



Analyse et modélisation d'un système de dragage de vase par jet hydraulique et injection de bulles d'air.

David LAJOIE¹

1. Ingénieur Conseil, SAS HydroGC, 06 32 36 56 92, 06530 Le Tignet, France.
david.lajoie@hydrogc.fr

Résumé :

L'AIRSET est un système de dragage de vase par injection d'eau, couplé à des lâchers de bulles d'air. L'injection d'eau permet de déconsolider les vases au fond, tandis que les bulles d'air montantes favorisent la dispersion des sédiments sur la colonne d'eau. Le système profite des courants naturels descendants pour déplacer les vases soulevées à plusieurs km de la zone de dragage. Le système AIRSET est adapté aux besoins du Grand Port Maritime de Guyane. Un projet innovant de transposition de ce système vers un remorqueur a été engagé par le GPMG. Il s'agit de construire un navire à double activité de remorquage et de dragage. Dans ce contexte, un programme de recherche a été mené pour comprendre le fonctionnement couplant trois phénomènes physiques complexes : l'injection d'eau, le mélange avec les vases, la montée sous l'action de bulles d'air. Une approche numérique simplifiée, associée à quelques calculs analytiques, a permis de dégager plusieurs pistes de compréhension des phénomènes. Celles-ci ont été approfondies à l'occasion d'une campagne d'essais sur modèle réduit physique au canal de l'Ecole Centrale de Marseille.

Mots-clés : Dragage, Vase, Injection d'eau, Bulles d'air.

Abstract:

AIRSET is a silt dredging system based on water and air injection. Water injection allows deconsolidation of silt at bottom, while rising air bubbles spread sediment along the water column. Natural descending currents are used to displace silt several km downstream. AIRSET system complies with Guyane Harbor needs. An innovative project has been launched to transpose the system to a vessel with double activities: tugging and dredging. A research program has been carried out to understand the system based on three coupled phenomena: water injection, mixing with silt, rising with air bubbles. A simplified numerical approach, completed with analytical calculations, helped to understand coupled phenomena, before validation and improvement with a scale physical model in the Ecole Centrale of Marseille.

Keywords:

Dredging, Silt, Water injection, Air bubbles.

1. Introduction

La barge de dragage AIRSET (voir figure 1) est opérationnelle depuis plusieurs années à l'embouchure du fleuve Mahury en Guyane. Le principe de dragage est celui de la remise en suspension des vases, en profitant des courants marins pour éloigner les vases suspendues du chenal de navigation. La vase n'est jamais récupérée ou stockée provisoirement.

Le système AIRSET a été conçu pour s'adapter au besoin local du Grand Port Maritime de Guyane. Il exploite d'abord le principe connu des courants de densité générés par injection d'eau au niveau des vases au fond (GEODE, 2012). Ces courants suivent les pentes descendantes, créant un panache de fond dont les particules se redéposent au fur et à mesure. L'originalité du système AIRSET réside dans l'injection de bulles d'air en concomitance avec l'injection d'eau. Les vases soulevées par injection d'eau sont un peu plus tirées vers le haut grâce à la remontée des bulles d'air. Il en résulte une distribution de sédiments fins, répartis sur toute la colonne d'eau, ce qui retarde la retombée au fond.

Le GPMG a par ailleurs d'autres besoins, notamment en termes de remorquage pour escorter les navires de commerce. Ces opérations n'occupent toutefois pas les navires à temps complet, si bien qu'une combinaison entre les deux fonctionnalités de remorquage et de dragage permettrait d'exploiter au mieux le potentiel des navires remorqueurs. Une réflexion a été engagée sur les possibilités d'intégrer sur un remorqueur les fonctionnalités de dragage des vases par jets hydrauliques couplés à de l'injection de bulles d'air.

Le système AIRSET a été mis au point essentiellement sur la connaissance pratique et le retour d'expérience de terrain d'une société de dragage astucieuse, DE BOER (Pays-Bas), sans références scientifiques. Dans ce contexte, des travaux de recherche ont été menés pour traduire théoriquement ce qui a été fait par retour d'expérience "in situ", puis pour identifier comment chacun des processus physiques mis en jeu dans le procédé de dragage, pourrait être transposé vers un autre navire.

