



Influence du plan de pose sur les distributions de porosité au sein d'une carapace de digue à talus

**Iman SAFARI¹, Dominique MOUAZÉ¹,
François ROPERT², Sylvain HAQUIN¹, Alexander EZERSKY¹**

1. Université de Caen, UMR 6143 CNRS-M2C, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France.

safari.iman@gmail.com

2. Société Soframarp 4, Sq Jean Mermoz 60200 Compiègne, France.

Résumé :

La pose de blocs artificiels nécessite une étude économique prenant en compte, d'une part, l'accroissement du coût de construction de la digue en raison du grand nombre de blocs qui doivent être utilisés et, d'autre part, l'augmentation des coûts de pose et de réparation de la digue dus aux contraintes associées au placement de blocs élançés et/ou fortement imbriqués.

La méthode de pose est un paramètre important qui influence la densité de pose des blocs par unité de surface, et donc la porosité surfacique et volumique de la carapace, conséquences sur la stabilité.

Dans ce papier, nous présentons deux manières différentes de considérer les porosités au sein de la carapace et ainsi d'examiner l'évaluation de ce paramètre en termes de "performances hydrauliques" et "stabilité". Si la porosité volumique est relativement aisée à déterminer en modèle physique, ce n'est pas le cas de la porosité surfacique. C'est pourquoi nous avons opté pour une représentation virtuelle en trois dimensions à l'aide d'un logiciel DAO. Cette analyse aide à mieux comprendre l'influence de la porosité sur les phénomènes hydrauliques au sein de la carapace et donc les conséquences sur la stabilité globale de l'ouvrage de défense.

Mots-clés :

Carapace – Densité de pose – Digue – Pose de bloc – Porosité – Porosité surfacique – Porosité volumique – Performance hydraulique – Ouvrage de défense

1. Introduction

Les blocs artificiels sont une alternative pour remplacer les enrochements naturels lorsque l'on ne dispose pas de blocs naturels en quantité et qualité suffisante ou d'une taille assez importante pour assurer la stabilité.

La pose de blocs artificiels nécessite une étude économique prenant en compte, d'une part, l'accroissement du coût de construction de la carapace en raison du grand nombre de blocs qui doivent être utilisés et, d'autre part, l'augmentation des coûts de pose associés au placement complexe de blocs élançés et/ou fortement imbriqués.

Thème 4 – Ouvrages portuaires et offshore

La mise en place des blocs artificiels s'opère suivant une grille de pose prédéfinie qui détermine l'emplacement de chaque bloc par rapport aux autres. Cette grille peut être adaptée en fonction de la position relative des blocs voisins. La méthode de pose est un paramètre important qui influence grandement la "stabilité" et "performances hydrauliques" de la carapace (MUTTRAY *et al.*, 2004).

En fait, les plans de pose visent à rechercher un optimum entre stabilité et performance qui dépend de la forme des blocs :

- une imbrication maximale des blocs compte-tenu de leur géométrie afin d'éviter les plans de rupture dans la carapace (OEVER *et al.*, 2006),
- une porosité optimale de la carapace afin d'augmenter la dissipation, tout en minimisant le "run-up" (et donc le franchissement) ainsi que des sous-pressions déstabilisatrices (DE GROOT *et al.*, 1994).

On présentera une définition de certains éléments géométriques de carapace tels que : densité de pose et porosité. Ensuite, on exposera les méthodes de détermination d'un certain nombre de paramètre comme : la porosité surfacique et volumique, l'épaisseur de la carapace, le nombre de blocs, la densité de pose et etc. Il est important de noter que les résultats présentés sont valable uniquement pour le bloc étudié, quoique la méthode exploitable pour l'ensemble des blocs artificiels.

2. Densité de pose et porosité

Une densité de pose, basée sur le rapport de surface d'occupation, sera utilisée pour cette recherche. L'avantage de cette méthode est que le volume nécessaire de béton et aussi le nombre de blocs exigé par surface peuvent être simplement calculés (LATHAM *et al.*, 2002). En général, la densité de pose des carapaces, ϕ , est définie comme (CETMEF, 2007) :

$$\phi = \frac{N_a}{A} D_n^2 \quad (1)$$

où :

N_a = nombre de blocs placés dans la zone concernée;

A = surface de la carapace parallèle au talus local [mm^2];

D_n = diamètre nominal du bloc [mm].

