

La baie de la Seine est une baie de la Manche située en Normandie, entre la pointe de Barfleur et le Cap de la Hève (photo 1). Le port du Havre, faisant l'objet d'un trafic international. Les pratiques de dragage constituent un enjeu pour le développement et le maintien des activités portuaires. Très souvent, les caractéristiques des sédiments, utilisées pour caractériser l'érosion, le transport et le dépôt, se limitent à l'étude granulométrique. Sous l'influence de la friction de l'eau avec le fond de la mer (contraintes du fond), les sédiments s'érodent et sont amenés en suspension dans la colonne d'eau (travaux de Shield (1935), de Bagnold (1966), classifications de Ross et Mehta (1989) avec LCMS et HCMS, de Flemming (2000)). Le diagramme de Hjulström indique dans la gamme de diamètre (1-100 µm), l'importance de la teneur en eau (argiles et silts non consolidés $w = 90\%$ à consolidés $w = 40\%$) sur la variation des vitesses du courant, respectivement 20 à 300 cm/s pour les particules microniques. La caractérisation rhéologique apporte des éléments complémentaires sur le comportement des sédiments cohésifs, de type vase, dominés par la présence d'argiles, en fonction de son état physique (fluides, pâteux, solides compressibles à rigides). Elle permet d'analyser les conditions sous lesquelles le sédiment pourra s'écouler, sous l'effet d'une contrainte de cisaillement (figure 1).



Photo 1: Vue de l'estuaire de la Seine et du port du Havre

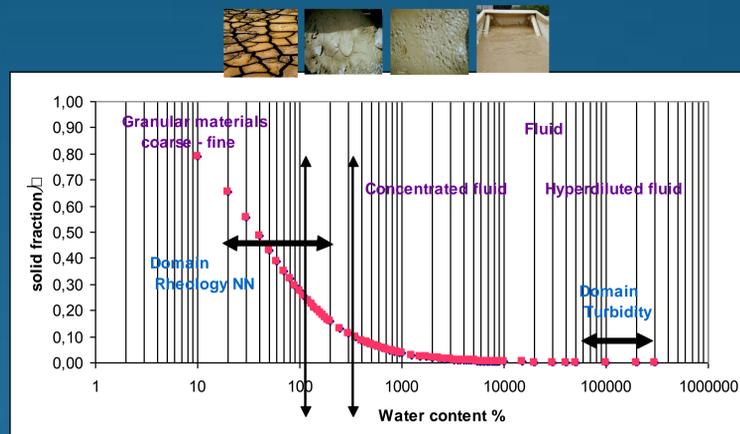


Figure 1 : Influence de la teneur en eau et domaine de la rhéologie NN

L'intérêt de développer les caractérisations rhéologiques des sédiments est multiple :

- Des programmes de recherche ont été organisés en Europe visant, à partir des caractéristiques rhéologiques des sédiments, une meilleure connaissance des processus hydro-sédimentaires pour une optimisation des pratiques de dragage en diminuant l'extraction des matériaux tout en assurant la sécurité de la navigation. Les études de rhéologie doivent permettre de mieux identifier le rôle du paramètre de structuration dans les modèles d'érosion et de consolidation afin de déterminer son importance pour la définition d'un fond navigable. Elles varient selon de nombreux paramètres de leur environnement: salinité, composition minéralogique, contenu en matière organique, pH, potentiel redox, intensité turbulente. (Pham Van Bang et al., 2007).
- Les quantités importantes de matériaux dragués et la nature de ces sédiments posent un problème de dépôt à terre et de leur valorisation. L'utilisation des sédiments en coulis pour combler les gravières et les marnières est un débouché pour une catégorie de sédiments pour lequel des études de transferts de la pollution résiduelle vers l'air, les végétaux et les aquifères doit être menées au laboratoire et sur les sites-pilotes. Le comportement des sédiments dans une formulation de coulis revêt une importance pour l'efficacité de comblement.
- Dans le domaine côtier, l'érosion des sédiments est liée d'une part à la force exercée par l'eau, dont la pression des vagues, et d'autre part à la résistance ou cohésion des sédiments. Les contraintes de fond sont la conséquence des courants maritimes, des marées et des vagues et vont induire une mobilité sédimentaire (De Wit, 1995). Ce mouvement altère les propriétés mécaniques de la couche sédimentaire, diminue sa rigidité et augmente son érodabilité. Dans d'autres situations, le fond vaseux peut se liquéfier sous l'action des vagues (Lindenberg et al., 1989 ; Feng, 1992 ; De Wit, 1995) et être ainsi rapidement entraîné par les courants. En outre, la mise en mouvement de la couche sédimentaire peut avoir un effet sur la propagation des vagues, en dissipant son énergie et en modifiant leur dispersion (Yamamoto et al., 1986). La rigidité des sédiments constitue l'un des paramètres fondamentaux qui conditionnent la mise en mouvement et le transport suite aux processus d'érosion et de sédimentation.

