



## Validation d'un concept de port autonettoyant à l'aide de modélisations hydrosédimentaires

Charles ABESSOLO<sup>1</sup>, Malek BENAMOUR<sup>1</sup>, Imene BOULELLI<sup>1</sup>,  
Martin SANCHEZ<sup>1</sup>, Tom RENAUD<sup>2</sup>,  
Damien GRIMONT<sup>3</sup>, Georges CLAVERIE<sup>4</sup>

1. Université de Nantes, LPGN, UMR 6112 CNRS, BP 92208, 44322 Nantes, France.  
*[martin.sanchez@univ-nantes.fr](mailto:martin.sanchez@univ-nantes.fr)*
2. SCE NANTES, 5 Av Cauchy, BP 10703, 44307 Nantes, France.
3. BLUERING, 5 Av Cauchy, BP 10703, 44300 Nantes, France.
4. CREOCEAN, Zone Technocean, rue Charles Tellier, 17000 La Rochelle, France.

### Résumé :

Ce manuscrit présente la validation d'une stratégie de port autonettoyant qui offre une possibilité de maîtrise intégrale du problème d'envasement dans les aménagements portuaires construits selon le concept innovant breveté BlueRing. Les régions concernées sont celles où l'envasement s'explique par le dépôt des vases apportées en suspension par les courants de flot. La propagation de la marée, qui est en grande partie responsable de l'envasement, représente aussi une énergie pouvant être utilisée. Cette énergie est mise à profit pour expulser du port des vases remises en suspension mécaniquement pour obtenir un port autonettoyant.

La stratégie de port autonettoyant est validée pour une marée semi-diurne macrotidale à travers une série de modélisations hydrosédimentaires 2DH. Les résultats obtenus permettent de définir le moment idéal pour les opérations de remise en suspension au cours d'un cycle de marée et la périodicité de ces opérations en fonction du taux d'envasement "naturel" des ports à flot de la région étudiée.

### Mots-clés :

Port de plaisance – Port autonettoyant – Port à flot – Port à sec – BlueRing<sup>®</sup>

### 1. Introduction

Cette étude concerne le concept d'aménagement portuaire pour les plaisanciers breveté BlueRing (BLUERING, site web). Ce concept intègre un espace souterrain dans les infrastructures portuaires (figure 1) permettant l'implantation d'un port de plaisance en site urbain à densité immobilière élevée sur une surface restreinte de forte valeur foncière. L'aménagement de l'espace souterrain offre une large gamme de possibilités : parking et port à sec (figure 1), surfaces commerciales, bureaux, etc.

Un problème récurrent dans les ports de plaisance est celui de l'envasement du bassin, qui est nécessairement abrité de la houle océanique. La possibilité d'inclure une importante partie de port à sec dans les aménagements BlueRing (figure 1) peut

## *Thème 2 – Dynamique sédimentaire*

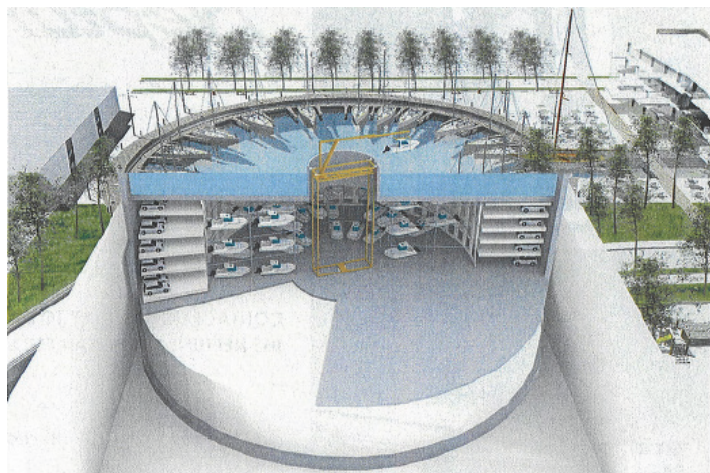
permettre de réduire jusqu'à 86% les dragages calculés en volume de vase rapporté au nombre total d'embarcations (SANCHEZ *et al.*, 2010 ; SANCHEZ *et al.*, 2011).