La densité de pose joue un rôle essentiel sur la porosité, et avec la forme et les dimensions des blocs, contrôle l'imbrication entre les blocs. Du point de vue général, la porosité accrue de la carapace peut entraîner une meilleure stabilité du fait de la plus grande dissipation d'énergie, ou au contraire diminuer la stabilité de la carapace à cause de la réduction de l'enchevêtrement des blocs ou du frottement bloc contre bloc (CETMEF, 2007). Il s'agit bien de trouver un optimum de densité. Ce paramètre dépend principalement de la forme du bloc, ainsi que du plan de pose des blocs sur le talus.

La porosité de couche, n_v , peut être en général estimée à l'aide de l'équation suivante (CEM, 2002) :

$$n_v = 100 \left[1 - \frac{N_a V_b}{nk_t D_n} \right] \quad (2)$$

où :

n = épaisseur de la carapace exprimée en nombre de couches d'encrochements ;

V_b = volume du bloc artificiel [mm^3] ;

k_t = coefficient d'épaisseur de couche, défini par $t_a = nk_t D_n$;

t_a = épaisseur de la carapace [mm] (LATHAM *et al.*, 2002).

Le terme de porosité est une définition tridimensionnelle. Par analogie, on peut déterminer un rapport de surface. On définit alors la porosité surfacique (à deux dimensions) :

$$n_a = \frac{A_p}{A_0} = \frac{\text{Surface libre disponible à l'écoulement des eaux}}{\text{Surface totale}} \quad (3)$$

Il est important de rappeler que l'objectif de cette étude est de quantifier le plus précisément possible le taux des porosités volumique et surfacique au sein d'une carapace en spécifiant un écart limite pour la distance inter-centres entre deux blocs voisins.

Afin de calculer les vides entre les blocs, nous avons développé un modèle numérique à l'aide d'un logiciel de DAO (3D). L'avantage de cette méthode est la possibilité de quantifier de plus simples informations concernant le placement tels que : les coordonnées de chaque unité, l'épaisseur de la couche.

Cette analyse calcule non seulement les coordonnées du chaque bloc, mais nous donne également automatiquement plus d'informations sur le type de pose comprenant la densité de pose, le nombre totale de blocs, et la distance d'un centre à l'autre des unités.

Un autre avantage de cette analyse est la comparaison entre les plans de pose dans une représentation virtuelle en trois dimensions à l'aide d'un logiciel DAO et un modèle réduit montre la perspicacité des modèles réalistes de plan de pose. Cette information sera utilisée pour améliorer la mise en place des blocs.

3. Méthodologie

La pose des blocs artificiels, postérieure à la construction du noyau et des sous-couches, peut devenir un facteur limitant (temps de pose, qualité, ...) pour l'avancement des travaux. Afin de décrire plus facilement les différents arrangements, on présente une vue virtuelle du plan de pose des blocs (SAFARI, 2011).

Différents configurations de pose sont exposées dans les paragraphes suivants. Il conviendra dans un premier temps de déposer ces blocs au voisinage les uns des autres et puis aussi parfois par translation (limitée) d'imbriquer les blocs les uns aux autres.

Dans cette étude, on propose deux techniques de placement :

- Un placement "régulier" ou "uniforme" ;
- Un placement "alternatif" ou "spécial".

Thème 4 – Ouvrages portuaires et offshore

3.1 Placement "régulier" ou "uniforme"

Suivant la première attitude, tous les blocs sont disposés côte à côte dans une attitude parfaitement identique et régulière. La figure suivante montre une succession de schémas illustrant cette technique. Un nombre minimum de blocs et une imbrication faible entre les blocs caractérisent ce plan de pose. La figure montre une vue supérieure de cet agencement (figure 1-a).

La deuxième méthode est mise en oeuvre de façon similaire à la première méthode. Par contre, le bloc de la deuxième rangée se place dans l'interstice des deux blocs situés en dessous, de telle sorte que les pattes du bloc situées vers le bas touchent les deux pattes des blocs inférieurs (figure 1-b).

3.2 Placement "alternatif" ou "spécial"

Dans cette configuration, les blocs sont agencés de façon régulière pour la première ligne. La patte "C" est vers le haut, parallèlement à la ligne de plus grande pente du talus, et pour la rangée du bas, seules les pattes "A" et "B" touchent la sous-couche. Le premier rang étant en place, le premier bloc de la deuxième rangée se positionne dans le "creux" de deux blocs situés en dessous. En fait, la patte "C" est dans le sens inverse de la première couche. A cette place, il se trouve verrouillé par deux blocs, ce qui lui empêche toute translation latérale. La pose de tels blocs fournit un bon enchevêtrement et le maximum de points de contacts entre les blocs voisins (figure 1-c). Pour une deuxième configuration étudiée, la pose de la première rangée est déterminante. On pose le bloc sur les deux pattes vers le bas et une patte vers le haut.

