



## Conception d'ouvrages côtiers verticaux en enrochements

Paul MILESI <sup>1</sup>, Olivier KIMMOUN <sup>2</sup>, David LAJOIE <sup>1</sup>

1. SAS Hydro GC, 772 chemin du Flaquier Nord 06530 Le Tignet, France.

[paul.milesi@hydrogc.fr](mailto:paul.milesi@hydrogc.fr)

2. Ecole Centrale Marseille, 38 rue Frédéric Joliot-Curie 13013 Marseille, France.

[olivier.kimmoun@centrale-marseille.fr](mailto:olivier.kimmoun@centrale-marseille.fr)

### Résumé :

Les ouvrages verticaux en enrochements sont des dispositifs innovants et alternatifs aux ouvrages de type caissons verticaux. Les blocs sont encagés par une structure métallique ou des pieux, le tout occupant une emprise réduite au sol. Ce type d'ouvrage offre de multiples avantages : impact faible en cours de travaux, possibilité de s'implanter à proximité des zones de vie marine sans impact significatif, perméabilité laissant circuler une partie des courants. Dans le cadre du réaménagement du port de Banyuls-sur-Mer, la construction d'un musoir en enrochements verticalisés de 20m de diamètre permet d'améliorer significativement la qualité du bassin portuaire et de respecter les herbiers environnant. Un modèle numérique de diffraction 2D/3D aux équations intégrales a été développé de manière à évaluer, sans calcul lourd, différentes configurations d'ouvrages poreux, pouvant associer par exemple caissons Jarlan et enrochements. Des essais en modèle réduit physique ont permis de confirmer le fonctionnement d'ouvrages poreux simples.

**Mots-clés :** Atténuateurs de houle, Milieux poreux, Caissons Jarlan

### Abstract:

Vertical riprap structures are innovative and alternative systems to vertical caissons. The blocks are enclosed by a metal framework or drilled piles occupying a reduced ground footprint. This type of structure offers many advantages: low impact during construction, possibility of implanting near areas of marine life without significant impact, permeability for currents. As part of the redevelopment of the port of Banyuls-sur-Mer, the construction of a 20m diameter verticalized rockfill breakwater significantly improves the quality of the harbor basin and respect the surrounding seagrass. An easy-use numerical model of 2D/3D diffraction with integral equations has been developed to test different configurations of structures, combining for example Jarlan caissons and rocks. Physical scale models have confirmed the functioning of simple porous structures.

**Keywords:** Breakwater, Porous media, Jarlan caisson.

### 1. Introduction

Les études de conception de nouveaux ouvrages maritimes en zone littorale française sont généralement menées dans le cadre d'aménagements de ports existants.

## Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

L'extension des surfaces de bassins et l'amélioration de l'agitation constituent les axes principaux de développement des ports de plaisance en justifiant bien souvent un investissement en termes d'infrastructures. C'est par exemple le cas du réaménagement du port de plaisance de Banyuls-sur-Mer (66), qui est l'occasion d'améliorer significativement la qualité de son bassin portuaire par, entre autres, l'allongement de la digue principale.

L'extension d'ouvrages en mer implique depuis de nombreuses années le devoir du respect de l'environnement. Les digues à talus, très larges, construites au début du XX<sup>ème</sup> siècle pour délimiter les bassins portuaires en eaux profondes ont été progressivement remplacées par des ouvrages de type caissons verticaux plus économiques et moins consommateurs de matériaux de carrière. L'empiètement sur les fonds marins est nettement plus réduit. D'autres alternatives aux caissons verticaux amortisseurs en béton ont été imaginées, comme des ouvrages verticaux en enrochements. Les blocs sont maintenus par une structure métallique ou des pieux. Ce type d'ouvrage offre la possibilité de s'implanter à proximité des zones de vie marine sans impact significatif.

