



41^{ème}

Colloque Annuel du
Groupe Français de Rhéologie

RHÉOLOGIE DES SUSPENSIONS

DE
L'ENVIRONNEMENT
ET DE
L'INDUSTRIE



CHERBOURG, 18-20 OCTOBRE 2006



Rhéologie des vases naturelles : de l'expérience à la connaissance

Ricardo Silva Jacinto

Ifremer, Centre de Brest, Département de Géologie Marine, B.P. 70, 29280 Plouzané

Résumé : Les écoulements naturels de suspensions chargées en sédiments sont en partie déterminés par la rhéologie de suspensions qu'ils transportent. L'intégration de la rhéologie des suspensions naturelles dans les équations de quantité de mouvement servant à modéliser ces écoulements reste cependant limitée à quelques applications simplifiées de sorte à respecter l'analogie rhéométrique à la base de la quantification empirique, voire phénoménologique, des lois de comportement utilisées. Après une présentation de l'usage qui est fait de la rhéologie dans la modélisation du transport sédimentaire, un modèle de fermeture rhéologique est proposé pour la modélisation de l'ensemble des écoulements naturels riches en sédiments.

Mots-clé : Rhéologie, Transport sédimentaire, Modélisation, Courants de gravité.

1. Introduction

Le cycle global des sédiments très fins, cohésifs, du type vase, limons, boues ou argiles, interagit avec maintes activités humaines et conditionne la relation fragile entre la nature et la pression anthropique. Des problèmes liés à ce type de sédiments se posent, par exemple, dans les zones estuariennes et portuaires ; ils concernent les écosystèmes intertidaux, la conchyliculture et les ressources halieutiques, l'envasement portuaire, les rejets de dragage et de traitement des eaux, l'érosion littorale et la subsidence de villes entières (e.g. Venise et Nouvelle Orléans). Sur des échelles de temps et d'espace plus larges, les sédiments vaseux jouent un rôle dans la stabilité des marges et pentes océaniques, dans l'occurrence de glissements sous-marins parfois associés à la génération de tsunamis, dans la formation de réservoirs d'hydrocarbures et affectent, par conséquent, la gestion et dimensionnement des plateformes off-shore, de la mise en place de pipelines et de câbles de communication.

Les sédiments cohésifs naturels (vases) sont des mélanges naturels composés globalement d'argile minérale, de silt, de sables et de matières organiques. Dû à la présence de particules de petite taille dans sa composition, les sédiments cohésifs nécessitent de moins d'énergie hydrodynamique que les sables pour être érodés, remobilisés et transportés. Cependant, leur érosion et transport sont des processus complexes qui dépendent du comportement mécanique et des propriétés rhéologiques du sédiment.

L'approche scientifique de l'ensemble des problèmes liés à ce type de sédiment, à leur modélisation et leur gestion se heurte le plus souvent à la méconnaissance de leur comportement mécanique complexe, *i.e.* à leur rhéologie.

Entre suspensions colloïdales et comportement granulaire, ces sédiments sont liquides, ou plastiques en début de consolidation, pour devenir de véritables solides après des temps de tassement prolongés, des dessiccations appréciables ou des états de contrainte importants. En outre, dans tous ces états, ces sédiments présentent des comportements à seuil, difficiles à prédire et à quantifier dans leurs conditions *in situ*.

Le problème majeur dans l'étude de la rhéologie des vases naturelles est d'une part lié à l'incertitude et à la variabilité de ses propriétés constitutives, voire de sa composition, dans des systèmes sédimentaires naturels très dynamiques. D'autre part, les diverses sollicitations que ces sédiments subissent *in situ* ont rarement des analogues parmi les expériences rhéométriques en laboratoire. L'approche empirique demeure donc insuffisante.

Les différentes communautés scientifiques ont toujours été conscientes de ces difficultés. Plusieurs travaux remarquables, par leur rigueur et persévérance ont été limités par les développements instrumentaux de leur époque. Par exemple, en France, les travaux de Migniot [1], dans le domaine du Génie Côtier, menés à l'aide de simples rhéomètres, demeure toujours une référence. Mais aussi, les résultats obtenus à l'aide de scissomètres, *in situ* et en laboratoire, dans le domaine de la géologie.