Les blocs adjacents sont placés de la même manière. Les blocs des rangées supérieures seront placés dans le sens inverse de la première rangée. On pose le bloc sur une patte vers le bas et deux pattes vers le haut. Puis, il sera amené par translation vers le "creux" entre les blocs inférieurs (figure 1-d).

Le tableau 1 suivant synthétise les caractéristiques des plans de pose étudiés.

Afin d'avoir une bonne estimation de l'espace vide existant entre les blocs, huit coupes sont réalisées en épaisseur à des points critiques (extrémités et milieu de la carapace, points de contact) (figure 2).

Ces coupes ont été effectuées parallèlement à la pente du talus. D'autre part, ces coupes nous permettent de calculer la porosité surfacique dans chaque plan et aussi d'observer les points de contacts entre des blocs. La porosité volumique peut se calculer à partir de la porosité surfacique et l'épaisseur de deux coupes consécutives.

L'espacement maximum horizontal entre deux centres de gravité de deux blocs voisins est identique pour tous les plans de pose ($D_H = 71,37$ mm). Par contre l'espacement maximum vertical (D_V) est variable (Tableau 1). Pour les plans de pose "3" et "4", cet espacement est aussi différent avec des attitudes différentes (figure 1).

4. Résultats

Les principaux résultats des mesures pour déterminer la porosité pour les différents plans de pose sont présentés sur les figures suivantes. Dans ces figures, on présente deux notions de porosité : la porosité volumique et la porosité surfacique.

On réalise des coupes du bloc dans des sections parallèles à la pente qui nous permettent d'obtenir soit la porosité volumique soit la porosité surfacique de chaque coupe (c'est-à-dire : pour chaque section effectuée en parallèle de la pente, on peut mesurer l'aire (A_p) occupée par les pores).

En observant les figures suivantes, on constate la variation de la porosité dans l'épaisseur en fonction du plan de pose.

En effet, la variation induite par les différentes "plans de pose" est significativement plus importante que la "variabilité naturelle pour un même plan de pose".

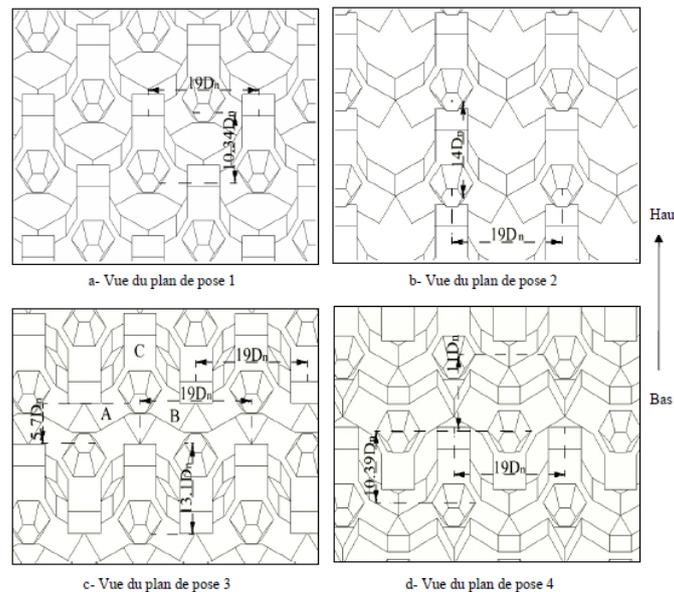


Figure 1. Schéma des différents plans de pose étudiés.

Tableau 1. Caractéristiques des différents plans de pose

<i>Plan de pose</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Nombre de blocs</i>	<i>104</i>	<i>84</i>	<i>117</i>	<i>104</i>
<i>Epaisseur de la carapace adimensionnelle [$E_c = f(D_n)$]</i>	<i>1,39D_n</i>	<i>1,39D_n</i>	<i>1,39D_n</i>	<i>1,39D_n</i>
<i>Porosité surfacique minimum</i>	<i>41,27</i>	<i>52,57</i>	<i>33,93</i>	<i>40,65</i>
<i>Porosité volumique minimum</i>	<i>59,40</i>	<i>67,21</i>	<i>54,32</i>	<i>59,51</i>
<i>Espacement maximum horizontal</i>	<i>19D_n</i>	<i>19D_n</i>	<i>19D_n</i>	<i>19D_n</i>
<i>Espacement maximum vertical</i>	<i>14D_n</i>	<i>10,34D_n</i>	<i>5,7D_n</i> <i>13,1D_n</i>	<i>11D_n</i> <i>10,39D_n</i>
<i>Point de contacts</i>	<i>6</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>8</i>

