

## Opération de clapage de déblais de dragage en milieu marin

**Jean Bougis**

Ingénieur Conseil, 32-34 chemin du Moulin, 06650 Opio, France

[jean.bougis@wanadoo.fr](mailto:jean.bougis@wanadoo.fr)

**Résumé :** Sauf à être valorisés, les déblais de dragages ne peuvent plus être stockés à terre et doivent être rejetés en mer, le plus souvent par clapage. Ces opérations peuvent constituer des sources de problèmes environnementaux qui doivent être maîtrisés lors du choix des sites de rejet et des séquençages des clapages. Les différentes phases du clapage sont décrites et les échelles de temps sont définies. Les modélisations environnementales qu'il convient de conduire sont présentées à la lumière d'une opération de dragage exemplaire menée par le Port Autonome de Guadeloupe (Antilles françaises) dans le cadre de l'extension de ses capacités d'accueil au nouveau gabarit du canal de Panama.

**Abstract:** Except for valorization, the dredged material can no longer be stored on land and must be discarded at sea, most often by flapping. These operations can be sources of environmental problems that must be controlled when choosing disposal sites and sequencing of flapping. The different phases of the flapping are described and the time scales are defined. The environmental modelizations to be conducted are presented in the light of an exemplary dredging operation conducted by the Port Authority of Guadeloupe (French Antilles) as part of the extension of its capacity to accommodate the new template from Panama Canal.

**Mots clés :** Dragage, clapage, sédiments, modélisation numérique, Impact environnemental.

**Key words:** Dredging, flapping, sediments, numerical modeling, environmental impact.

### 1 Motivation

Le dragage des fonds marins conduit à remplir des chalands ou des puits de dragues, tractés ou autopropulsés, d'un mélange de sédiments généralement composé de sables et de vases lorsqu'il s'agit d'un entretien et parfois composé de roches, de sables, de vases et de matériaux divers comme de l'argile ou de la tourbe lorsqu'il s'agit du déroctage d'un nouveau poste d'amarrage, de l'élargissement ou de l'approfondissement d'un chenal d'accès. Ces sédiments sont naturellement plus ou moins chargés en eau de mer.

Depuis le milieu des années 1990, il n'est plus guère possible de stocker à terre ces déblais de dragage et, à défaut d'une valorisation, la solution réside essentiellement dans leur rejet en mer par clapage. Toutefois, le rejet en mer des sédiments constitue une source de problèmes environnementaux pour essentiellement trois raisons :

- le transfert en mer des polluants présents dans les déblais de dragage des ports (métaux lourds, hydrocarbures, produits chimiques, etc.) ;
- l'anoxie du milieu de rejet sur des superficies parfois importantes (espèces ensevelies ou asphyxiées, etc.)

- la forte augmentation de la turbidité, plus ou moins persistante, qui entrave la photosynthèse, etc.

La détermination de sites d'immersion des déblais de dragage et la mise en place d'une stratégie des séquençages des clapages, nécessaire pour limiter et maîtriser ces risques de pollutions, ne peuvent se faire qu'en concertation avec les services de l'Etat en charge de la protection de l'environnement et doivent conduire à la définition d'un programme d'études et de modélisations pour le dragage et le rejet en mer qui s'inscrit dans l'élaboration des études d'impact réglementaires.

Dans tous les cas, les sites d'immersion doivent être choisis pour qu'il n'y ait pas de retour significatif à la côte et que des zones à forts enjeux écologiques ne risquent pas d'être atteintes.

## **2 Action de clapage**

Le clapage désigne l'opération de rejet gravitaire des déblais à la mer par un chaland muni d'un dispositif d'ouverture du fond de son puits à déblais (chaland à clapets ou chaland fendable – voir figure 1). Ces chalands ont des capacités de l'ordre de 500 m<sup>3</sup> à 2500 m<sup>3</sup>. Lors du clapage, le puits s'ouvre et les déblais de dragage tombent à la mer par une ouverture rectangulaire dont les dimensions caractéristiques sont de 3.5 à 5.0 mètres de large et de 15 à 50 mètres de long.