2. Hydrodynamique et rhéologie

Le transport des sédiments cohésifs est généralement traité comme un transport de suspensions passives qui ne modifient pas les propriétés de l'écoulement hydrodynamique (courant de marée, houle, turbulence). Le lit sédimentaire est généralement considéré comme un milieu rigide. Les flux d'érosion et de dépôt entre ces deux domaines, l'un considéré comme de l'eau, l'autre

comme rigide, sont le plus souvent modélisés par des lois empiriques. Cependant, les suspensions en sédiments sont suffisamment chargées pour modifier les propriétés de l'écoulement hydrodynamique tout en restant facilement mobilisables.

La modélisation mathématique du transport sédimentaire est basée sur la résolution couplée d'équations de conservation de trois types : conservation de volume (équation de la continuité), conservation de la quantité de mouvement et conservation de la masse en sédiment. L'hypothèse d'incompressibilité permet de traiter l'équation de continuité de manière classique en présence de sédiments. L'équation de transport de la concentration en sédiment est forcée par la quantité de mouvement (advection, mélange) et permet d'intégrer différents processus sédimentaires : l'érosion, le dépôt, la chute relative des particules (intégrant la floculation). Sa formulation n'est fondamentalement pas modifiée en présence de concentrations importantes. Par contre, l'équation de conservation de la quantité de mouvement peut être substantiellement modifiée par la présence de sédiments en suspension. Car, la résolution de l'équation de conservation de la quantité de mouvement est étroitement liée à la fermeture choisie pour cette équation, *i.e.* à la relation supposée entre les contraintes de cisaillement et les gradients de vitesse.

En présence d'eau claire ou peu chargé, les écoulements naturels présentent un nombre de Reynolds élevé. Il est ainsi possible de faire appel à des fermetures turbulentes classiques. En présence de suspension plus chargées, la cohésion et la viscosité baissent le nombre de Reynolds de l'écoulement, la turbulence est insuffisamment développée. Deux difficultés surgissent : d'une part, celle de la fermeture turbulente à bas Reynolds, que nous n'aborderons pas ; d'autre part, celle de la détermination de la relation constitutive de la suspension.

La rhéologie a été intégrée dans l'équation de quantité de mouvement dans de nombreux travaux de modélisation. Mais elles ont été plutôt supposées que mesurées. La validité de ces travaux dépend de la validité des relations constitutives supposées. Alors que peu de travaux ont été menés sur la caractérisation rhéologique des vases naturelles. Dans l'ensemble de ces études, l'intégration de la rhéologie revient à l'expression de comportements rhéologiques simplifiés afin que, d'une part, les expériences rhéométriques utilisées demeurent analogues aux écoulements modélisés et, d'autre part, de manière à conserver le formalisme des équations de Navier-Stokes ou d'une de leurs simplifications. La rhéologie a été ainsi intégrée dans trois types d'applications : (i) les écoulements hydrostatiques permanents ou quasi-stationnaires, dont les courantstidaux, (ii) la propagation d'ondes harmoniques de gravité sur des fonds meubles vaseux, dont l'interaction houle-vase et (iii) l'écoulement

de courants de gravité sur des fonds irréguliers, dont les glissements sous-marins.

3. Modèles théoriques en écoulement permanent

Pour des écoulements stationnaires ou de très basse fréquence (*e.g.* marée), le comportement viscoplastique des vases a été souvent approché par le modèle phénoménologique de Bingham : en dessous d'une certaine contrainte seuil τ_y , la vase est considérée rigide ; en dessus, les incréments de contrainte sont proportionnels aux incréments de gradients de vitesse. De sorte à reproduire plus de complexité dans le comportement, d'autres modèles viscoplastiques [2] (Herschel-Bulkley, fluide bi-linéaire) ont été utilisés. Parfois, la thixotropie a été introduite en couplant à la loi de comportement une équation de cinétique structurelle [3] modulant la contrainte seuil.