A Banyuls-sur-Mer, la construction d'un musoir en enrochements verticalisés de 20 m de diamètre dans une charpente métallique permettrait d'enrayer les problèmes d'agitation portuaire aujourd'hui rencontrés avec les houles de tempêtes de provenance Sud-Est (figure 1). Les zones d'herbiers protégés sont par ce procédé maintenues à au moins 5m du pied de la structure.

Un travail de recherche a été entrepris pour modéliser le comportement d'ouvrages poreux en enrochements face à la houle.

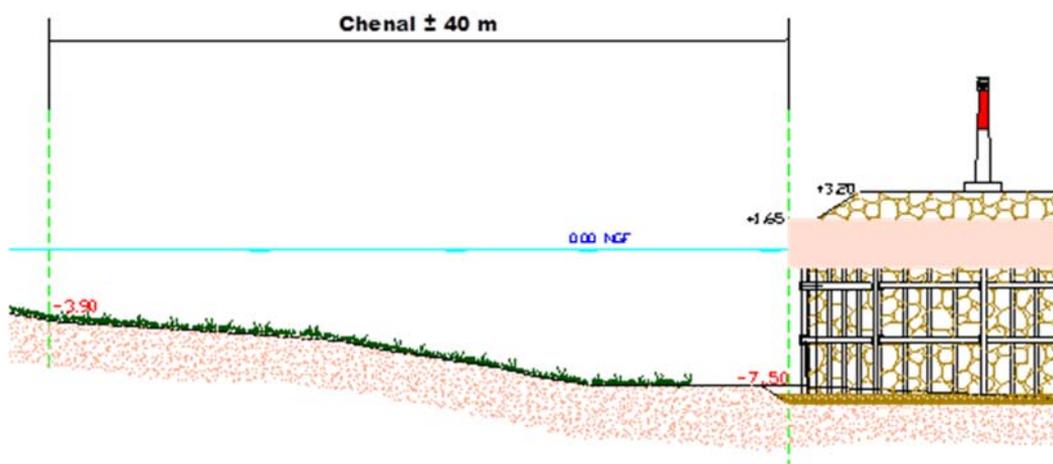
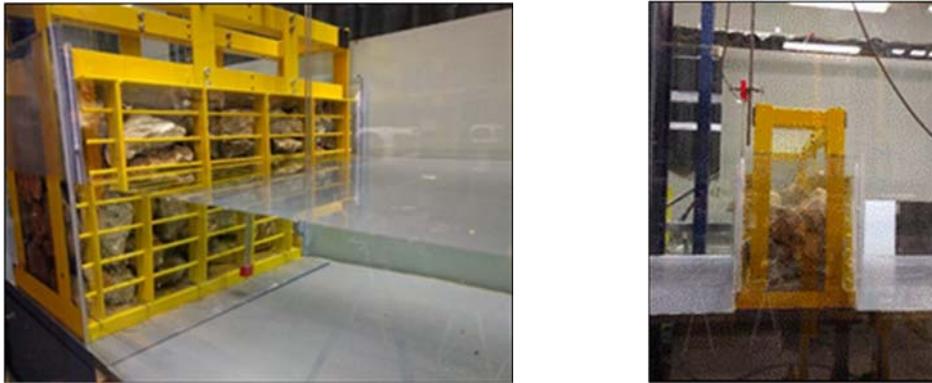


Figure 1. Configuration du musoir verticalisé.

## 2. Configuration expérimentale

Les essais ont été réalisés dans le canal à houle de l'Ecole Centrale de Marseille, d'une longueur utile d'environ 17 m par 60 cm de large et muni d'un batteur de type "volet". Une plage-amortisseur est disposé en bout de canal. La similitude de Froude à l'échelle 1/10<sup>ème</sup> permet de reproduire les forces appliquées au fluide dont l'écoulement est turbulent dans le milieu poreux.

La maquette est une cage avec une structure en acier permettant de contenir les blocs qui assureront la dissipation de l'énergie de la houle incidente. La largeur du dispositif en enrochements est de 24 cm. La hauteur d'eau est de 20 cm.