**Figure 1** : a) Chaland à clapets « Mahury » 1000 m<sup>3</sup> – b) Chaland fendable le « Combattant » 500 m<sup>3</sup>.

## **3 Phases du clapage**

Les différentes phases du clapage de déblais ont été décrites en détail par différents auteurs, dont Truitt [8] et Boutin [4] (voir figure 2) ; ce qui met en évidence le consensus qui existe à ce sujet.

- 1) Phase d'immersion : le clapage commence par une phase d'immersion en surface des déblais de masse volumique supérieure à celle de l'eau.
- 2) Phase de descente en masse : l'instabilité gravitationnelle crée un mouvement advectif dans lequel les déblais les plus denses descendent rapidement vers le fond. Pendant cette descente, les courants marins entraînent le nuage en le déformant et en modifiant sa vitesse horizontale.
- 3) Phase de diffusion passive : pendant la descente en masse, une fraction des déblais quitte le nuage pour se retrouver en suspension dans le milieu ambiant, ballottée au gré des courants. Son évolution dépend alors d'une phase de diffusion passive.
- 4) Phase d'effondrement : en faible profondeur, le gros des déblais s'écrase sur le fond dans une phase d'effondrement dynamique en créant un nuage turbide dont l'évolution dépend d'une phase de diffusion passive.

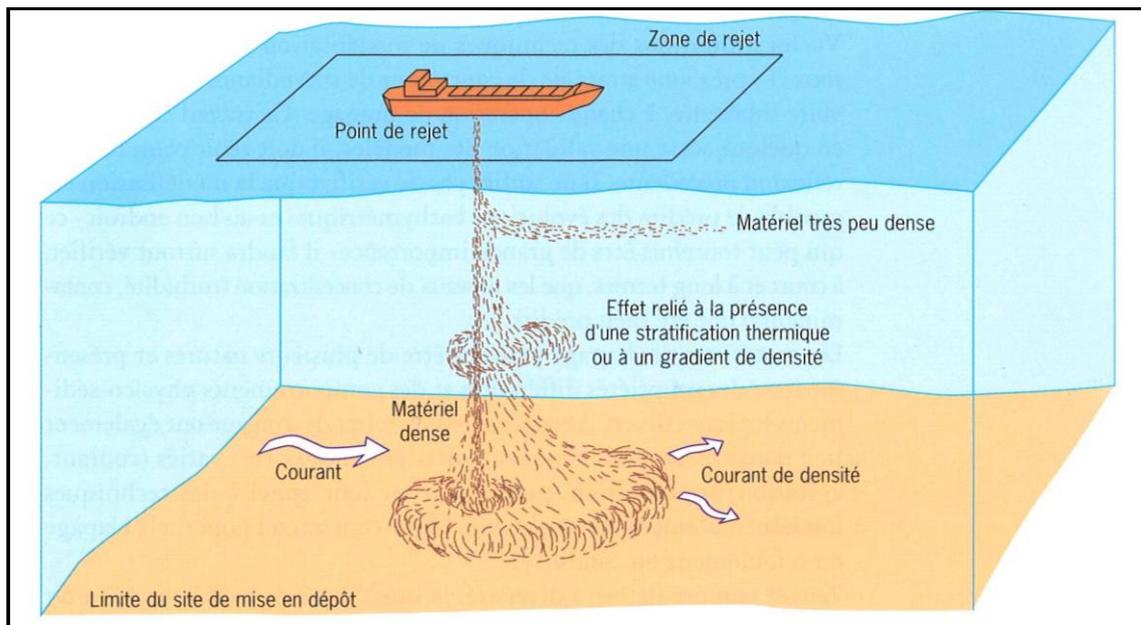


Figure 2 : Schéma de principe de l'évolution des matériaux clapés (IFREMER [1])

### 3.1 Phase d'immersion

La phase de mise à l'eau permet de définir les conditions initiales. Le navire avance à une vitesse de l'ordre du mètre par seconde, voire un peu plus. A l'ouverture du fond des puits à déblais, le clapage commence par une phase d'immersion en surface des déblais, sous les effets de l'instabilité gravitationnelle qui résulte :

- de la masse volumique des déblais, supérieure à celle de l'eau de mer,
- de l'altitude de la surface libre des déblais, supérieure à celle de la surface libre de l'eau de mer.