Les travaux ont consisté à modéliser théoriquement, numériquement, puis expérimentalement (canal de l'Ecole Centrale de Marseille) l'interaction complexe entre l'eau, la vase et l'air, de manière à comprendre et quantifier les différents processus physiques. Il s'agissait ensuite d'orienter les paramètres de réglages possibles pour transposer le système AIRSET existant vers un autre navire, dont les caractéristiques physiques, comme la taille et la vitesse d'avance, sont différentes.



Figure 1. Système de drague AIRSET par injection d'eau (gros tube percé vers le bas) et d'air (petit tube accolé au gros tube).

2. Approches théorique et numérique préliminaires

2.1 Modélisation numérique 2D

Le logiciel CFD OpenFOAM a été exploité dans une version bidimensionnelle verticale. L'objectif des simulations n'était pas de reproduire ou quantifier précisément la réalité physique tridimensionnelle à l'échelle que chaque jet. Il s'agissait surtout de cerner les phénomènes physiques prépondérants sans s'interdire de nombreuses sensibilités. L'approche numérique a été exploitée pour orienter à bon escient les pistes les plus intéressantes à approfondir, avant quantification et validation en modèle réduit physique. La démarche de modélisation a été la suivante :

- a) Distinction des deux milieux fluides (eau et vase) qui seront amenés à se mélanger. L'eau est modélisée avec ses propriétés classiques. La vase est considérée comme un fluide lourd newtonien. On lui impose la densité $\rho_{vase} = 1270 \text{ g/l}$, soit une concentration en sédiment de 400 à 450 g/l, formant une vase épaisse, mais peu consolidée, sur laquelle l'AIRSET ajuste son niveau de jet. La viscosité cinématique pour cette concentration au Mahury est d'environ $\nu = 6.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (MIGNIOT, 1989a & 1989b).
- b) Introduction de l'effet de jet à l'aide de sources dont on ajuste le débit et l'orientation en fonction du temps. Des développements spécifiques ont été menés pour simuler la notion de vitesse d'avance.
- c) Simulation des effets de turbulence du jet pénétrant dans la vase. Le modèle classique de fermeture à deux équations $k - \epsilon$ a permis d'évaluer le paramètre de viscosité turbulente ν_t , qui s'ajoute à la viscosité moléculaire ν des deux fluides mélangés ou non.
- d) Fabrication d'un modèle grossier, puis fin à l'échelle de l'écoulement en champ proche. Les tests nous ont amenés à retenir une zone de 10m de long par 10m de haut, englobant une couche de 3m de vase surmontée de 7m d'eau.

Thème 6 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

2.2 Injection d'eau vers les vases

Des tests de sensibilité systématiques ont été menés faisant varier le débit injecté, la vitesse de jets en sortie, la vitesse d'avance de la drague. Le résultat analysé (voir exemple sur la figure 2), identique pour tous les cas, était la quantité de vase remontée au-dessus de la cote initiale du fond, considérant que c'est potentiellement cette quantité que l'on pourra projeter par la suite dans la colonne d'eau grâce à l'injection d'air.