Dans leur formulation généralisée, les lois de comportement utilisées pour fermer l'équation de la quantité de mouvement s'écrivent :

$$\tau = \tau_y(\rho, \lambda) + \eta(\rho, \dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}$$

où τ représente des contraintes de cisaillement, ρ la densité, l'indice y les conditions de seuil, λ un paramètre structurel, η la viscosité, déterminée en partie par les gradients de vitesse $\dot{\gamma}$.

L'utilisation de modèles viscoplastiques pose des limitations. La contrainte seuil est difficile à définir et à mesurer, surtout *in situ*. Etant un paramètre de transition (seuil), la contrainte seuil est cependant utilisée comme une quantification de la cohésion dans des situations d'écoulement éloignées des conditions de transition. Cette inadéquation conceptuelle est compensée dans la pratique par l'usage de lois de comportement plus complexes faisant appel à des paramètres qui correspondent à autant de degrés de liberté et d'adaptation de ces lois aux mesures rhéométriques.

La conceptualisation de la rigidité des suspension en dessous de la contrainte seuil fait que seuls les contraintes de cisaillement aux limites du domaine peuvent être quantifiées avant la mise en écoulement de la suspension. Les modèles viscoplastiques peuvent aider à décrire un écoulement mais sont insuffisants pour décrire l'évolution de l'état de déformation au sein du matériau et sa mise en écoulement. Ces modèles ne doivent pas être utilisés pour des écoulements transitoires ou non hydrostatiques.

4. Modèles théoriques à haute-fréquence

Les vagues peuvent générer des contraintes maximales à l'intérieur de la couche sédimentaire et y induire un mouvement susceptible de devenir instable. Ce mouvement altère les propriétés mécaniques de la couche

sédimentaire, diminue sa rigidité et augmente son érodabilité. Dans certaines situations, le fond vaseux peut se liquéfier sous l'action des vagues et être ainsi rapidement entraîné par les courants ou couler sous l'action de la gravité si la pente du fond le permet.

Depuis le modèle présenté par Gade [4], 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 au gradients horizontaux de pression et non au frottement à l'interface. Dans les modèles analytiques développés, le comportement rhéologique de la couche sédimentaire est supposé *a priori* et rarement validé par des mesures rhéométriques du comportement de vases naturelles. Le comportement de la couche sédimentaire a été ainsi supposé comme purement visqueux, purement élastique, viscoélastique ou viscoplastique. Dû à leur caractère linéaire, ces modèles analytiques concernent davantage la réponse du fond, liquéfié ou pas, que la mise en liquéfaction et l'altération rhéologique qui l'accompagne.

En effet, le processus de liquéfaction et de rupture ont lieu au sein du sédiment près des interfaces avec des couches plus profondes et plus rigides.

Afin de modéliser l'évolution non-linéaire des vases sous l'action des vagues, des tests dynamiques peuvent être utilisés à des fréquences caractéristiques du forçage hydrodynamique. Les concepts de module de cisaillement complexe ou de viscosité complexe permettent d'utiliser le formalisme des équation de Navier-Stokes dans l'espace complexe. L'effet de la densité peut être quantifié dans la plage de réponse linéaire. Pour des amplitudes de déformation plus importantes, le module complexe diminue relativement à sa valeur à faible déformation. Cette diminution relative est indépendante de la densité. On peut en effet écrire pour une densité et une amplitude de déformation données :

$$G_0(\rho, \gamma_0) = \phi(\gamma_0) \cdot G_{0,e}(\rho)$$

5. Effet de la concentration en sédiments

Dans un environnement naturel, les propriétés rhéologiques des sédiments sont déterminées par de nombreux facteurs, allant de la salinité de l'eau à la variabilité saisonnière de l'activité biologique. En termes de modélisation, cependant, c'est la concentration en sédiments qui est retenue comme le paramètre déterminant au premier ordre la quantification des paramètres rhéologiques de telle ou telle autre loi de comportement appropriée.