Cette phase correspond à l'injection dans l'eau de mer d'un débit massique de déblais qui s'accompagne d'un débit de quantité de mouvement. Pour un débit de masse donné, c'est-à-dire pour une masse et un temps de vidange donnés, le débit de quantité de mouvement dépend de la vitesse d'injection et donc de la section des clapets.

Comme dans les jets noyés, ce débit de quantité de mouvement joue un rôle important dans la génération de la turbulence à la limite entre les déblais et le milieu ambiant, et donc dans la propension des deux milieux à se mélanger.

Le temps nécessaire à la mise à l'eau des sédiments joue également un rôle important dans la mesure où il conditionne l'étirement vertical initial du nuage de donc l'étendue de la surface périphérique initiale du nuage, laquelle est en contact avec le fluide ambiant au repos.

Un consensus existe sur l'importance de cette phase d'immersion pour le devenir à court terme des sédiments ; en particulier au sujet de l'importance de la vitesse initiale [4].

### 3.2 Phase de descente en masse

Une fois l'immersion terminée, l'écart de masse volumique entre le rejet et l'eau de mer entretient le mouvement advectif dans lequel les déblais descendent vers le fond avec

une vitesse d'ensemble supérieure à celle qu'auraient les grains de sédiments dissociés. La descente est alors gouvernée par un comportement de type courant de densité et non par un comportement de type chute de particules individuelles. La vitesse moyenne de chute peut atteindre des valeurs de plusieurs dizaines de centimètres par seconde (0.4 m/s pour des vases [7]) à plusieurs mètres par seconde (2.8 m/s pour des matériaux denses [4]) ; soit plusieurs milliers de fois les vitesses de chute des grains individuels<sup>1</sup>.

Le champ de vitesse s'épanouit sous l'effet du cisaillement entre deux domaines animés de mouvements distincts : les déblais qui descendent à grande vitesse et le fluide ambiant, éventuellement stratifié, en translation horizontale sous l'effet du courant. Ce cisaillement entraîne le fluide à la périphérie du nuage. Au début, la section comprend trois zones :

- la partie centrale des déblais qui descend sans se mélanger au fluide ambiant. Chaque constituant garde sa concentration initiale ;
- à la périphérie, le fluide ambiant n'est quasiment pas perturbé. Il ne se mélange pas avec les déblais ;
- entre ces deux zones, le cisaillement crée une forte turbulence qui aspire le fluide ambiant et dilue les déblais, au prix d'un ralentissement relatif dû à la conservation de la quantité de mouvement.

A la frontière du noyau central, la pression est celle du milieu ambiant. Elle est plus grande à l'intérieur et plus petite à l'extérieur. La zone intermédiaire croît donc vers l'extérieur mais aussi vers le centre. Ainsi, avec le temps et la distance parcourue, la section du noyau central diminue (partie primaire de la phase), puis disparaît à une certaine distance de la surface libre (partie secondaire de la phase).

La frontière entre le milieu ambiant et le nuage n'est pas caractérisée de manière intrinsèque. En raisonnant sur les vitesses moyennes, il est possible de la définir à partir des lignes de courant issues des bords du puits, mais avec les mêmes difficultés que pour la définition de l'épaisseur d'une couche limite. La frontière est donc généralement fixée au lieu où la vitesse est égale à 1% de la vitesse sur l'axe du nuage.