*Figure 2 : Vues oblique et latérale de la maquette.*

Les enrochements sélectionnés pour la campagne d'essais sont des enrochements de type calcaire dont la masse volumique moyenne d'un échantillon type a été mesurée à  $\rho \approx 2620 \text{ kg.m}^{-3}$ . Dans un premier temps, trois granulométries types ont été sélectionnées dans le but d'explorer l'influence de la taille des enrochements et du taux de porosité sur les caractéristiques hydrodynamiques de l'ouvrage. Les enrochements ont été pesés un par un avant chaque série d'essais afin de déterminer la courbe granulométrique correspondante à l'échantillon en place ainsi que pour déterminer la porosité. Les granulométries types utilisées dans la campagne d'essais sont les suivantes :

*Tableau 1. Caractéristiques des granulométries.*

<i>Type de granulométrie</i>	<i>M<sub>10</sub></i>	<i>M<sub>50</sub></i>	<i>M<sub>85</sub></i>	<i>D<sub>n50</sub></i>	<i>n<sub>RRD</sub></i>	<i>Porosité n</i>
G1	170g	233g	282g	4.5cm	17.2	41.5%
G2	527g	617g	716g	6.2cm	28.4	43.6%
G3	1204g	1861g	2647g	8.9cm	11.0	44.8%

On remarque que l'évolution nette de la masse médiane M<sub>50</sub> entre les granulométries types induit une évolution très légère du taux de porosité correspondante. L'étalement

## Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

des taux de porosité est au final assez restreint avec  $41.5\% \leq n \leq 44.8\%$ . Ils se trouvent dans la tranche haute des taux de porosité réalistes définis par VAN GENT (1995),  $35\% \leq n \leq 45\%$ . La contrainte des parois de la cage comparée à un empilement "libre" des enrochements pourrait expliquer ces porosités élevées comme proposé par BART MELLINK (2012). La disposition des enrochements lors de leur mise en place a aussi eu un impact, au maximum 2%, sur les taux de porosité calculés.

### 3. Résultats expérimentaux

Les coefficients de réflexion et de transmission en houles régulières sont calculés via une méthode de séparation développée par MANSARD et FUNKE (1980). Deux séries de cinq sondes limnométriques étaient disposées de part et d'autre de la maquette. Les incertitudes de mesure résident principalement dans le calibrage des sondes.

La performance hydrodynamique d'un ouvrage à dissiper la houle incidente peut être synthétisée par le calcul de l'énergie dissipée  $E_d$  :

$$E_d = 1 - (k_r^2 + k_t^2) \quad (1)$$

$k_r$  et  $k_t$  sont respectivement les coefficients de réflexion et de transmission.

L'énergie dissipée  $E_d$  par l'ouvrage poreux est nettement supérieure pour les petites périodes que pour les grandes. Elle diminue logiquement au fur et à mesure que les longueurs d'onde augmentent devant la largeur de l'ouvrage. La performance de l'ouvrage est aussi meilleure face aux grandes amplitudes. Ceci est expliqué par la présence de vitesses plus importantes et par une plus grande dissipation par le terme de frottement turbulent en  $v^2$ . Les courbes ci-dessous (figure 3) présentent les résultats des performances hydrodynamiques pour la hauteur de houle incidente  $a_i=2.5m$ .