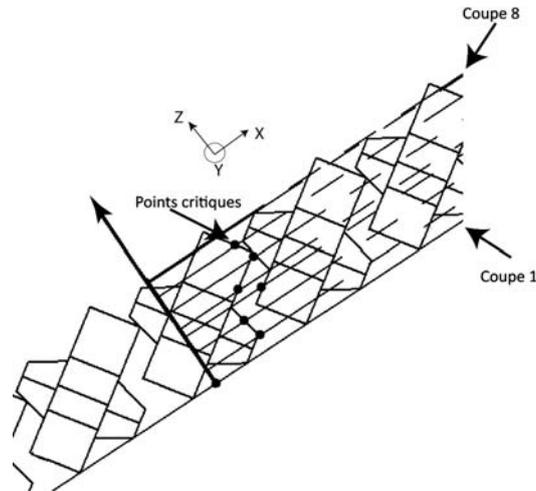


Figure 2. Vue en perspective d'une carapace constituée par des blocs et emplacement des coupes parallèle à la pente.

D'autre part, on observe aussi que la porosité surfacique les plus élevées se situe plutôt aux extrémités et que les plus petites porosités se trouvent au sein du massif : la porosité surfacique est dissymétrique au sein du massif.

Tout d'abord, on note que la valeur minimum de porosité surfacique se situe pour une profondeur $d = 0,40D_n$ pour le plan de pose "3", donc la carapace devient moins perméable et un nombre de blocs employé plus important que prévu. On remarque également que la décroissance de porosité au-delà de ce point est plus rapide.

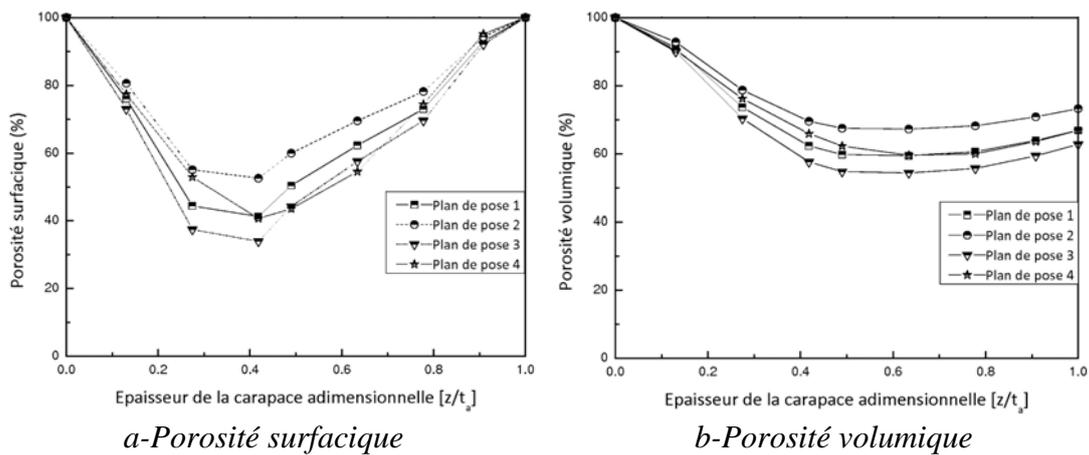


Figure 3. Comparaison de la valeur de porosité de carapace.

Par contre, le plan de pose "2" a un maximum de porosité et un minimum de points de contact donc une stabilité inférieure comparée à d'autres plans de pose. Cependant, le nombre de blocs utilisé sur la carapace est inférieur aux autres plans de pose. La décroissance de porosité à l'extérieur de la carapace est progressive et faible.

En examinant les figures 1 et 3, on peut noter le fait que les différents plans de pose engendrent une différence importante sur la porosité et aussi sur le nombre de blocs utilisés. Par contre, on observe cependant une différence porosité de pose pour les plans de pose "1" et "4" en sachant que le nombre de blocs utilisés est le même.

Les figures "1-a"- "1-d" montrent également d'autres paramètres importants qui jouent sur la stabilité de bloc, c'est-à-dire l'imbrication, caractéristique favorable à la stabilité du bloc. En fait, ces plans de pose permettent de calculer le nombre de points de contact et donc dans une certaine mesure le degré d'imbrication. En effet, le degré d'imbrication est lié en partie au nombre de points de contact d'un bloc avec ses voisins dans une carapace.

Dans ces conditions, une forte imbrication est observée dans le plan de pose "3" ce qui permet d'atteindre une forte stabilité d'équilibre des éléments vis-à-vis d'une sollicitation hydraulique générée par la houle.