Afin de contrôler le problème d'envasement dans un port BlueRing, plusieurs stratégies ont fait l'objet d'études en vue de leurs validations. Les principales stratégies étudiées sont :

- i) port sans envasement grâce au maintien en suspension des vases dans le bassin portuaire, obtenu avec une circulation créée à l'aide d'une série d'agitateurs ;
- ii) port autonettoyant avec des remises en suspension de vases déposées, provoquées à des intervalles de temps réguliers afin d'accroître l'expulsion des sédiments en suspension par le jusant ;
- iii) port avec micro-dragage adapté à la taille réduite du bassin.

Chacune de ces 3 stratégies peut être mise en œuvre simultanément avec une réduction du taux d'envasement obtenue grâce à la gestion d'une porte d'accès, ou éventuellement d'une écluse, afin de réduire le volume d'eau oscillant à chaque cycle de marée.

L'objectif de ce manuscrit est de développer et de valider le concept de port autonettoyant qui peut s'appliquer dans toutes les régions où l'envasement est le résultat d'un dépôt des matières en suspension (MES) apportées par le courant de flot. Ce dépôt s'explique par les conditions hydrodynamiques calmes dans le bassin portuaire.



*Figure 1. Illustration d'un port à flot en site urbain avec port à sec et parking souterrains, selon le concept BlueRing.*

### **2. Caractérisation du taux d'envasement selon les facteurs environnants**

D'une façon générale on constate que dans un port dans le bassin duquel règnent des conditions d'eau calme, le taux d'envasement "naturel" par unité de surface augmente avec l'augmentation des paramètres suivants :

- a) le marnage de la marée ;
- b) la turbidité dans les eaux environnantes ;
- c) la vitesse de chute des matières en suspension.

Une étude du bilan sédimentaire sur un cycle de marée permet le calcul du taux d'envasement "naturel" d'un port abrité en fonction des paramètres du problème (SANCHEZ *et al.*, 2011). La figure 2 relie le taux d'envasement à la concentration  $C$  en MES dans l'eau environnante, pour 4 différentes valeurs du marnage moyen  $H_{moy}$ . Les valeurs des marnages étudiés sont les suivantes :

- a)  $H_{moy}=8,00$  m,  $H_{max}\approx 13,6$  m – marée hypertidale,
- b)  $H_{moy}=3,60$  m,  $H_{max}\approx 6,2$  m – marée macrotidale,
- c)  $H_{moy}=1,20$  m,  $H_{max}\approx 2,1$  m – marée mésotidale,
- d)  $H_{moy}=0,30$  m,  $H_{max}\approx 0,5$  m – marée microtidale.

La figure 2 a été dressée pour une marée semi-diurne d'une période de 12h24', une concentration de la vase déposée de  $300 \text{ kg m}^{-3}$ , et une vitesse de chute effective  $W^{ef}$  rattachée à la concentration en  $C$  par la loi d'Owen :  $W^{ef} = 0,002 \times C$  (avec  $W^{ef}$  donné en  $\text{m s}^{-1}$  et  $C$  en  $\text{kg m}^{-3}$ )

Bien que le taux d'envasement évalué soit dépendant des valeurs retenues des paramètres de la loi d'Owen, les courbes de la figure 2 restent valables en première approximation pour toutes les vases marines et estuariennes.

La turbidité varie d'une façon importante d'une région à une autre. Les ordres de grandeur des valeurs de ce paramètre sont les suivants :

- a)  $C < 0,002 \text{ kg m}^{-3}$ : eau océanique transparente de grandes profondeurs,
- b)  $0,002 < C < 0,01 \text{ kg m}^{-3}$ : eau océanique du plateau continental,
- c)  $0,01 < C < 0,05 \text{ kg m}^{-3}$ : eau des régions côtières exposées à la houle,
- d)  $0,05 < C < 0,2 \text{ kg m}^{-3}$ : eau des régions abritées à très forte turbidité (baies et estuaires),
- e)  $C > 0,2 \text{ kg m}^{-3}$ : turbidité de pointe dans les régions à forte turbidité (bouchon vaseux).