Pendant la phase de descente, les courants marins entraînent le nuage en le déformant et en modifiant sa vitesse horizontale. Les efforts gravitaires sont suffisamment prépondérants et la vitesse verticale suffisamment importante pour que l'essentiel des matériaux solides atteigne rapidement le fond, en quelques dizaines de secondes dans des fonds de vingt à trente mètres. Toutefois, une partie des déblais est dispersée dans le milieu ambiant. Collins [6] l'a estimé entre 1% et 5% de l'ensemble.

La phase de descente en masse se termine :

- par une phase d'effondrement si la concentration en déblais reste suffisante à l'approche du fond (déblais massifs, denses ou cohésifs, faible profondeur, etc.) (voir figure 3) ;
- par une phase de diffusion passive si, avant d'atteindre le fond, la concentration en déblais est devenue trop faible pour que la descente en masse continue (déblais fins, peu denses et peu cohésifs, très grande profondeur, lame d'eau stratifiée, etc.) (voir figure 4).

<sup>1</sup> La vitesse de chute de flocons de vase en eau calme est de l'ordre de 0.2 à 0.5 mm/s.

### 3.3 Phase d'effondrement

En arrivant sur le fond, le panache turbide s'écrase dans une phase d'effondrement dynamique, en créant des remous susceptibles de remettre en suspension des matériaux solides de surface dont la masse est au plus de l'ordre de 15 à 25% de la masse clapée selon les caractéristiques de la couverture sédimentaire. Elle se redépose ensuite sur le fond après avoir été déplacée par les courants marins et par la houle.

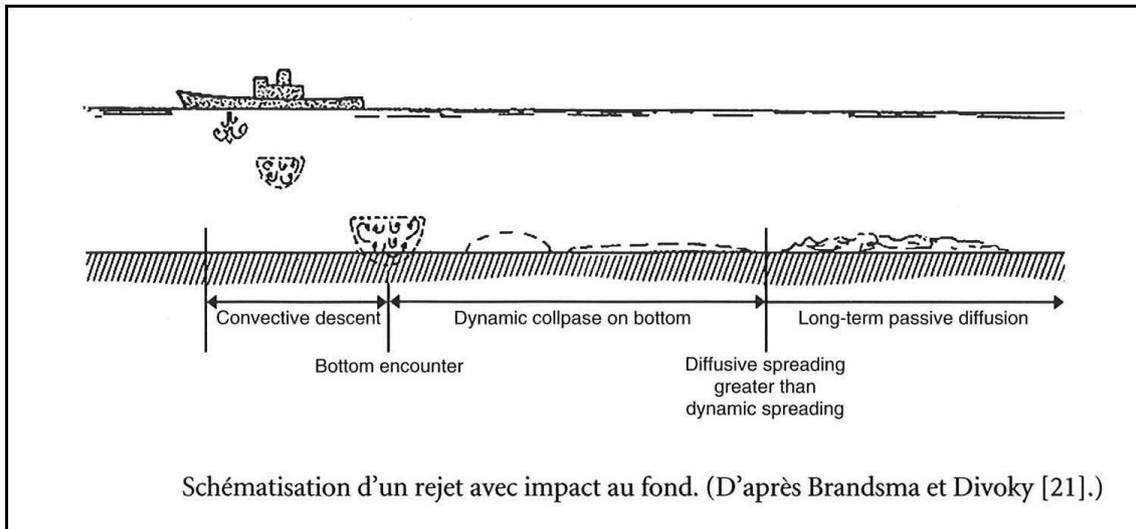


Figure 3 : Phase de descente se terminant en effondrement au fond [5].

Pendant cette phase, le nuage se déforme en se mélangeant partiellement au milieu ambiant. Son volume n'est donc pas constant et sa masse volumique moyenne diminue dans le temps. Le débit du fluide entrant dans le nuage dépend de l'énergie cinétique du nuage, de sa surface horizontale, de sa masse volumique moyenne et de sa hauteur.