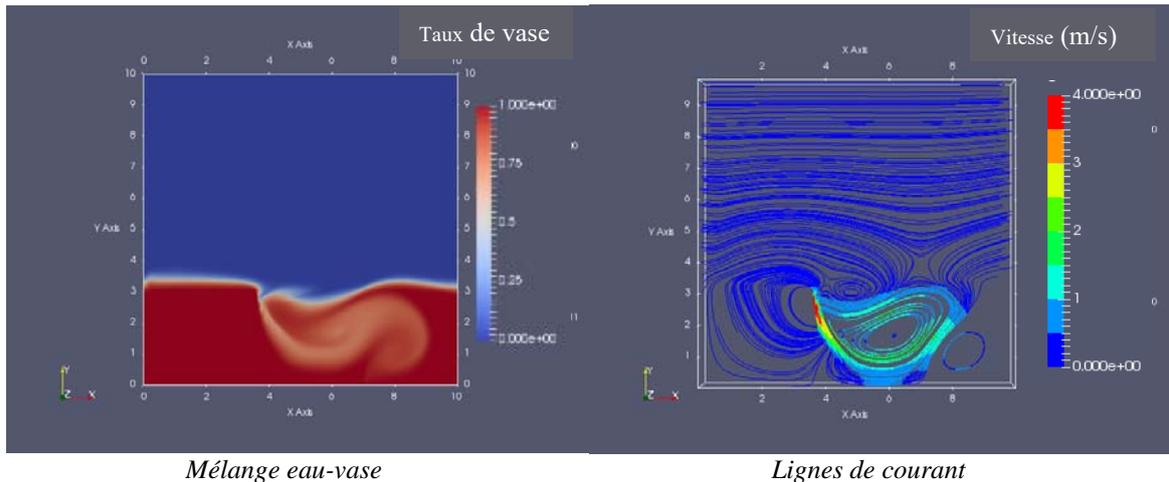


Figure 2. Exemple de simulation de pénétration d'un jet hydraulique dans la vase.

Le balayage des simulations permet de conclure sur la proportionnalité entre les vases soulevées et les débits d'eau, d'abord celui directement injecté, auquel on ajoute celui entraîné par le jet. Des vitesses d'éjection importantes, effectivement de l'ordre de 15 à 20m/s sur l'AIRSET, sont nécessaires pour augmenter le taux de pénétration des eaux environnantes dans l'eau. On retrouve ce principe de proportionnalité entre les débits d'eau et les quantités de vases soulevées en termes de vitesse d'avance de la drague. L'augmentation de la vitesse d'avance de la drague doit être accompagnée d'une augmentation du débit d'eau dans les mêmes proportions si on souhaite conserver la même efficacité. On retiendra que l'ordre de grandeur du volume de vase soulevé est proportionnel au débit d'eau cumulé injecté et entraîné. La réalité physique n'est toutefois pas aussi simple, étant modifiée par des phénomènes non linéaires d'interface entre la vase et l'eau. D'après l'approche numérique, cette proportionnalité serait respectée pour des vitesses d'avance comprises entre 1 et 2 nœuds.

2.3 Injection de bulles d'air

Un calcul analytique de comportement des bulles d'air a été développé, de manière à dégager les paramètres pour lesquels il serait intéressant de se focaliser, en vue d'optimiser le fonctionnement du système AIRSET. Une bulle d'air est entraînée vers la surface sous l'effet de la poussée d'Archimède. Elle induit un effort sur le fluide

environnant, lequel amorce un écoulement de bas en haut. L'écoulement eau+air se stabilise avec une vitesse d'équilibre, les bulles d'air montant toujours plus rapidement que le fluide environnant. L'écoulement final rassemblant une multitude de bulles peut être assimilé à un courant ascendant de densité.

Le développement théorique aboutit à une évaluation des efforts de poussée, mais aussi à des estimations de comportement global de l'écoulement en moyenne sur la colonne d'eau. On introduit la notion d'effort moyen sur la colonne d'eau de manière à extraire les ordres de grandeur analytiques des sources de quantité de mouvement. Il vient ainsi l'expression simplifiée :

$$S_{\bar{U}} = \frac{\rho g Q_{air0}}{\bar{U}_y + v_{r0}} \alpha h_f \quad (1)$$

Q_{air0} : débit volumique d'air injecté à la pression atmosphérique par mètre de largeur

$S_{\bar{U}}$: effort induit par l'air sur le milieu ambiant par mètre de largeur (ou source de quantité de mouvement)

ρ : densité du liquide ambiant

$$g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

\bar{U}_y : vitesse moyenne montante du milieu ambiant

v_{r0} : vitesse relative des bulles montantes par rapport au milieu ambiant

h_f : profondeur de lâcher des bulles

α est un coefficient compris entre 0 et 1 traduisant l'effet global de variation de volumes des bulles montantes depuis le fond à la pression $P_f = \rho g (h_{atm} + h_f)$ jusqu'à surface, à la pression atmosphérique $P_0 = \rho g h_{atm}$.