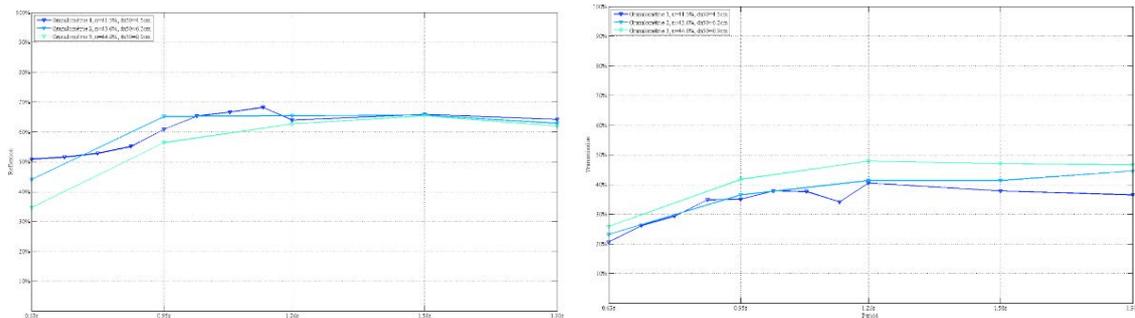


Figure 3 : Comparaison des granulométries 1, 2 et 3,  $a_i=1.25cm$

### 4. Modélisation d'un écoulement engendré par la houle dans un milieu poreux

On considère un volume fermé contenant le milieu poreux. La conservation de la quantité de mouvement à l'intérieur du domaine a pour expression :

$$\iiint_F \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \vec{v} \right) dV = -\frac{1}{\rho} \iint_{\partial \Sigma} p d\vec{S} + \iiint_{\Sigma} \vec{f}_r dV + \iiint_F \vec{g} dV \quad (2)$$

où :  $\vec{f}_r$  sont les forces résistantes à l'échelle microscopique,  $\Sigma$  représente le domaine total, F le domaine fluide,  $\partial \Sigma$  la surface extérieure du domaine  $\Sigma$ , et  $\vec{v}$  la vitesse

d'infiltration. A l'échelle macroscopique, pour un écoulement non stationnaire dans un milieu poreux, les forces de frottement peuvent être modélisées par l'équation de FORCHHEIMER (1901) étendue par POLUBARINOVA-KOCHINA (1962) qui y a ajouté un terme d'inertie :

$$\vec{F}_r = - \left[ a\vec{v}_d + b\|\vec{v}_d\|\vec{v}_d + c\frac{\partial\vec{v}_d}{\partial t} \right] \quad (3)$$

a, b et c sont des coefficients propres au milieu poreux considéré,  $\vec{v}_d$  est la vitesse de flux (Darcy) définie par  $\vec{v}_d = n\vec{v}$ , où n est le taux de porosité.

Les coefficients de frottement retenus sont ceux de BURCHARTH et ANDERSEN (1995), d'autres coefficients aboutissant à une sous-estimation de la transmission :

$$a = \alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{v}{d_{n50}^2} \quad b = \beta \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{d_{50}} \quad c = \frac{(1-n)}{n^2} C_m \quad (4)$$

où :  $d_{n50}$  est le diamètre nominal médian des blocs,  $\alpha$  et  $\beta$  sont des coefficients de tortuosité,  $C_m$  est un coefficient de masse ajoutée. L'équation (2) peut être réécrite à l'échelle macroscopique en introduisant la vitesse de flux  $\vec{v}_d$  :

$$S\frac{\partial\vec{v}_d}{\partial t} + \frac{1}{2n^2}\overrightarrow{\text{grad}}\vec{v}_d^2 = -\frac{1}{\rho}\overrightarrow{\text{grad}}p - g\vec{z} - \frac{v}{K}\vec{v}_d - \frac{C_f}{\sqrt{K}}\|\vec{v}_d\|\vec{v}_d \quad (5)$$

où les relations entre les coefficients (a, b, c) et les coefficients de frottement (K,  $C_f$ ) et d'inertie S (SOLLIT et CROSS, 1972) sont :

$$K = \frac{v}{a} \quad C_f = b\sqrt{K} \quad S = \frac{1}{n} + c \quad (6)$$

On linéarise l'équation (5) en utilisant la procédure de LORENTZ qui consiste à remplacer le terme de dissipation par une expression linéaire, en introduisant un coefficient de dissipation f adimensionnel tel que :

$$f\omega = \frac{v}{K} + \frac{C_f}{\sqrt{K}}\overline{v}_d \quad (7)$$

où :

$$\overline{v}_d = \frac{\iiint_P \int_0^T |\vec{v}_d|^3 dt}{\int_0^T |\vec{v}_d|^2 dt} \quad (8)$$