Cette phase d'effondrement dynamique engendre un courant de gravité sur le fond. Cet écoulement rampant est freiné par le frottement du nuage sur le fond, par le cisaillement du dessus du nuage dans le fluide ambiant (qui participe à l'incorporation du fluide dans le nuage) et par le fluide présent sur le périmètre du nuage et qui doit céder sa place. Le travail des forces de ces différentes origines consomme de l'énergie et l'expansion du nuage se ralentit.

La phase d'effondrement dynamique est considérée comme terminée lorsque l'énergie cinétique du nuage est passée sous un seuil donné. L'évolution ultérieure du nuage dépend à nouveau d'une phase de diffusion passive.

### 3.4 Phase de diffusion passive

Pendant la descente en masse, une fraction des déblais (pouvant correspondre à la quasi totalité si les sédiments sont suffisamment fins et la profondeur suffisamment grande) quitte le nuage pour se retrouver en suspension dans le milieu ambiant, ballottée au gré du courant. C'est également le cas des sédiments situés dans le nuage à la fin de la phase d'effondrement sur le sol.

Leur évolution dépend alors d'une phase de diffusion passive gouvernée par la diffusion turbulente dans le champ de vitesse du courant. Les sédiments sont suffisamment dilués

pour qu'ils se conduisent comme des escaliers passifs (à leur chute près). Leur présence ne modifie donc plus l'écoulement qui est celui du courant. Si la contrainte de frottement engendrée par le mouvement de l'eau sur le fond (courant et houle) est inférieure au seuil de mise en mouvement, les matériaux se déposent sur le fond, avec une vitesse entravée ou non en fonction de leur concentration. Sinon, ils sont déplacés par charriage et saltation, voire par remise en suspension.

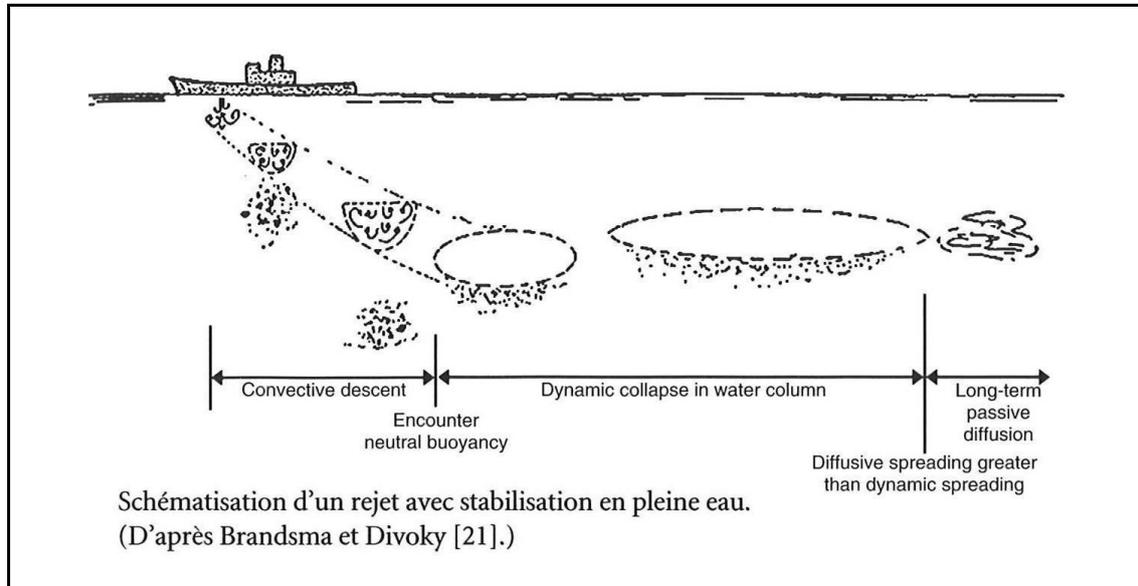


Figure 4 : Phase de descente se terminant en diffusion passive dans un milieu stratifié [5].