La source de quantité de mouvement sur la colonne d'eau $S_{\bar{U}}$ induit un courant ascendant dans milieu ambiant (voir figure 3). L'équilibre moyen des quantités de mouvement aboutit à l'expression :

$$S_{\bar{U}} = \frac{\rho g Q_{air0}}{\bar{U}_y + v_{r0}} \alpha h_f = \rho \bar{U}_y^2 (1 - \tau) \Delta x \quad (2)$$

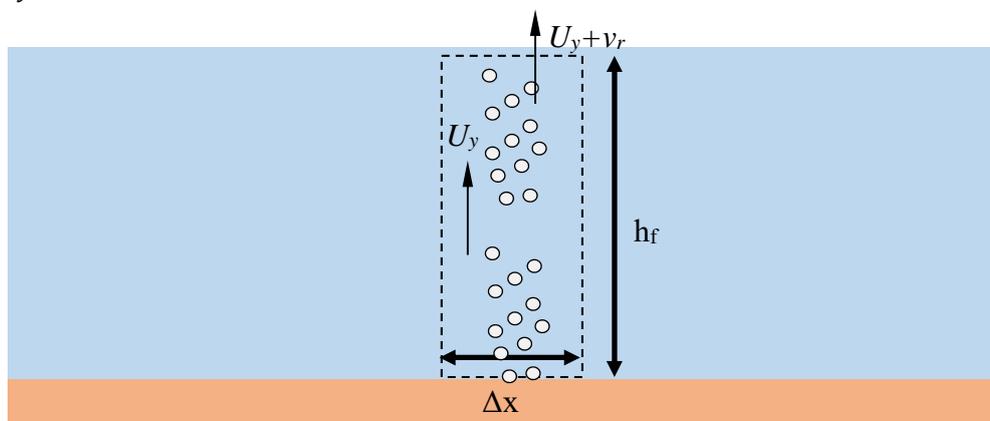


Figure 3. Montée de bulles d'air sur une colonne de largeur moyenne Δx .

Thème 6 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

Δx est la largeur caractéristique de la colonne de bulle d'air. τ s'apparente à un taux de porosité, traduisant le pourcentage de bulles d'air dans la colonne d'eau. Le système d'équations, ayant pour principale inconnue la vitesse moyenne \overline{U}_y de remontée du milieu ambiant, est résolu numériquement par itérations successives. Un exemple d'application numérique conduit aux résultats suivants (tableau 1) :

Tableau 1. Quelques valeurs associées à la remontée de bulles d'air.

Diamètre à la pression atmosphérique	Vitesse relative de remontée des bulles	Largeur moyenne de la colonne de bulles	Effort global induit par les bulles sur le fluide ambiant	Vitesse moyenne du fluide entraîné vers le haut	Débit du fluide entraîné vers le haut
D_0	v_{r0}	Δx	$S_{\bar{u}}$	\overline{U}_y	Q_{eau}
1cm	0.51m/s	60 cm	1759 N	1.72 m/s	0.99 m ³ /s/ml
		100 cm	2033 N	1.43 m/s	1.39 m ³ /s/ml
10cm	1.62m/s	60 cm	1290 N	1.47 m/s	0.85 m ³ /s/ml
		100 cm	1421 N	1.19 m/s	1.16 m ³ /s/ml

Des petites bulles montent moins vite que des grosses bulles, mais elles engendrent un effort global de poussée un peu plus élevé que les grosses bulles. La taille des bulles n'est cependant pas prépondérante pour les débits d'eau entraînés, contrairement au paramètre de largeur Δx , lequel revêt un caractère non négligeable dans le processus d'entraînement. Des bulles écartées entraînent des vitesses dans le milieu ambiant moins élevées que des bulles serrées, mais elles engendrent un effort de poussée et un débit global montant plus important.

L'introduction de sources de quantité de mouvement dans le modèle numérique, simulant la poussée moyenne des bulles dans la colonne d'eau sur une largeur Δx , confirme une légère amélioration attendue lorsque l'on élargit la base d'émission Δx des bulles d'air (voir figure 4).