Ayant travaillé sur des dizaines de sédiments d'origines diverses, Migniot a retiré une loi générale d'après les mesures de rigidité initiale τ_y (contrainte seuil de Bingham) et de viscosité relative ou absolue μ permettant de relier ces valeurs à la concentration en sédiments secs par une loi de puissance de la forme :

$$\tau_y = b \cdot T_s^a$$

τ_y est exprimé en $N \cdot m^{-2}$ et T_s en $g \cdot l^{-1}$. Les paramètres a et b sont caractéristiques de chaque vase. Le paramètre a est assez invariable avec la nature du sédiment ($a=3$ pour des vases fluides et 6 pour des vases plastiques et solides). Le paramètre b varie avec la nature des vases ; il varie entre 10^{-15} et 10^{-14} .

Cependant, aucune loi n'a pu être retirée concernant les concentrations seuil entre le domaine des vases fluides et plastiques ni sur la manière comme ces lois convergent vers les propriétés de l'eau claire (concentration de gel).

Le retour aux résultats de Migniot permet cependant de constater qu'une loi exponentielle serait aussi satisfaisante du point de vue statistique que la décomposition en deux lois de puissance.

D'autres mesures rhéométriques montrent que, dans le domaine linéaire, le module de cisaillement complexe ($G_{0,e}$) augmente de manière exponentielle avec la densité du sédiment :

$$G_{0,e} = \alpha \cdot e^{\beta \frac{\rho - \rho_e}{\rho_e}}$$

où ρ_e est la densité de l'eau, prise comme référence ($1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), et α et β sont des paramètres propres au matériau.

Les paramètres rhéologiques majeurs (contraintes seuil, modules de cisaillement, viscosité) semblent varier très fortement avec la concentration en sédiments. Cette dépendance ne suis pas strictement une loi puissance, comme l'on pourrait s'attendre d'après la théorie de la percolation.

L'effet de la concentration sur les paramètres rhéologiques majeurs permet de comprendre la modulation de la turbulence et l'effet de la rhéologie dans les écoulements naturels sur la base du nombre de Reynolds R_e , qui paramétrise la turbulence :

$$R_e = \frac{\rho U h}{\mu}$$

où U est la vitesse moyenne de l'écoulement et h l'épaisseur de l'écoulement.

Pour de très faibles concentrations, les écoulements s'établissent naturellement à haut Reynolds. Dans ces cas, à U et h constants, une augmentation de la concentration induit une augmentation de la densité sans que sa viscosité dynamique soit modifiée (restant celle de l'eau). Le Reynolds de l'écoulement augmente linéairement avec la concentration. A l'opposé, à très fortes concentrations, les écoulements s'établissent à très bas Reynolds et une augmentation de la concentration fait augmenter la viscosité et induit une réduction du Reynolds qui est, dans ce cas, inversement proportionnel à la puissance 5 de la concentration. En supposant une relation continue entre le Reynolds d'un écoulement et sa concentration en sédiment, il peut être supposé que la présence des

sédiments contribue à augmenter la turbulence à faible concentration, puis, lorsque les forces de cohésion deviennent prépondérantes devant les forces turbulentes, à la dissiper et l'anéantir. Des expériences récentes valident ce raisonnement.

6. Un modèle de fermeture rhéologique

La modélisation d'écoulements de gravité sur des morphologies complexes et l'alternance de zones d'accélération ou ralentissement nécessite d'une fermeture rhéologique plus complexe et cohabitant dans le même ensemble d'équations avec une expression de la turbulence. Le modèle présenté ci-après aborde de manière simple un ensemble large de concepts. La comparaison des résultats qui en sortent avec des expériences d'écoulement en laboratoires semble prometteuse.

La contrainte de cisaillement horizontale est décomposée en deux parties. La première est liée à la cohésion (élasticité et plasticité) de la suspension et associée à l'état de déformation du matériau. La deuxième est liée à sa viscosité et déterminée par la vitesse de déformation :

$$\tau = \underbrace{G_0 \lambda \gamma_r}_{\text{cohésion}} + \underbrace{\mu \dot{\gamma}}_{\text{viscosité}}$$

Dans cette équation, μ est la viscosité dynamique, considérée constante pour une densité donnée et donc constitutive de la suspension. Le paramètre G_0 représente le module de cisaillement élastique du matériau dans une situation de repos (ou de faible déformation) et de structuration maximale. L'état de structuration du matériau est représenté par le paramètre structural λ qui vaudra 1 pour une structure complètement développée. Il vaudra zéro dans un état de déstructuration totale. L'état de déformation (élastique ou plastique) du matériau est représenté par γ_r .