L'écoulement dans le milieu continu fluide externe au milieu poreux est supposé irrotationnel, d'où l'existence d'un potentiel des vitesses  $\Phi_F$ . En homogénéisant le milieu poreux, on le considère comme un milieu continu et on y introduit aussi un potentiel des vitesses  $\Phi_p$  :

En négligeant le terme quadratique en  $\overrightarrow{\text{grad}}\vec{v}_d^2$  et en remplaçant  $\vec{v}_d$  par  $\overrightarrow{\text{grad}}\Phi_p$ , on aboutit à :

$$S\frac{\partial\Phi_p}{\partial t} + \frac{p_p}{\rho} + gz + f\omega\Phi_p = 0 \quad (9)$$

## Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

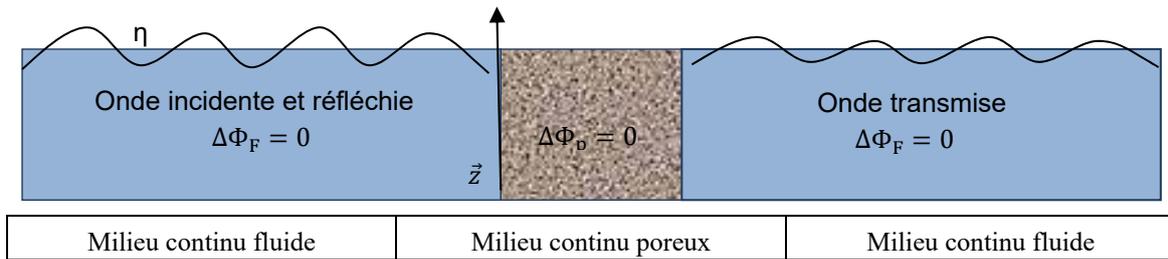


Figure 4. Configuration théorique et expérimentale.

### 5. Résultats numériques

Le système harmonique est résolu par une méthode de singularités sur la base d'une distribution mixte de sources et de doublets de RANKINE. On assure la continuité des flux et des pressions à travers les différents milieux fluides ou poreux. La non linéarité présente dans le terme  $f(\vec{v}_d)$  est calculée par itérations successives jusqu'à convergence. Les résultats des essais et des simulations correspondantes pour une hauteur de houle  $a_i=25\text{cm}$  à l'échelle réelle sont reportés ci-dessous (figures *Granulométrie 1, 2 et 3*). L'erreur quadratique moyenne relative (RMSE) est donnée à titre indicatif. Les résultats du modèle numérique vis-à-vis des données expérimentales sont satisfaisants avec toutefois une sous-estimation de la transmission pour les petits blocs.