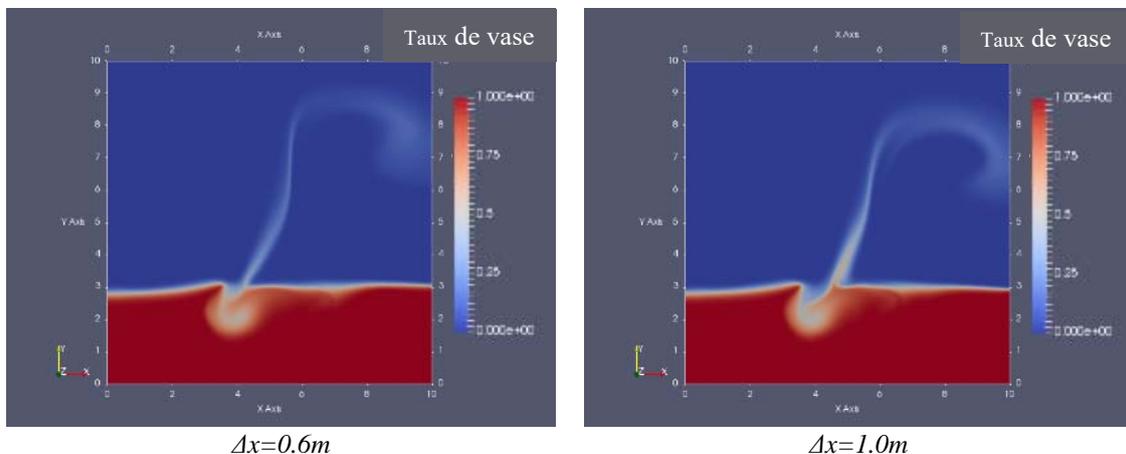


Figure 4. Simulations 2D alliant injections d'eau et d'air. Taux de vase dans l'eau.

3. Essais sur modèle réduit physique

Le canal à houle de l'École Centrale de Marseille a été exploité pour étudier la drague AIRSET à l'échelle 1/15^{ème}. Le canal a été séparé en trois compartiments d'un peu plus de 5m chacun, permettant de réaliser trois essais par jour, en attendant que la vase se redépose, laissant une eau à nouveau claire pour le lendemain. Le système d'injection d'eau et d'air a été suspendu à un chariot motorisé, roulant au-dessus des bords du canal (voir dispositif figure 5).

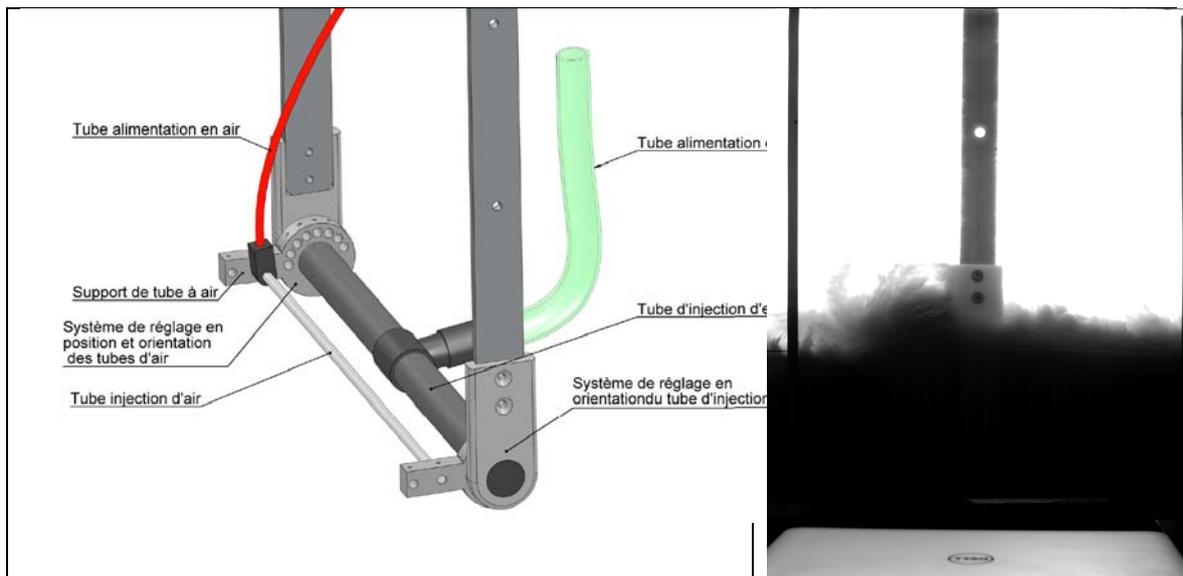


Figure 5. Dispositif reproduisant la drague par injection d'eau et d'air. Photo haute définition du dispositif avançant et soulevant la couche de vase.