Le paramètre structural λ est défini en termes de module de cisaillement élastique qui est pris comme une mesure de la cohésion du matériau. L'évolution temporelle du paramètre structural est modélisée sur la base de cinétiques de réaction du premier ordre pour la structuration et la déstructuration :

$$\dot{\lambda} = \alpha(1 - \lambda) - \frac{\dot{\gamma}}{\gamma_c} \lambda$$

La récupération structurale α est proportionnelle à la quantité de structure pouvant être créée $(1 - \lambda)$ et déterminée par une échelle de temps paramétrée par le taux d'agrégation ou récupération α , qui semble peu varier d'un type d'argile à l'autre.

La déstructuration est supposée proportionnelle, d'une part, à la quantité de structure existante, *i.e.* λ , et pouvant donc être détruite, et, d'autre part, au gradient de vitesse. Le paramètre de déstructuration proposé sur une base empirique par différents auteurs a été remplacé par l'inverse d'une déformation critique notée γ_c . Le taux de

déstructuration est ainsi donné par $\dot{\gamma}/\gamma_c$, *i.e.* l'échelle de temps de déstructuration est donnée par le temps qu'il faut, à une vitesse de déformation de $\dot{\gamma}$, pour attendre la déformation critique, ou seuil, de déstructuration ou de mise en écoulement. La déformation critique peut être déterminé expérimentalement : elle ne présente pas de dépendance avec la concentration de la suspension, la contrainte seuil ou l'histoire de la suspension et est relativement constante pour différents types d'argile. Une valeur constante de 0.1 est généralement considérée.

L'état de déformation élastique ou plastique de la suspension est défini comme l'état de déformation moyenne sur l'ensemble de la structure. Il ne s'agit pas d'une déformation mesurable par rapport à une déformation initiale, mais d'un état de déformation actuel, résiduel, mesurable par rapport à l'état de déformation que le matériau acquerrait si son état de contrainte et perturbation devenaient nuls. L'évolution temporelle de l'état de déformation s'écrit :

$$\dot{\gamma}_r = \dot{\gamma} - \gamma_r \frac{\alpha(1 - \lambda)}{\lambda}$$

La vitesse de déformation résiduelle est ainsi donné par la vitesse de déformation modulé par le taux de restructuration (les nouvelles connections ont une déformation nulle qui affecte ainsi la déformation moyenne). A l'équilibre, pour une vitesse d'écoulement constante, l'état de déformation correspond à l'état critique de déformation ($\gamma_{r,e} = \gamma_c$).

En régime stationnaire, la contrainte de frottement peut être modélisée par un modèle viscoplastique de type Bingham ($\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma}$) où la contrainte seuil (τ_y) est modulée par l'état structural à l'équilibre et correspond à une situation de déformation seuil ($\tau_y = G_0 \lambda_e \gamma_c$).

Ce modèle est capable de reproduire les résultats rhéométriques de différents types de tests. Son intégration dans un modèle d'écoulement 1-DV a permis de reproduire des différents régimes d'écoulement produits en laboratoire pas Baas et Best [5].

7. Références

- [1] Migniot, C. Tassement et rhéologie des vases. *La Houille Blanche*, 1-2, 11-111 (1989).
- [2] Locat J. and Lee H. J. Submarine landslides: advances and challenges *Can Geotech. J.*, 39, 193-212 (2002).
- [3] Toorman E., Modelling the thixotropic behaviour of dense cohesive sediment suspensions. *Rheologica Acta*, 36, 1, 56-65.
- [4] Gade, H.G., Effect of a nonrigid, impermeable bottom on plane surface waves in shallow water, *J. Marine Res.*, 16,2, 61-82 (1958).
- [5] Baas J.H. and Best J.L., Turbulence modulation in clay-rich sediment-laden flows and some implications for sediment deposition. *J. Sed. Res.*, 72, 3, 336-340 (2002).