A partir de ce travail, le tableau 2 suivant regroupe les principaux résultats qui sont à l'origine des plans de pose proposés. Il s'agit d'une évaluation très sommaire donnant des tendances de groupe à l'intérieur desquels le plan de pose peut néanmoins présenter des performances très différentes.

La porosité de la carapace pour la méthode régulière (plans de pose "1" et "2") est supérieure à la méthode alternative (plans de pose "3" et "4"). Par contre, l'imbrication entre les blocs est diminuée.

On note que la stabilité du plan de pose régulier est inférieure à celle le plan de pose alternatif. Cependant, le nombre de blocs utilisés sur la carapace est inférieur au plan de pose alternatif. Le coût de construction est ainsi diminué.

L'ensemble de ces résultats seront très utiles pour la mise en place de la carapace lors des essais expérimentaux, ainsi que pour une meilleure compréhension des phénomènes observés (visant à une optimisation de la performance du bloc).

A la fin, Il est important de noter que les résultats présentés sont valable uniquement pour le bloc étudié, quoique la méthode exploitable pour l'ensemble des blocs artificiels.

Tableau 2. Relations entre la géométrie et les paramètres de base du bloc (Abréviation : N_b : Nombre du bloc, E_c : Epaisseur de la couche, E_i : Imbrication, F_p : Facilité de pose, P_o : Porosité, P_r : Perméabilité, F_r : Franchissement/- : faible, +- : moyen, + : fort, ++ : très fort)

		N_b	E_c	E_i	F_p	P_o	P_r	F_r
<i>Plan de pose</i>	<i>1</i>	+	+	+	++	+	+	+-
	<i>2</i>	++	+	-	++	++	++	+-
	<i>3</i>	-	+	++	+	-	+	+
	<i>4</i>	+	+	++	+	+	+	+

5. Conclusions

Pour mettre en évidence l'influence du plan de pose de blocs sur les caractéristiques des couches de carapace, on réalise des mesures de paramètres (épaisseur, porosité...) avec différents plans de pose avec un seul type de bloc à l'aide d'un modèle numérique de DAO. Pour ce faire, on définit différents plans de pose de blocs sur le talus (vis-à-vis de l'espacement et de l'attitude des blocs).

Un concept théorique initial, associé à un modèle numérique (DAO) et des travaux expérimentaux montre qu'une grande porosité volumique (ou globale) favorise la pénétration de l'écoulement à travers la carapace et dans le filtre, l'ouvrage est donc davantage perméable, les ascensions "run-up" et descentes "run-down" sont plus faibles et donc les vitesses d'écoulement le long du talus s'en trouvent diminuées. Ainsi, lorsque l'on désire réduire la transmission de la houle, la porosité élevée doit être requise. Il faut remarquer que la réduction de la porosité risque de réduire la stabilité des blocs, du fait du soulèvement de blocs par les pressions qui se développent à l'intérieur de la digue.

La surface de moindre porosité semble déterminante concernant les différentiels de pressions les plus dommageables et donc pour la stabilité des blocs considérés sous l'angle des sous-pressions générées par les défauts de perméabilité.

6. Références bibliographiques

CEM (2002). *Coastal Engineering Manual (CEM)*. In U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, USA, 335 p.

CETMEF (2007). *Guide enrochement : L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques*. Version française du Rock Manual, CETMEF, Compiègne, 1302 p.

DE GROOT M.B., YAMAZAKI H., VAN GENT M.R.A., KHEZRURI Z. (1994). *Pore pressures in rubble mound breakwaters*. Proc. 24th Int. Conference on Coastal Engineering, Kobe, Japan, ASCE, Vol. 2, pp 1727-1738.

LATHAM J.P., NEWBERRY S., MANNION M., SIMM J., STEWART T. (2002). *The void porosity of rock armour in coastal structures*. Proc. of the ICE-Water and Maritime Engineering, Vol. 154, pp 189-198.

MUTTRAY M., REEDIJK B., VOS-ROVERS I. BAKKER P. (2004). *Placement and structural strength of Xbloc and other single armour units*. ICE Coastlines, Structures and Breakwater 2005, London.

OEVER E.T., VERHAGEN H.J., KLABBERS M., REEDIJK B. (2006). *Theoretical and experimental study on the placement of Xbloc armour units*. Proc. 30th Int. Conference on Coastal Engineering, San Diego, California, USA, pp 4841-4848.

SAFARI I., (2011). *Analyse de la performance hydraulique d'un nouveau type de bloc artificiel utilisé pour la protection côtière*. Thèse de doctorat, Univ. de Caen, 233 p.