Les règles de similitude entre l'échelle réelle et l'échelle 1/15^{ème} ont été les suivantes :

- Similitude classique de Froude sur les écoulements d'eau et vitesses d'avance, les écoulements à l'échelle réduite restant par ailleurs largement dans le domaine turbulent.
- Correction du débit d'air, pour tenir compte de la distorsion due à la pression atmosphérique, et respecter la taille de bulles montantes génératrices de quantité de mouvement.
- Confection de vase à l'aide d'un mélange illite + kaolinite, fournis dans le commerce pour l'usage pharmaceutique ou pour constituer les bains d'argile des centres de thalassothérapie. Le mélange 60% kaolinite + 40% illite a permis de respecter la similitude de Froude sur la viscosité cinématique. Le respect de cette similitude, qui serait essentiel pour une étude classique d'entraînement de vase par effet de cisaillement horizontal sous houle ou courant (y compris le terme seuil de mise en mouvement d'une vase de type fluide de Bingham par exemple), n'est toutefois pas primordial face aux énormes sollicitations par jets verticaux de plusieurs m/s

Thème 6 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

déstructurant complètement la vase, et engendrant des contraintes et viscosités turbulentes d'un tout autre ordre de grandeur que l'entraînement par les courants marins de fond.

Les essais ont été filmés par caméra haute définition (voir exemple figure 5), permettant une comparaison des niveaux de gris correspondant aux panaches turbides générés au passage de la drague. Des prélèvements d'échantillons, suivis de mesures des concentrations résiduelles, ainsi qu'une mesure au densimètre, de type plomb réglé à 1.27, dans la vase encore consistante au fond, ont permis d'évaluer et de comparer les efficacités entre les 42 essais effectués. Les principaux enseignements sont les suivants :

a) On confirme que les jets hydrauliques seuls conduisent à une couche de mélange déconsolidée, qui reste près du fond, avec encore une certaine consistante, laissant une limite bien marquée avec l'eau. L'eau pénétrant dans la vase entraîne un gonflement de l'ensemble de l'ordre de trois fois le volume d'eau injecté depuis la drague (voir figure 6). Cela valide la notion d'entraînement des eaux environnantes observée numériquement, avec un mélange ralenti par la dissipation du jet dans la vase.

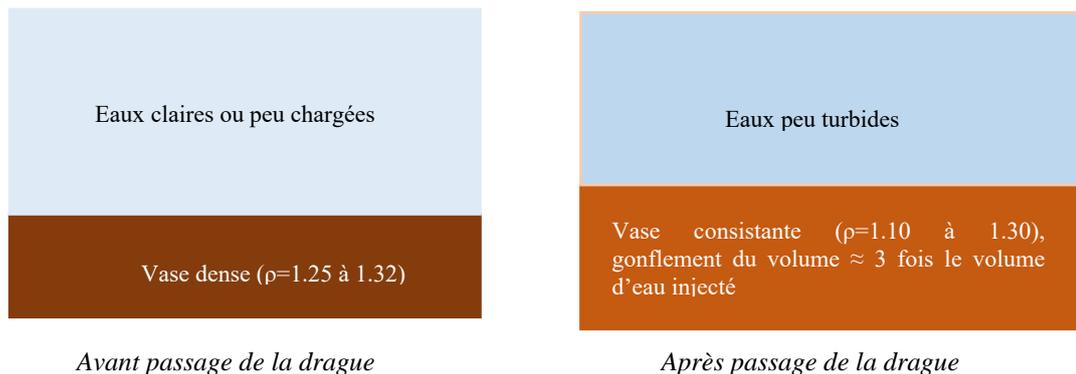


Figure 6. Marquage net des zones eau-vase avant et après passage de la drague hydraulique sans injection de bulles.