### 3.5 Conclusion

La durée et l'importance de chaque phase et la concentration des matériaux dans la colonne d'eau dépendent de nombreux paramètres, comme les conditions hydrodynamiques au lieu de clapage et la profondeur, mais aussi des conditions initiales : masse clapée, durée du clapage et vitesse d'injection des sédiments dans la mer.

## 4 Echelles de temps

Lors du clapage, les déblais tombent dans l'eau en quelques dizaines de secondes. Leur évolution dépend ensuite de nombreux paramètres, les uns liés aux conditions de clapage et les autres aux conditions météorologiques et climatiques du site. Elle possède donc deux échelles de temps caractéristiques très différentes. L'analyse et la modélisation de ces deux échelles de temps sont complémentaires, mais dans une large mesure indépendantes. Elles ne répondent pas aux mêmes préoccupations.

### 4.1 Echelle de temps court terme

L'échelle de temps court terme caractérise la durée pendant laquelle le devenir des sédiments dépend des conditions techniques et environnementales du clapage. Elle est liée au temps nécessaire pour que l'essentiel des sédiments atterrissent sur le sol marin et soient ainsi neutralisés, sauf à être remaniés.

L'objectif de la modélisation à court terme est de suivre la trajectoire des déblais pour prédéterminer les zones des fonds qui seront affectées en fonction du lieu, des conditions techniques du clapage (volume et caractéristiques des sédiments, vitesse de mise à

l'eau, etc.) ainsi que des conditions environnementales (marée, vent, courant, houle, etc.) pendant la période qui suit le clapage jusqu'à l'atterrissage des derniers sédiments sur le fond.

L'analyse et la modélisation de cette phase sont fondamentales pour le choix des sites de rejets, pour le choix des moyens et des méthodes de clapage et pour la définition des séquençages des rejets en fonction des conditions océano-météorologiques.

#### **4.2 Echelle de temps long terme**

L'échelle de temps long terme caractérise l'action du milieu ambiant sur l'évolution de la nappe sédimentaire accumulée au fond, lorsque les influences de la méthode et des conditions techniques et environnementales du rejet ont disparues.

L'objectif de la modélisation à long terme est de suivre l'évolution des résidus de dragage accumulés au fur et à mesure des rejets successifs (de diverses origines et/ou par différents moyens) sur le site et remaniés en permanence par les éléments marins (marée, vent, courant, houle, etc.) dont les données statistiques sont connues.

### **5 Retour à la côte**

Du point de vue environnemental, une grande attention doit être portée aux situations de retour à la côte qui correspondent au retour des sédiments clapés vers la côte, les petits fonds ou des zones à forts enjeux écologiques. De tels retours sont liés à un temps caractéristique plus ou moins bref :

- le retour direct : les sédiments sont directement ramenés à la côte par les actions combinées du vent, du courant et de la houle ;
- le retour indirect : après s'être éloignés de la côte, les sédiments y sont ramenés par les actions combinées du vent, du courant et de la houle qui ont éventuellement changé de direction ;
- le retour différé : après s'être éloignés de la côte et avoir circulé pendant un certain temps au gré des courants de marées, les sédiments finissent par être ramenés sur la côte.

Ces situations de retour à la côte peuvent s'accompagner d'une augmentation de la concentration des sédiments en suspension au cours de clapages successifs. Les risques de retour à la côte, à court terme, prennent fin lorsque les sédiments sont posés sur le fond.

Dans ces conditions, pour être significatives, les modélisations doivent être effectuées sur des durées suffisamment longues en termes de nombre de cycles de marées.

### **6 Effets cumulatifs et stratégie de séquençage**

Le temps nécessaire pour que le nuage turbide se dépose en totalité au fond de la mer peut être relativement long devant le temps de rotation des clapages. C'est en particulier le cas des clapages fréquents en grande profondeur (quelques centaines de mètres). Il en résulte que les clapages successifs se font dans une eau de moins en moins claire et qu'un phénomène cumulatif prend naissance.