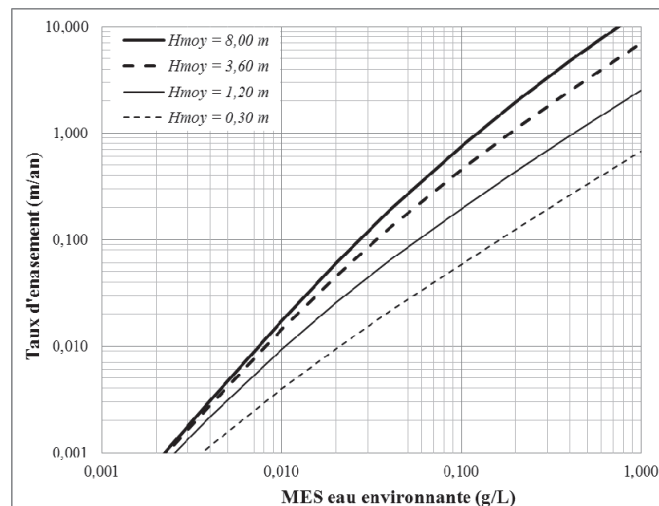


Figure 2. Taux d'envasement "naturel" d'un port abrité en fonction de la concentration en MES dans l'eau environnante pour 4 valeurs du marnage moyen  $H_{moy}$  (SANCHEZ *et al.*, 2011), (pour une marée semi-diurne et  $W^{ef}[\text{m s}^{-1}] = 0,002 \times C[\text{kg m}^{-3}]$ ).

### 3. Le port BlueRing autonettoyant

#### 3.1 Définition du concept de port autonettoyant

Dans la plupart des cas l'envasement des ports à flot s'explique par un apport de vase en suspension par le flot supérieur à l'expulsion par le jusant. On constate que le problème d'envasement est d'autant plus important que le marnage est élevé (tous les autres paramètres du problème étant conservés constants). Cependant, la marée représente aussi une énergie pouvant être utilisée pour évacuer les vases déposées.

Une solution retenue pour parvenir à la mise en place du port autonettoyant comporte une remise en suspension mécanique des vases fraîchement déposées de manière à accroître l'évacuation des sédiments par le jusant et ce, pour parvenir à un équilibre du bilan sédimentaire entre la vase apportée par le flot et celle expulsée par le jusant.

#### 3.2 Description des modélisations hydrosédimentaires

Une série de simulations numériques a été effectuée à l'aide du logiciel MIKE 21 (DHI, 2007). Tous les résultats présentés par la suite correspondent à une marée semi-diurne macrotidale ( $H_{moy}=3,6$  m) dans une région à très forte turbidité ( $C=0,2$  kg m<sup>-3</sup>). Les dimensions du domaine étudié sont montrées sur la figure 3 (BENAMOUR, 2011).

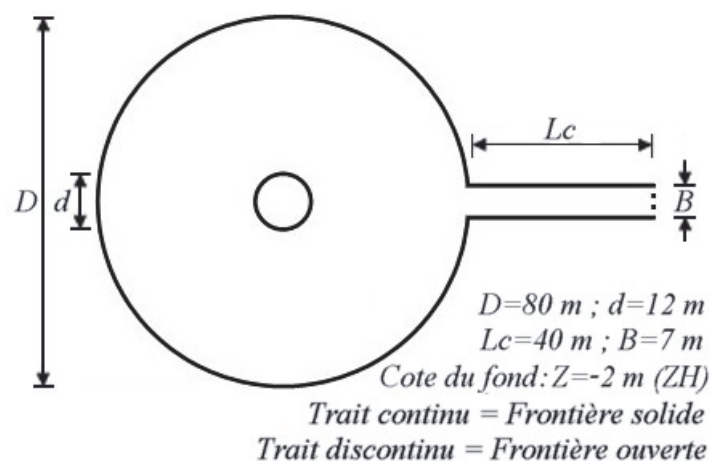


Figure 3. Schéma définissant le domaine portuaire étudié.

Les premières simulations sans prise en compte du puits central visent à vérifier la cohérence des résultats par une comparaison entre les taux d'envasement issus des modélisations et ceux pouvant être évalués avec les courbes de la figure 2 sachant que ces courbes ont été dressées grâce à une analyse théorique simplifiée du problème (SANCHEZ *et al.*, 2011).

La figure 4 montre deux courbes de variation du dépôt au fond en fonction du nombre de cycles de marée. La courbe en rouge correspond à une concentration initiale  $C_{init}$  des matières en suspension dans le port de  $0,200$  kg m<sup>-3</sup>, valeur égale à celle de la

concentration dans l'eau environnante. La courbe en noir correspond à  $C_{init}=0,071 \text{ kg m}^{-3}$  qui est la valeur théorique de ce paramètre selon la méthode d'analyse théorique simplifiée du problème.