- b) Le rejet de bulles seules n'a aucune efficacité, corroborant les observations de terrain. Il doit être impérativement couplé à de l'injection d'eau.
- c) On confirme que l'efficacité du dragage est globalement proportionnelle aux volumes d'eau et d'air cumulés sur la distance parcourue par la drague pendant un temps donné. Ceci se vérifie au moins pour des vitesses d'avance avoisinant 1 à 1.5 nœuds. On compare sur la figure 7 ci-après les concentrations moyennes et rendement obtenus après passage de la drague pour une vitesse d'avance variant de 0.75 à 1.3 nœuds, les débits injectés d'eau ($Q_{\text{eau}} = 0.13 \text{ m}^3/\text{s/ml}$) et d'air ($Q_{\text{air}} = 0.14 \text{ m}^3/\text{s/ml}$) sur une largeur unitaire (1 ml) étant constants par ailleurs.

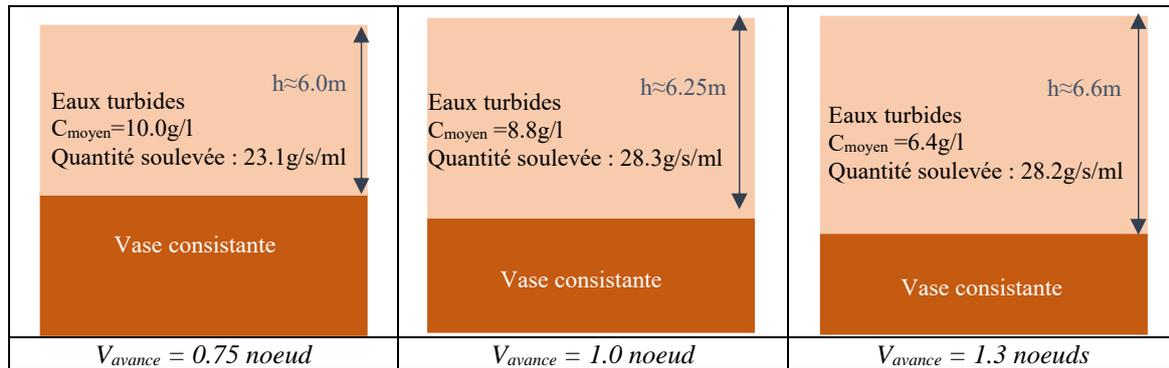


Figure 7. Résultats obtenus après passage de l’AIRSET à différentes vitesses d’avance.

Ralentir la drague de $V_{\text{avance}} = 1$ nœud à 0.75 nœud aboutit à une augmentation des concentrations de vase soulevées, mais dans une proportion modeste : $C_{\text{moyen}} = 10$ g/l contre $C_{\text{moyen}} = 8.8$ g/l, soit un facteur égal à 1.13 sur les concentrations, alors que le rapport des vitesses d’avance est de 1.33. Les essais montrent que trop ralentir ne permet pas de maintenir le rendement de base de vase soulevés dans la colonne d’eau : quantité soulevée = $8.8 \text{ g/l} \times 6.25 \text{ l/m/ml} \times 1.0 \times 0.514 \text{ m/s} = 28.3 \text{ g/s/ml}$ à 1 nœud contre $10.0 \text{ g/l} \times 6.0 \text{ l/m/ml} \times 0.75 \times 0.514 \text{ m/s} = 23.1 \text{ g/s}$ à 0.75 nœud. Il y a un effet de seuil dû à la profondeur croissante de vase consistante à devoir mobiliser ou aspirer vers le haut, au fur et à mesure que l’on ralentit l’allure de la drague.