Il peut alors être judicieux de disposer de plusieurs points de rejets et de changer de point de rejet à chaque clapage de sorte de ne revenir sur un point de clapage donné

qu'après un temps suffisamment long pour que l'effet cumulatif soit devenu négligeable.

L'ordre des clapages sur les différents points de rejet peut alors être optimisé en fonction des conditions océano-météorologiques : direction et intensité des courants de marée, du vent et de l'agitation, existence d'une pycnocline (thermocline ou halocline).

## **7 Modélisation numérique du clapage**

### **7.1 Analyse dimensionnelle**

Pendant les premières phases, les seules longueurs caractéristiques du problème sont la longueur et la largeur du puits à déblais. Aux distances, grandes devant ces longueurs, la forme concrète de l'orifice ne peut influencer la forme du rejet, l'écoulement ne possède donc pas de paramètre caractéristique ayant la dimension d'une longueur. Il en résulte que toutes les longueurs du problème restent proportionnelles entre elles et en particulier proportionnelle à la distance parcourue par le rejet. Cette même considération impose également qu'à une distance donnée, les vitesses (quotient entre une longueur et un temps) restent proportionnelles entre elles. Le nuage descend donc en s'épanouissant dans un « cône ».

L'intensité turbulente, rapport en chaque point entre la vitesse fluctuante quadratique moyenne et la vitesse moyenne, est une constante qui caractérise l'ouverture du cône, et donc la dimension horizontale du nuage selon la profondeur. La dimension verticale du nuage étant proportionnelle à sa dimension horizontale, la forme et le volume du nuage sont définis à chaque abscisse curviligne en fonction de l'intensité turbulente.

### **7.2 Modèles asymptotiques**

Il résulte de ce qui précède que le clapage, phénomène très complexe dans sa généralité, peut être convenablement décrit à partir d'un modèle asymptotique [2]. Il convient pour cela d'assumer, comme dans le cas d'un jet continu, une répartition gaussienne des vitesses et des concentrations ; hypothèse qui est assez bien vérifiées dans la pratique.

Les inconnues, qui se résument alors à aux valeurs des grandeurs caractéristiques sur l'axe de descente des déblais concernent :

- la concentration en fluide du milieu ambiant qui gouverne le volume du nuage,
- la concentration du nuage en déblais (une inconnue par constituant),
- les trois composantes de la vitesse du nuage.

Ces modèles asymptotiques assurent la vérification des équations de bilan suivantes :

- la conservation de la masse du milieu ambiant,
- la conservation de la masse des déblais (une équation par constituant),
- la conservation de la quantité de mouvement (trois composantes).

Les équations de Navier-Stokes, résolues analytiquement dans la section du nuage doivent être finalisés en recourant à un calcul numérique pour les intégrer le long de l'axe (modèles asymptotiques quasi-analytiques).

### 7.3 Modèles complets

Une autre conséquence de l'analyse dimensionnelle est que l'écoulement du nuage dans le milieu ambiant peut être décrit très précisément par un modèle de type Navier-Stokes-Reynolds avec un modèle de fermeture de type longueur de mélange dont la longueur caractéristique s'identifie au diamètre caractéristique du nuage de déblais.

Il convient pour cela d'utiliser un modèles de courantologie tridimensionnel non asymptotique permettant d'injecter un flux de quantité de mouvement vertical au point de clapage et de suivre son évolution jusqu'au fond.

## 8 Le Grand Projet de Port de Guadeloupe : un projet exemplaire

Anticipant la croissance du trafic des portes conteneurs dans la zone des Caraïbes liée à l'augmentation du gabarit des écluses du Canal de Panama mises en service en 2016, le Port Autonome de la Guadeloupe (PAG) à lancé en 2009 le Grand Projet de Port. Ce projet consistait à créer un quai de 350 m de long, 25 ha de terre-pleins par remblaiement d'un haut fond, ainsi qu'à approfondir et à modifier le tracé des accès nautiques.