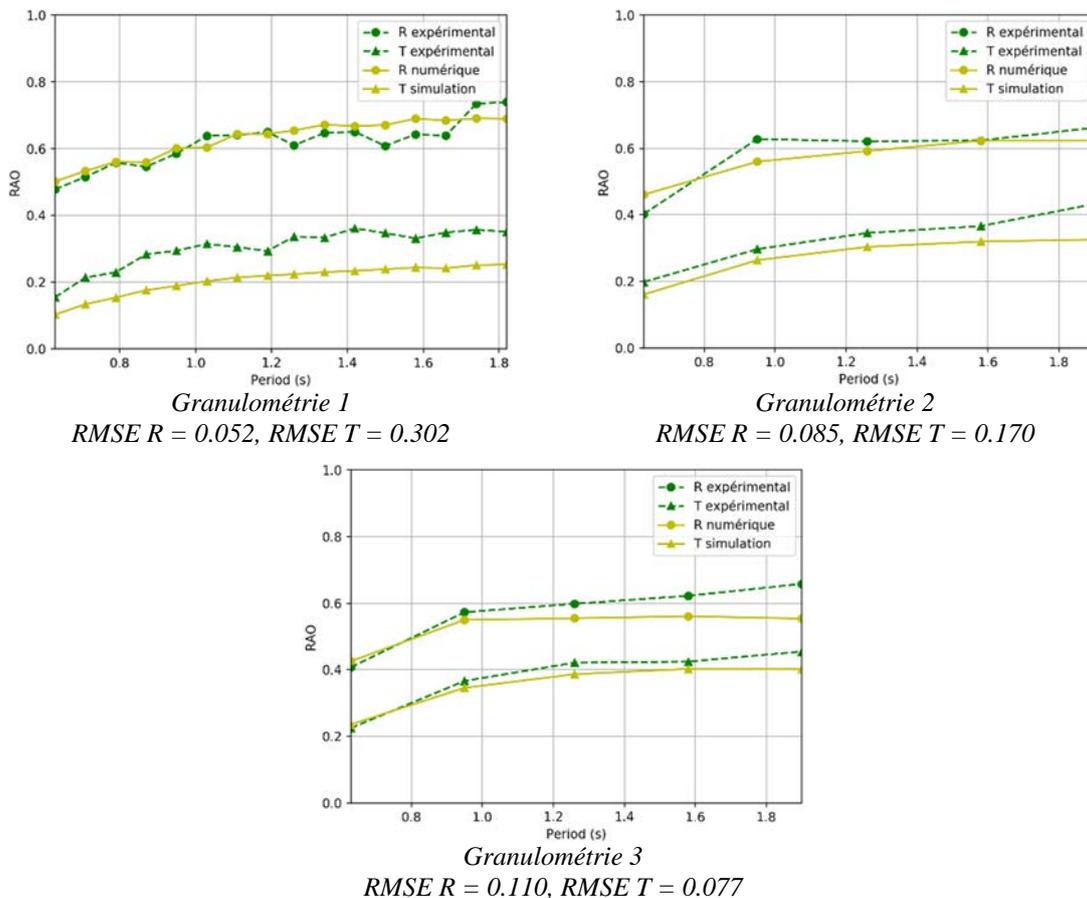


Figure 5. Courbes de résultats,  $a_i=2.5\text{m}$ , granulométrie G2.

## 6. Application, enrochements et caisson Jarlan

L'outil numérique permet d'apprécier l'efficacité d'ouvrages de conception originale associant par exemple des blocs verticaux poreux en enrochements, plus ou moins espacés, de façon à créer de nouvelles pertes de charge qui s'ajouteraient à celles déjà présentes dans un milieu poreux simple supposé homogène, ou en couplant blocs d'enrochements et parois poreuses classiques de type Jarlan. L'installation d'enrochements à l'intérieur d'un caisson Jarlan permet de jouer sur son comportement hydrodynamique tout en apportant du lest et des zones propices au développement des juvéniles.

Les exemples de configurations testées sont schématisés ci-dessous. Les configurations 1 et 2 correspondent à des caissons Jarlan classiques de longueurs de chambre respectives 3.70 m et 1.85 m. Dans les configurations 3 et 4, on place un milieu poreux sur 1.85 m de longueurs et on fait évoluer la taille des blocs mis en place.

Les courbes ci-dessous indiquent l'évolution du coefficient de réflexion avec la période pour les différentes configurations décrites précédemment. Le pic de performance d'un caisson Jarlan se situe lorsque  $0.10 < B/\lambda < 0.15$ .

La mise en place d'enrochements à l'intérieur de la chambre permet de moduler le fonctionnement de la chambre Jarlan. On montre que la période optimale de dissipation se déplace entre les deux périodes associées à la longueur de chambre sans enrochements.