Augmenter la vitesse d’avance aboutit logiquement à une baisse des concentrations de vase soulevées dans la colonne d’eau. La proportion mesurée entre les concentrations est de 1.37, soit 6.4 g/l au regard de 8.8 g/l. Cette valeur est à rapprocher de l’augmentation de vitesse d’un facteur 1.30 ainsi qu’à une légère augmentation de la hauteur de colonne d’eau restante au-dessus de la zone de vase consistante (6.6m contre 6.25 m, voir figure 7). Lorsque $V_{\text{avance}} = 1.3$ nœuds, on retrouve un rendement similaire à celui de l’essai de base avec une vitesse d’avance égale à 1.0 nœud : quantité soulevée = $6.4 \text{ g/l} \times 6.6 \text{ l/m/ml} \times 1.3 \times 0.514 \text{ m/s} = 28.2 \text{ g/s/ml}$ à comparer à 28.3 g/s/ml. Dans le même esprit, on montre qu’augmenter les débits d’eau et d’air dans les mêmes proportions que la vitesse d’avance, conduit à des valeurs similaires de concentrations de vase soulevées dans la colonne d’eau, et par conséquent à une amélioration du rendement, toujours dans les mêmes proportions. Selon ce principe, il est par conséquent possible de transposer le fonctionnement de l’AIRSET vers une conduite de longueur plus petite, en conservant les débits globaux d’eau et d’air à travers les conduites de longueurs différentes. Pour une conduite plus petite, pour laquelle les débits locaux d’eau et d’air par ml sont un peu supérieurs, il sera préférable d’augmenter la vitesse d’avance pour s’éloigner de l’effet de seuil identifié. La transposition vers un remorqueur, dont la vitesse d’avance est en général élevée, est dans ce sens compatible.

Thème 6 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

d) La notion d'élargissement de l'émission de bulles d'air, entrevue grâce à l'approche théorique analytique, apporte des améliorations potentielles prometteuses. On montre par les essais que pour des débits d'eau et d'air fixés, l'émission de bulles d'air sur deux tuyaux parallèles, espacés d'environ 0.5 m (largeur Δx d'émission), permet d'augmenter de 30% la concentration de vase soulevées dans la colonne d'eau, par rapport à une émission du même débit d'air, mais sur un seul tuyau. Les essais montrent toutefois que cette amélioration significative doit être associée à un débit d'air global relativement conséquent. Il importe en effet de maintenir une force de poussée locale suffisante pour que les bulles puissent s'extirper du milieu fluide vaseux. Cette notion n'était pas intégrée dans notre approche théorique simplifiée, laquelle a toutefois permis de mettre en évidence une source possible d'amélioration, ce qui aurait sans doute été plus hasardeux avec une approche uniquement numérique, même 3D très sophistiquée, alliant de très nombreux paramètres.

4. Conclusion

Face à de nombreux phénomènes à la fois complexes et couplés inhérents au dragage de vase par le système AIRSET, nous avons pris le parti de simplifier les premières approches préliminaires et de pousser au maximum les démarches analytiques permettant de dégager les pistes de compréhension d'une méthode de dragage déjà éprouvée sur le terrain. La campagne d'essais a confirmé certaines pistes, et ouvert de nombreuses autres. La notion de profil de densité résiduel après passage de la drague, notamment dans les parties consistantes au fond, est l'une des principales pistes encore à explorer.

5. Remerciements

L'auteur remercie M. Philippe Lemoine, Directeur Général du GPM de Guyane, M. Patrick Toulemont, Directeur d'Exploitation, ainsi que M. Sébastien Taviot, qui ont engagé la démarche audacieuse d'un projet innovant de conception et de construction d'un navire alliant deux activités ayant peu de points communs de prime abord. L'auteur remercie également Hugo Van de Graaf, de la société de dragage DE BOER.

6. Références bibliographiques

GEODE -Groupe d'Etudes et d'Observation sur les Dragages et l'Environnement- (2012) *Guide méthodologique sur le dragage par injection d'eau*.

[https://www.cerema.fr/fr/system/files/documents/2018/02/Guide_Dragage_Injection_d_Eau_cle0f4556\(1\).pdf](https://www.cerema.fr/fr/system/files/documents/2018/02/Guide_Dragage_Injection_d_Eau_cle0f4556(1).pdf)

MIGNIOT C. (1989a). *Tassement et rhéologie des vases. Première partie*. La Houille Blanche, N°1, pp 11-29. <https://doi.org/10.1051/lhb/1989001>

MIGNIOT C. (1989b). *Tassement et rhéologie des vases. Deuxième partie*. La Houille Blanche, N°2, Avril 1989, pp 95-112. <https://doi.org/10.1051/lhb/1989006>