Suivant l'approche employée, les perceptions sont différentes (Winterwerp C., Van Kesteren V.G.M., 2004) :

Pour un mécanicien des fluides, les équations de l'écoulement vont être utilisées.

A proximité d'une paroi ou d'un fond, un écoulement génère une force sur l'interface et par réaction cette dernière le ralentit. Cette zone où le fluide perd une grande partie de son énergie cinétique est appelée couche limite, qui est la zone du maximum d'échanges entre les grains du fond et ceux temporairement en suspension. Il s'agit à la fois d'une zone de transport et de dépôt. Le transport des particules est souvent en conditions turbulentes. En hydrodynamique, les modèles analytiques développés, le comportement rhéologique de la couche sédimentaire est supposé comme purement visqueux (Dalrymple et Liu, 1978 ; Ng Co, 2000), purement élastique (Mallard et Dalrymple, 1977), viscoélastique (MacPherson, 1980 ; Maa et Mehta, 1988) ou viscoplastique (Mei et Liu, 1987). Du à leur caractère linéaire, ces modèles analytiques concernent davantage la réponse du fond, liquéfié ou pas, que la transition solide - liquide et la modification rhéologique du matériau situé à l'interface. Le frottement sur le fond est introduit avec la vitesse de frottement U^* . Le début d'entraînement ou érosion du sol peut être défini quand $U^* > U^*_{crit}$.

La contrainte pariétale est évaluée à partir des équations de la mécanique fluide, avec des valeurs de la contrainte de fond extrêmement faibles, dans une gamme de valeur incompatible avec la validation par mesure expérimentale en canal ou in situ. D'autres vont considérer le flux d'érosion pour en déduire la contrainte d'érosion. Plusieurs auteurs ont proposé des formulations pour l'estimation du flux d'entraînement d'une couche de vase fluide dont, Kranenburg et Winterwerp (1997).

Pour un mécanicien des sols ou un sédimentologue, le paramètre cohésion non drainée C_u et les mécanismes de floculation est utilisé.

La cohésion non drainée C_u est définie comme la contrainte résiduelle dans le fond après rupture d'un échantillon au scissomètre. Le domaine des valeurs de C_u est entre 0,1 et 100 kPa suivant son degré de consolidation. Kesteren (2004) définit, en fonction de la teneur en eau des valeurs de C_u entre 10-100 Pa ($200\% > w > 150\%$) et 80 - 8000 Pa ($150\% > w > 50\%$). Pour des vases très fluides, des valeurs de moins de 10 N/m² sédiments fluides sont indiquées mais la sensibilité de l'appareil n'est pas indiquée. Dans cet essai avant et après rupture l'échantillon relativement « solide », une surface de rupture se produit à l'interface de la zone mobile et de la zone fixe, il ne se produit pas un écoulement généralisé comme dans l'espace annulaire d'un rhéomètre ou dans l'espace entre deux plateaux. Cette mesure intéresse les premiers mm à cause de la hauteur des pales du scissomètre. Des appareils à pénétration existent également. Certains travaux notamment sur la floculation proposent d'établir les liens entre les mécanismes internes d'échelle microscopique (théorie DLVO) et les relations constitutives associées.