Le taux d'envasement représente le dépôt de vase dans le port divisé par le temps. Ce taux est donc proportionnel à la pente des courbes de la figure 4. On constate que l'effet des conditions initiales se fait sentir sur le premier cycle de marée, après quoi la pente des deux courbes devient constante. Cet effet des conditions initiales affecte principalement la courbe en rouge car sa valeur de  $C_{init}$  est éloignée de la valeur d'équilibre qui n'est pas toujours connue *a priori*.

Après 50 cycles de marée l'envasement cumulé est d'environ  $22 \text{ kg m}^{-2}$ , ce qui permet d'extrapoler à  $310 \text{ kg m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ . Si l'on se rappelle que la valeur retenue pour la concentration de la vase déposée est de  $300 \text{ kg m}^{-3}$ , on évalue un taux d'envasement de  $1,03 \text{ m an}^{-1}$  qui correspond bien aux résultats de la figure 2. Ce résultat très précis contribue à une validation de la série de modélisations numériques mise en œuvre.

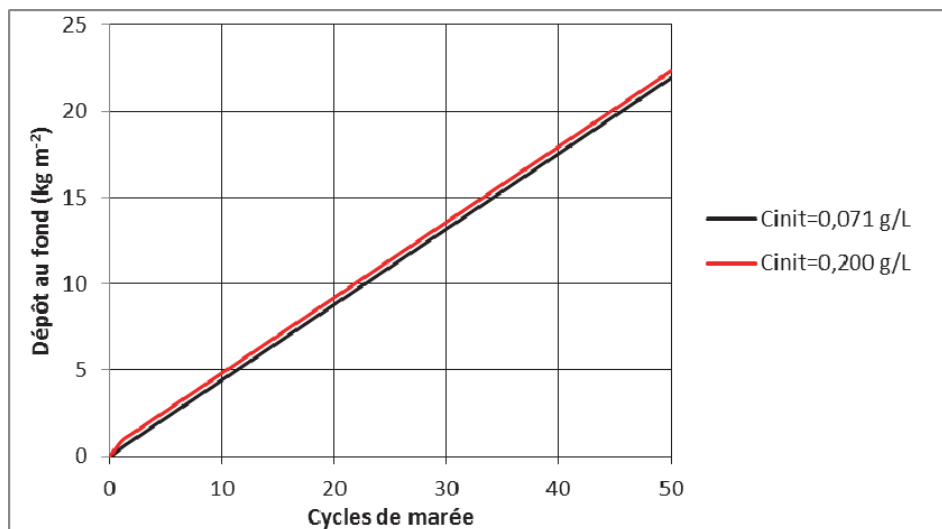


Figure 4. Taux d'envasement en fonction de la concentration en MES dans l'eau.

### 3.3 Description de la remise en suspension dans le modèle

Une remise en suspension de vases déposées à des intervalles de temps réguliers afin d'accroître l'expulsion des sédiments en suspension par le jusant est nécessaire pour obtenir un port autonettoyant. Dans les modélisations numériques, la remise en suspension est le résultat d'une action mécanique. Cette action mécanique entraînant la remise en suspension est caractérisée par une contrainte tangentielle  $\tau$  agissant au fond pendant une durée  $2\Delta t=1800 \text{ s}$ . Pendant un premier laps de temps  $\Delta t$  la valeur de  $\tau$  varie linéairement de 0 à  $5,5 \text{ N m}^{-2}$  et pendant un deuxième laps de temps de même durée  $\Delta t$  la valeur de  $\tau$  passe de  $5,5$  à  $0 \text{ N m}^{-2}$  (voir figure 6a).

#### 4. Résultats des modélisations hydrosédimentaires

Dans toutes les modélisations qui suivent, la configuration de la figure 3 avec le puits central est retenue.

##### 4.1 Validation du concept de port autonettoyant

La figure 5 montre l'évolution du dépôt moyen calculé à la basse mer (BM) en fonction du nombre de cycles de marée. La droite en trait continu correspond à un port sans remises en suspension provoquées. En pointillés sont tracés les résultats associés à des remises en suspension mises en œuvre à chaque cycle de marée à des instants précis après la pleine mer (PM).

La solution d'un port autonettoyant correspond aux asymptotes horizontales des courbes discontinues en pointillés montrées sur la figure 5 (taux d'envasement nul obtenu par un équilibre entre la masse d'eau entrant et sortant du port).

On constate que la meilleure solution est obtenue quand la remise en suspension s'effectue entre 1 et 3 heures après la pleine mer. Dans ce cas le dépôt résiduel qui doit être remis en suspension à chaque marée est minimisé.