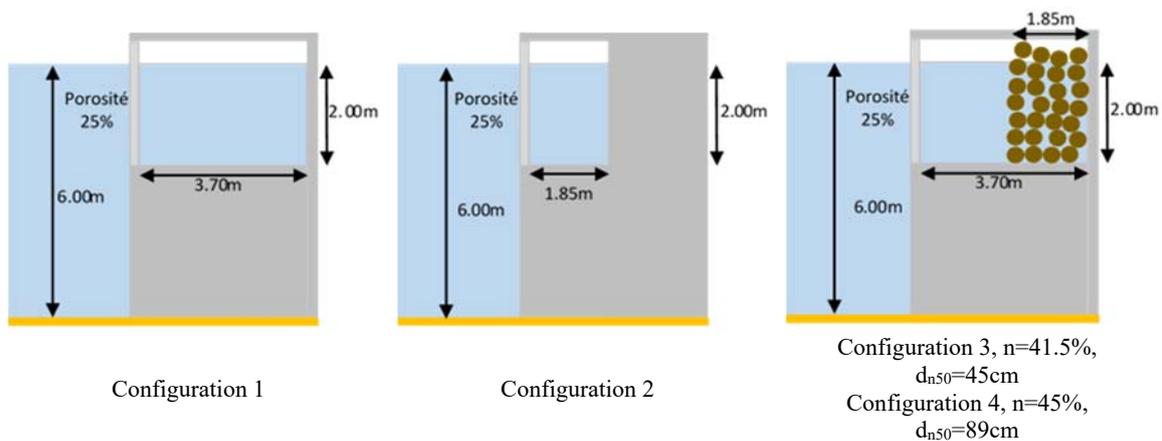


Figure 6. Schémas des configurations testées.

## Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

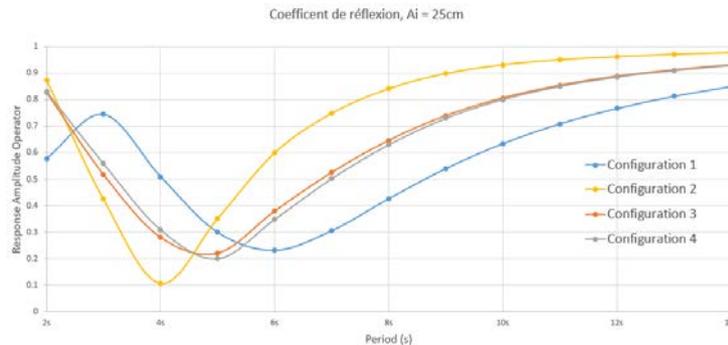


Figure 7. Efficacité des différentes configurations.

### 7. Conclusion

Les ouvrages amortisseurs en enrochements verticalisés sont des structures de conception innovantes qui permettent de respecter les herbiers en limitant l'impact au sol tout en apportant une protection supplémentaire aux bassins portuaires comme c'est le cas pour le port de Banyuls-sur-Mer. Ils s'associent facilement à d'autres ouvrages plus classiques tels que les caissons Jarlan. L'outil numérique développé doit permettre de cerner les meilleures compositions possibles entre enrochements et ouvrages classiques pour améliorer les conceptions originales alliant contraintes techniques et environnementales.

### 8. Références

- VAN GENT M.R.A. (1995). *Wave interaction with permeable coastal structures*. Thesis, Delft University of Technology.
- MELLINK B. (2012). *Numerical and experimental research of wave interaction with a porous breakwater*. Thesis, Delft University of Technology.
- POLUBARINOVA-KOCHINA P. YA. (1952). *Theory of ground water movement*. Gostekhizdat Moscow (in russian), English transl. by R.J.M. DE WIEST, (1962), Princeton University Press.
- BURCHARTH H.F., ANDERSEN O.H. (1995). *On the one-dimensional steady and unsteady porous flow equation*. Coastal Engineering, Vol. 24, pp 233-257.
- SOLLIT C.K., CROSS R.H. (1972). *Wave transmission through permeable breakwaters*, 13<sup>th</sup> Coastal Engineering Conf., vol.3, ASCE, Vancouver, pp 1827-1846.