Le choix d'une approche basée sur l'étude rhéologique des sédiments

La rhéologie caractérise de manière macroscopique la relation entre les contraintes exercées sur un matériau et les conditions de déformation et/ou d'écoulement induites au sein du matériau. Nous nous rapprocherons donc des résultats d'autres champs disciplinaires qui travaillent sur l'écoulement des matériaux en pâte et suspension; ciments coulées torrentielles, boues de forage, céramique..... sans oublier les travaux précurseurs de Migniot et Partheniades dès 1960. Dans la littérature, il est rare de voir des études sur la rhéométrie des vases naturelles, quand elles existent c'est l'approche en oscillation qui est utilisée. En effet, plusieurs modèles analytiques de l'interaction entre les vagues et les fonds sédimentaires montrent que le moteur du mouvement engendré au sein de la couche est lié aux gradients horizontaux de pression et non au frottement à l'interface notamment Gade (1958). Or dans la plupart des essais d'oscillation au rhéomètre, le gradient de pression n'intervient pas. Le seuil d'écoulement défini (figure 2) est une caractéristique intrinsèque influencée par leur concentration en matière sèche et le rapport de la fraction fine sur la fraction totale (Kervella et al. 2009; Pantet et al. 2010)

Pour des concentrations élevées, le comportement est non-newtonien, de type Bingham plastique non-idéal. Le comportement d'un tel corps se traduit par un état élastique/ visco-élastique lorsque la contrainte de cisaillement est inférieure à une valeur critique (appelée seuil de cisaillement ou contrainte seuil). Il faut aussi considérer que les relations constitutives varient selon la nature et l'état du matériau. Les propriétés chimiques des sédiments cohésifs permettent plusieurs types de liaisons entre les particules qui sont à l'origine de différentes structures particulières, notamment les argiles (Pantet et Monnet. 2006).

Données baie Marennes Oléron		Régime %		
Sédiments	Classification	Silt	Arg	Org
Silticéux	I	760	234	45
Argileux	II	645	346	40
Silticéux	III	520	461	50
Silticéux	IV	395	674	100
Argileux	V	10	787	100

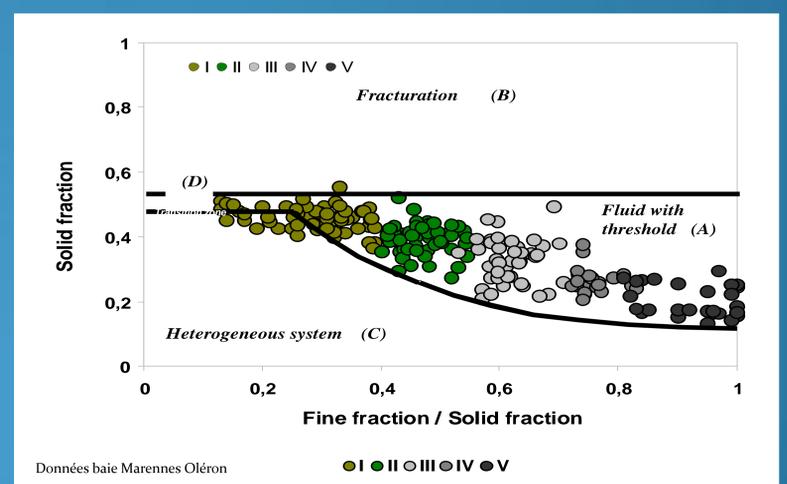


Figure 2 : Relation établie entre le seuil d'écoulement, la teneur en solide et la teneur en fines