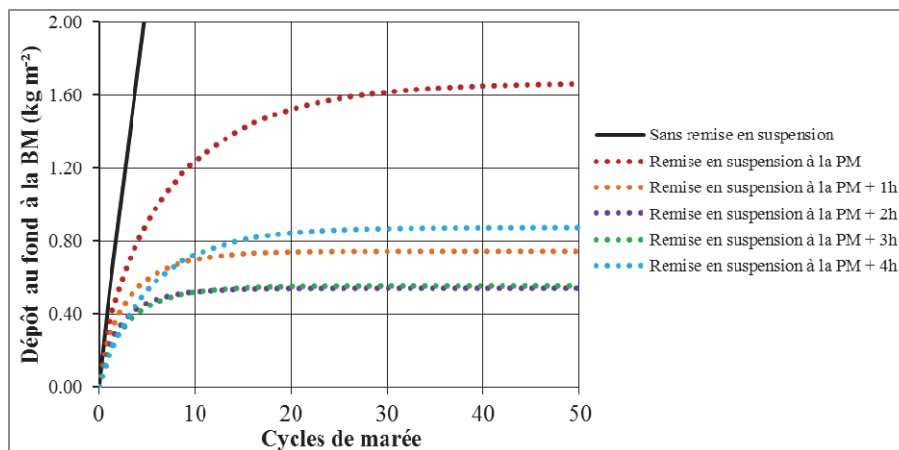


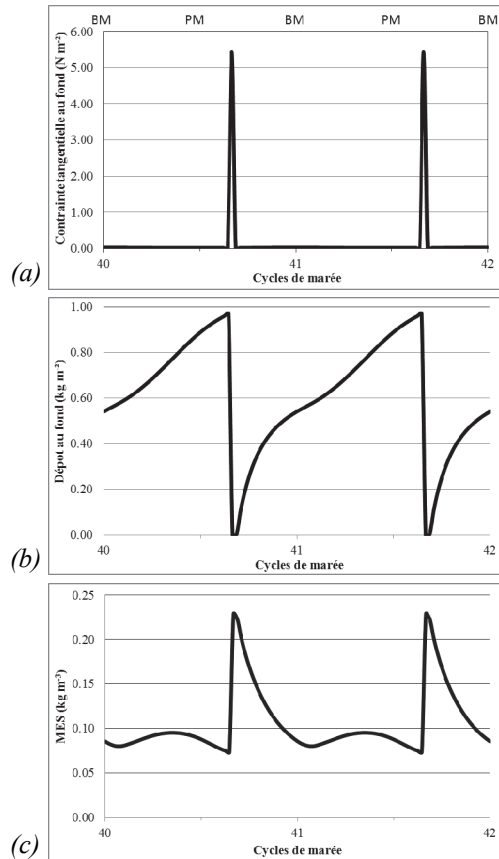
Figure 5. Résultats de la modélisation hydrosédimentaire visant la validation d'un concept de port autonettoyant, montrant le dépôt de vase calculé à la basse mer.

La figure 6 montre l'évolution de 3 paramètres au cours de deux cycles de marée selon la modélisation. Cette figure correspond à une remise en suspension effectuée 2 h après la pleine mer (PM+2h) par une action mécanique caractérisée par la contrainte tangentielle  $\tau$  de la figure 6a. L'application de cette action mécanique se traduit par une érosion complète de la vase déposée (figure 6b) et un important accroissement de la concentration en MES (figure 6c).

La plupart de ces MES se déposent à nouveau 2 heures après l'opération de remise en suspension, mais cette opération permet d'accroître suffisamment l'expulsion de

sédiments par le jusant pour parvenir à un équilibre dans le bilan sédimentaire. Ce dépôt rapide des vases s'explique par les fortes valeurs de vitesse de chute retenues.

Une autre information importante qu'on peut tirer de la figure 6b concerne la quantité de sédiments qui doivent être remis en suspension à chaque cycle de marée en moyenne. Cette quantité s'élève à  $0,96 \text{ kg m}^{-2}$  représentant un peu plus de 3 mm de vase déposée à une concentration de  $300 \text{ kg m}^{-3}$ .



(a) Contrainte tangentielle au fond - (b) Dépôt de vase - (c) Matières en suspension

Figure 6. Evolution de 3 paramètres de la modélisation hydrosédimentaire au cours de deux cycles de marée pour une remise en suspension à PM+2h.