Profitant de la réalisation de dragages d'entretien par le « Mahury » (figure 1 a), le PAG a confié en 2011, à un groupement composé des bureaux d'études ANTEA, PARETO et HOCER une mission d'étude et d'assistance à maîtrise d'ouvrage destinée à fiabiliser les modélisations à réaliser. Cette mission comprenait :

- la caractérisation, *in-situ* et dans le puits de la drague, des matériaux à claper ;
- l'évaluation du comportement des panaches turbides ;
- l'évaluation des impacts environnementaux associés au rejet test ;
- la mesure de la vitesse de chute des particules clapées ;
- l'analyse des phénomènes physiques associés à la dispersion des panaches,
- l'analyse du type de modélisation numérique à réaliser ;
- l'analyse des rejets du Grand Projet du Port.

Une campagne de suivi des clapages tests, mobilisant un avion et trois navires, a été réalisée pendant quatre jours. Elle a permis de mesurer les paramètres météo-océanographiques, l'évolution de la turbidité et d'indicateurs chimiques au moyen de prélèvements lors de la descente du panache de clapages dans une profondeur de 500 m CM. Des sondes installées sur des bouées autour des zones trois initialement prévues ont permis de s'assurer qu'il n'y avait pas de retour significatif à la côte, ni dans des zones coralliennes riches en termes de faune et de flore.

Ces résultats de suivi ont conduit à la réalisation de modélisations numériques par le bureau d'études SOGREAH qui a implémenté à cet effet un modèle de turbulence à longueur de mélange dans le logiciel Télémac 3D non hydrostatique pour permettre l'injection et le suivi d'une composante verticale de la quantité de mouvement. La modélisation a donc permis de suivre de manière rigoureuse les panaches des séquences de clapages depuis l'ouverture des clapets jusqu'à ce que la turbidité ait disparu. Ces modélisations ont ainsi permis de valider le choix des sites de clapage à retenir et de définir les séquences de rejets sur les différents points en fonction des conditions océano-météorologiques.



Figure 5 : Le « Mahury » en cours de clapage [9].

## 9 Références

- [1] Alzieu C. & al. (1999) *Dragage et environnement marin – Etat des connaissances*, 223 p., Paris : IFREMER.
- [2] Bougis J. & Farnole P. (2002) Modélisation du clapage de déblais de dragage en milieu marin, *Actes des VII<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Génie Côtier et de Génie Civil*, pp. 221-229, Anglet, mai 2002.
- [3] Bougis J. (2016) Méthode et outils pour la modélisation de la dilution des rejets d'usine de dessalement d'eau de mer, *8<sup>e</sup> Rencontre Internationale Hydrodynamique Marine Casablanca – Maroc – 27 et 28 octobre 2016*
- [4] Boutin R. (2000) Amélioration des connaissances sur les rejets par clapage de type vase, *Actes des VI<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*, Tome 2, pp 623-633.
- [5] Boutin R. (2000) *Dragage et rejets en mer – les produits de type vase*, 307p. Paris : Presse des Ponts et Chaussées. (publication de sa thèse).
- [6] Collins M. (1989) – The behaviour of cohesive and non-cohesive sediments – *Séminaire international sur les aspects environnementaux liés aux activités de dragage*, pp.15-32 – Nantes.
- [7] Gordon R.B. (1974) Dispersion of dredged spoil dumped in near-shore waters, *Estuarine and Coastal Marine Science*, n°2, pp.349-358.
- [8] Truitt C.L. (1988) Dredged material behaviour during open-water disposal, *Journal of Coastal Research*, Vol.4, N°3, pp 489-497.
- [9] ANTEA – HOCER – PARETO (2012/05) Grand Projet de Port, recherche du site d'immersion, Rapport final Rév.B.
- [21] Brandsma M.G., Divoky D.J. (1976) - "*Development of models for prediction of short-term fate of dredged material discharged in the estuarine environment*", Pasadena, California, Tetra Tech Inc. for USAEWES. 133 p., Contract report D76-5.