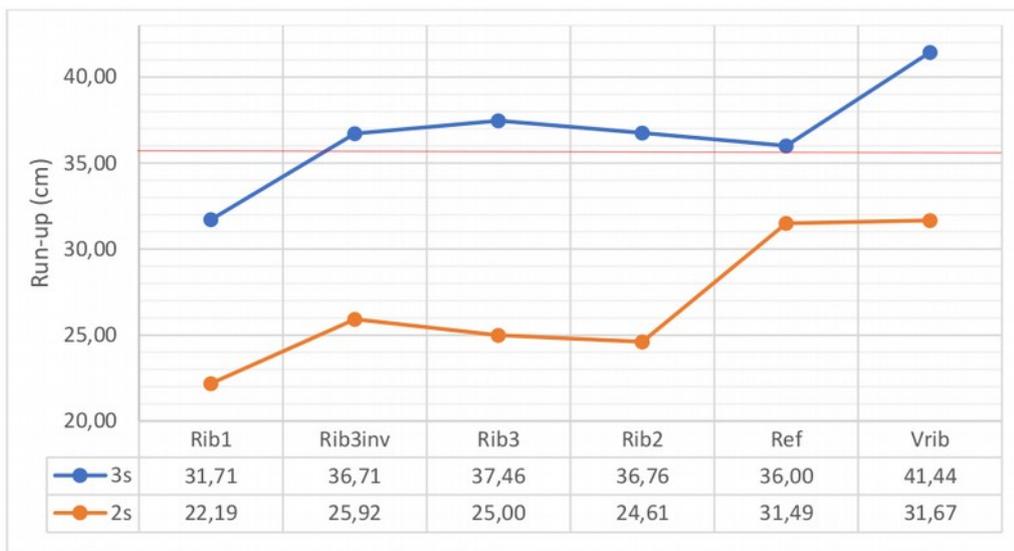


Figure 13 : Mesures de run-up en houle irrégulière (périodes pics 2s et 3s) pour 6 des motifs testés (la ligne rouge présente la limite du franchissement)

La figure 13 montre l’influence des motifs à grande longueur d’onde sur le run-up comparativement au motif de référence. Ces arrangements sont efficaces en particulier pour la période la plus courte. La variation de rugosité pour les plus grandes longueurs d’onde des vagues est lissée et l’effet est moins visible. Les faibles coefficients de réflexion des motifs à longueur d’onde montrent l’efficacité à davantage dissiper l’énergie des vagues comparativement au motif de référence. Le processus physique observé ici est davantage un effet de sillage à l’aval des blocs les plus hauts que des effets de projection d’eau. Malgré ces résultats encourageants, on peut se poser la question de la pertinence ou de la faisabilité de poser des blocs de hauteurs différentes sur un chantier maritime. Des tests de stabilité, avec ces différents plans de pose, sont en cours.

## CONCLUSION

Le DoubleCube est un bloc de carapace dont la géométrie permet un fort potentiel d’optimisation sur le bloc lui-même mais aussi pour de futurs blocs dont les plans de pose à ‘grande longueur d’onde’ pourrait permettre de limiter le franchissement. L’influence du plan de pose sur la stabilité d’une carapace de digue à talus est bien connue, moins celle sur le franchissement ou la réflexion des vagues, l’ensemble des phénomènes étant imbriqué. Les plans de pose complexe sont coûteux en temps cependant la ‘base’ hexagonale du DC permet une pose rapide comme constaté sur les

chantiers de Cherbourg (Figure 14) et Ouistreham (Figure 15) cependant des blocs de hauteurs différentes poseront des problèmes supplémentaires (moulage, logistique, préhension,...).



Figure 14 : Photogrammétrie sur le site de Cherbourg (à gauche) et situation sur la photo de droite

L'étude des déplacements par photogrammétrie successive permet d'entrevoir les effets du tapis rugueux, composé d'ABII et de DC, sur les mouvements sédimentaires de la plage de Riva Bella à Ouistreham.

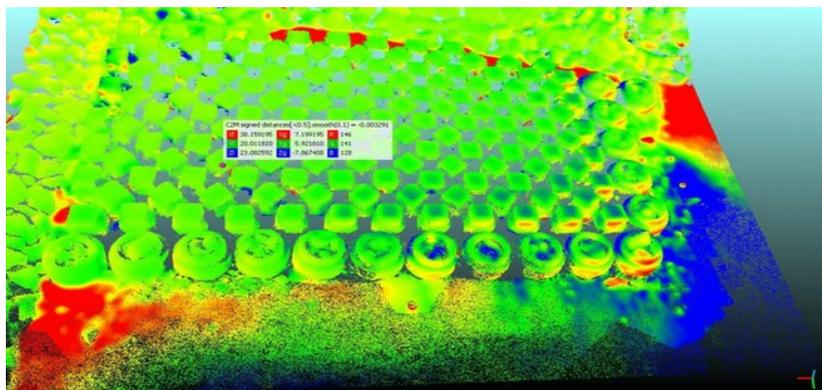


Figure 15 : Différentiels de mouvements de blocs ou de la couche sédimentaire sur le site de Ouistreham

Le projet CHERLOC, « Etude comparative d'un linéaire côtier protégé par des enrochements artificiels ou naturels à travers des approches sociétales, de biodiversité et d'ingénierie. Application aux sites de Cherbourg et de Ouistreham », est co-financé par la REGION NORMANDIE et l'Union Européenne dans le cadre du programme opérationnel FEDER-FSE 2014-2020.

CAPEL A. (2015) : Wave run-up and overtopping reduction by block revetments with enhanced roughness. Coastal Engineering

CHEN (2020) : The influence of a berm and roughness on the wave overtopping at dikes, Coastal Engineering

SAFARI, I. (2011). Analyse de la performance hydraulique d'un nouveau type de bloc artificiel utilise pour la protection côtière (Doctoral dissertation).

SAFARI, I., MOUAZÉ, D., ROPERT, F., HAQUIN, S., & EZERSKY, A. (2012). Influence du plan de pose sur les distributions de porosité au sein d'une carapace de digue à talus. XIIemes Journées Nationales Génie Côtier Génie Civil Cherbourg, 2, 791-798.

SAFARI, I., MOUAZÉ, D., ROPERT, F., HAQUIN, S., & EZERSKY, A. (2018). Hydraulic stability and wave overtopping of Starbloc® armored mound breakwaters. Ocean Engineering, 151, 268-275.