#### 4.2 Résultats pour une remise en suspension journalière (un cycle de marée sur deux)

La figure 7 montre le dépôt moyen au fond à la basse mer en fonction du nombre de cycles de marée pour une remise en suspension opérée 2 heures après la pleine mer, un cycle de marée sur deux. On constate qu'un équilibre du bilan sédimentaire est à nouveau atteint.

Cependant, par rapport aux résultats obtenus avec une remise en suspension à chaque cycle de marée, le dépôt résiduel augmente. La quantité de sédiments qui doivent être remis en suspension à chaque opération est de  $2,45 \text{ kg m}^{-2}$ , soit un peu plus de 8 mm de vase déposée à une concentration de  $300 \text{ kg m}^{-3}$ .



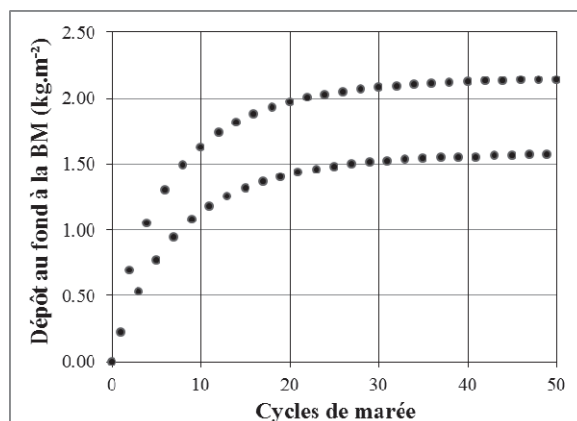


Figure 7. Dépôt de vase calculé à la basse mer (BM) pour une remise en suspension mise en œuvre un cycle de marée sur deux, 2 heures après la pleine mer (les points bas correspondent à une BM juste après une opération de remise en suspension et les points hauts à une BM juste avant cette opération).

#### 4.3 Périodicité des remises en suspension

Les résultats des figures 5 et 7 montrent qu'un port autonettoyant peut être obtenu aussi bien avec une remise en suspension opérée à chaque cycle de marée ou un cycle de marée sur deux. Ces résultats correspondent à un port soumis à une marée semi-diurne macrotidale affectée par un taux d'envasement "naturel" de  $1 \text{ m an}^{-1}$ .

En fait, la périodicité avec laquelle les sédiments doivent être remis en suspension est en relation avec le taux d'envasement "naturel" et avec le dépôt résiduel admis dans le bassin du port autonettoyant. Le tableau 1 permet de relier ces trois paramètres

Tableau 1. Ordre de grandeur de la périodicité de la remise en suspension nécessaire dans un port autonettoyant en fonction du taux d'envasement "naturel" pour deux valeurs du dépôt résiduel à remettre en suspension à chaque opération (calculs effectués avec une concentration de la vase déposée de  $300 \text{ kg m}^{-3}$  ; résultats valables pour un port à flot soumis à une marée semi-diurne macrotidale).

| Taux d'envasement "naturel"<br>dans le port abrité sans les<br>remises en suspension ( $\text{m an}^{-1}$ ) | Périodicité de la remise en suspension nécessaire (jours)            |  |
|---|--|--|
|   | Avec un dépôt résiduel à<br>remettre en suspension<br>d'environ 3 mm | Avec un dépôt résiduel à<br>remettre en suspension<br>d'environ 8 mm |
| 2,00  | non viable   | 0,5  |
| 1,00  | 0,5  | 1  |
| 0,60  | 1  | 2  |
| 0,30  | 2  | 4  |
| 0,20  | 3,5  | 7  |
| 0,10  | 7  | 14   |
| 0,05  | 15   | 30   |
| 0,03  | 30   | 60   |
| 0,02  | 45   | 90   |
| 0,01  | 90   | 180  |



## **5. Discussions**

Dans les modélisations hydrosédimentaires mises en œuvre dans cette étude, la remise en suspension est simulée d'une façon simultanée sur tout le bassin portuaire. Cependant, on peut affirmer que les résultats pour le port autonettoyant restent valables si la remise en suspension dans tout le bassin n'est pas exactement simultanée mais mise en œuvre sur une durée relativement courte (entre PM+1h30' et PM+2h30' par exemple). En effet, dans cette courte période les courants de jusant assurant l'expulsion des vases restent suffisamment constants.

La mise en œuvre d'un port BlueRing autonettoyant nécessite l'utilisation d'un dispositif pour la remise en suspension de vases déposées dont la conception fait l'objet d'une étude en cours. Parmi les solutions examinées on peut citer les suivantes :

- usage de jets d'eau rotatifs répartis sur tout le fond du bassin portuaire et alimentés par une pompe,
- emploi d'un agitateur monté sur barge mobile,
- emploi de lances jets d'eau sous pression,
- utilisation d'un robot submersible téléguidé incluant un système de succion des vases déposées avec refoulement vers le haut de la colonne d'eau grâce à une pompe embarquée.

La solution à retenir doit être celle qui a le plus faible coût énergétique et qui permet la plus grande efficacité de remise en suspension des sédiments pour les distribuer dans toute la colonne d'eau. Cette solution doit être compatible avec la gestion et le fonctionnement du port et la sécurité des usagers.

## **6. Conclusions**

Parmi différentes stratégies envisagées pour lutter contre l'envasement dans les ports BlueRing (voir section 2 de ce manuscrit), le port autonettoyant constitue une possibilité pouvant s'appliquer de façon avantageuse si l'envasement s'explique par le dépôt des vases apportées en suspension par le courant de flot. Ce concept peut s'appliquer dans des régions où les ports à flot sont affectés par un taux d'envasement allant jusqu'à environ  $2 \text{ m an}^{-1}$ .

La périodicité des remises en suspension nécessaire pour obtenir un port autonettoyant dépend principalement du taux d'envasement "naturel" et du dépôt résiduel à remettre en suspension. Dans le cas d'une marée semi-diurne macrotidale, si l'on accepte un dépôt résiduel d'environ 3 mm, la remise en suspension doit s'effectuer à chaque cycle de marée si le taux d'envasement "naturel" est de  $1 \text{ m an}^{-1}$  ou une fois par semaine si ce taux est de  $0,10 \text{ m an}^{-1}$ .

Les modélisations hydrosédimentaires présentées dans ce manuscrit concernent une marée semi-diurne macrotidale. Il faut néanmoins signaler que le concept de port autonettoyant reste valable quelle que soit le régime de la marée.

## *Thème 2 – Dynamique sédimentaire*

Le concept de port autonettoyant peut tirer profit des différentes spécificités des aménagements BlueRing :

- la présence d'un radier rigide en béton peut aider à l'optimisation de la mise en œuvre pratique des remises en suspension,
- la gestion de la porte d'accès équipant les ports BlueRing peut permettre de réduire les apports de vase et par conséquent la fréquence des remises en suspension nécessaires.

Le port autonettoyant offre aux aménagements BlueRing une solution intégrale pour la maîtrise du problème d'envasement, et ce, sans impact environnemental défavorable en raison du court séjour des vases dans le port (de quelques heures à quelques jours) et des faibles épaisseurs des dépôts résiduels remis en suspension (de quelques millimètres).

### **Remerciements :**

Les auteurs remercient le Pôle Génie Civil Ecoconstruction qui a labellisé le projet collaboratif MAREVA dans lequel cette étude s'inscrit, ainsi que les financeurs à travers le Fonds Unique Interministériel, la Région Pays de la Loire, et le Conseil Général de l'Ain.

### **7. Références**

BLUERING (site web). <http://www.bluering.fr/>

BENAMOUR M. (2011). *Validation d'un système d'auto-devasement dans un port de plaisance par une modélisation hydrosédimentaire 2D*. Mémoire de Master Ingénierie et Géosciences du Littoral, Université de Caen Basse-Normandie, 37 p.

DHI (2007). *MIKE 21 & MIKE 3 flow model FM*. Hørsholm, Denmark, 14 p.

SANCHEZ M., ABESSOLO C., GRIMONT D., COMY D., RENAUD T., ALESSANDRINI B., DROUET A., CLAVERIE G. (2010). *Ingénierie hydrosédimentaire appliquée à la validation d'un concept innovant de port de plaisance*. Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Les Sables d'Olonne, pp 937-944. doi:10.5150/jngcgc.2010.102-S

SANCHEZ M., BENAMOUR M., ABESSOLO C., CLAVERIE G., RENAUD T., GRIMONT D. (2011). *Modélisation hydrosédimentaire appliquée à la validation d'un concept innovant de port de plaisance*. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Edition 2, Tanger, Maroc, pp 87-92. doi: 10.5150/cmcm.2011.019